

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРО- МЕХАНІКА та АВТОМАТИКА

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ
ЗБІРНИК**

Заснований у 1965 р.

103

**Дніпро
2020**

Засновник – Національний гірничий університет

**Рекомендовано до видання вченою радою
Національного технічного університету
"Дніпровська політехніка"**

(протокол № 3 від 17 лютого 2020 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Півняк Г.Г.	Головний редактор, академік НАН України, ректор НТУ "ДП"
Папайка Ю.А.	Заступник головного редактора, доцент, НТУ "ДП"
Ципленков Д.В.	Відповідальний секретар, доцент, НТУ "ДП"

EDITORIAL BOARD

Pivniak G.G.	Chief Editor, Academician of NAS of Ukraine, Rector of Dnipro University of Technology
Papai'ka Y.A.	Deputy Editor, Associate Professor, Dnipro University of Technology
Tsyplenkov D.V.	Executive Managing Editor, Associate Professor, Dnipro University of Technology

Члени редакційної колегії

Бешта О.С.	чл.-кор. НАН України, НТУ "ДП"
Блюсс Б.О.	професор, ІГТМ НАН України ім. Н.С. Полякова
Випанасенко С.І.	професор, НТУ "ДП"
Заболотний К.С.	професор, НТУ "ДП"
Іванов О.Б.	професор, НТУ "ДП"
Колб Ант.А.	професор, НТУ "ДП"
Колосов Д.Л.	професор, НТУ "ДП"
Мілих В.І.	професор, НТУ "ХПІ"
Муха А.М.	професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна
Плешков П.Г.	професор, Кіровоградський НТУ
Розен В.П.	професор, НТУ "КПІ"
Самуся В.І.	професор, НТУ "ДП"
Сивокобилєнко В.Ф.	професор, ДонНТУ
Сиченко В.Г.	професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна
Сінчук О.М.	професор, КНУ
Слесарєв В.В.	професор, НТУ "ДП"
Ткачов В.В.	професор, НТУ "ДП"
Нойбергер Н.	професор, Есслінгенський університет прикладних наук, Німеччина
Рєбізант В.	професор, Вроцлавський технічний університет, Польща

The members of Editorial Board

Beshta O.S.	Corresponding Member of NAS of Ukraine, Dnipro University of Technology
Bliuss B.O.	Professor, M.S. Polyakov IGTM of NAS of Ukraine
Vypanasenko S.I.	Professor, Dnipro University of Technology
Zabolotniy K.S.	Professor, Dnipro University of Technology
Ivanov O.B.	Professor, Dnipro University of Technology
Kolb Ant.A.	Professor, Dnipro University of Technology
Kolosov D.L.	Professor, Dnipro University of Technology
Milykh V.I.	Professor, NTU "KhPI"
Mukha A.M.	Professor, Academician V. Lazarjan DNURT
Pleshkov P.G.	Professor, Kirovograd NTU
Rozen V.P.	Professor, NTU "KPI"
Samusia V.I.	Professor, Dnipro University of Technology
Sivokobylenko V.F.	Professor, DonNTU
Sychenko V.G.	Professor, Academician V. Lazarjan DNURT
Sinchuk O.M.	Professor, KNU
Slesarev V.V.	Professor, Dnipro University of Technology
Tkachev V.V.	Professor, Dnipro University of Technology
Noiberger N.	Professor, Esslingen University of Applied Sciences, Germany
Rebizant V.	Professor, Wroclaw University of Technology, Poland

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України (наказ Міністерства освіти і науки України від 16.05.2016 № 515), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук

Адреса редакції

Кафедра Електротехніки, національний технічний
університет "Дніпровська політехніка",
просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна
Тел: (056) 370-13-92, (066) 774-63-09, Факс: (056) 370-13-92
E-mail: tsyplenkov.d.v@nmu.one
Сайт: <http://gea.nmu.org.ua>

Editorial office adress

Department of Electrical Engineering, Dnipro University of
Technology,
19 D. Yavornytsky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine
Tel: (056) 370-13-92, (066) 774-63-09. Fax: (056) 370-13-92
E-mail: tsyplenkov.d.v@nmu.one
Website: <http://gea.nmu.org.ua>

Збірник зареєстрований у Міністерстві інформації України.
Реєстраційний номер KB № 7498 від 03.07.2003.

©НТУ "ДП", 2020

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

UDC 620.9

IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICITY IN THE NETWORKS OF NON-TRACTION CONSUMERS OF RAILWAYS BY CONNECTING TO THEM RENEWABLE SOURCES

V. V. Kuznetsov¹, Y. G. Kachan²

¹National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
wit1975@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8169-4598>

²Zaporizhzhya Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine,
kachan@zntu.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9984-3646>

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЗАЛІЗНИЦЬ ШЛЯХОМ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО НИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

В.В. Кузнецов¹, Ю.Г. Качан²

¹Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна,
wit1975@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8169-4598>

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна,
kachan@zntu.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9984-3646>

Abstract. The paper considers expedient schemes of connection of renewable energy sources (RES) to railway power grids. Today, the implementation of distributed generation (DG) based on RES in the railway grid is an **urgent issue**. Despite the fact that scientific and practical aspects of the development and implementation of DG systems are studied by many domestic and foreign scientists, there is still no reasonable opinion on the most appropriate use of a particular direction of RES in railway power supply systems. There are only recommendations for connecting RES to the tires of traction substations. Now it is profitable to create their own power plants with RES, connecting them to external networks, from which only then the railway receives power. **The purpose of the work** is to improve the quality of electricity in the supply networks of non-traction consumers of railways by connecting to them renewable energy sources. **Research methods** are based on modern methods of computational mathematics, statistics and information analysis using modern computer technology. **Research results.** The paper develops supply system for traction and non-traction consumers by electric mains to which wind power plants (WPPs) are connected, and a model of railway mains where RES is connected to transformer substation (TS) wiring of non-traction consumers. The introduction of wind turbines in the railway power supply system according to the above scheme can really significantly improve the quality of electricity in the power supply network of their non-traction consumers. But the approximation of this quality to the allowable values occurs only when the power of the additional source is not less than 35% of the nominal value of the total load of all connected to the winding 6.6 kV consumers. An example of connecting a photomultiplier tube to the railway network, which is carried out without the use of any storage of energy generated by them, is considered. The introduction of possible directions for the use of RES in railway power supply systems is chaotic and unsystematic, and so far there is no reasonable vision for the most appropriate option. **The originality** is the introduction of renewable energy sources in the power supply system of non-traction consumers of railway transport. **Practical implications.** The use of additional renewable energy sources to supply non-traction consumers minimizes electricity consumption.

Key words: renewable energy sources, distributed generation, non-traction consumers of railways, wind power plant, photovoltaic plant.

Introduction. As it is known, use of so-called distributed generation (DG) is one of the current tendencies to improve power supply systems making electricity more reliable and crushproof. It is considered that DG systems also reduce power losses during its transportation owing to closeness of sources to consumers. In this context, length of the main power lines and their number becomes less important. Moreover, accident consequences are less significant and mutual back-up of power generating capacities is provided.

As for the alternative energy use for the systems of the distributed electric power supply of railways, it is possible to single out following possibilities: supply of a traction power generation system by external mains within which renewable energy sources (RES), belonging to the railway, operate together with the traditional ones;

RES connection to traction transformer windings supplying directly non-traction consumers of railway mains; use of alternative energy in the amplifying points to intensify the traction network; connection of RES, located within the exclusion railway zones, directly to a catenary supplying both traction and non-traction consumers; and use of RES as a source for local supply systems of non-traction consumers with a possibility to supply them from traction network.

It should be noted, that use of one or another mentioned tendencies of RES implementation in railway mains is of chaotic and systemless nature. There is no substantiated idea which of them is the most expedient one. Unfortunately, the only thing is available, i.e. recommendations for RES connection to buses of traction substations formulated by [1]. The recommendations list the limiting factors determined by authors: capacities of the key reducing transformers of substations; commutation potential of switchers within the connection areas; the required relay protection as a part of the corresponding distributing devices of TS; and sensitivity level of the protection.

Literary review. Theoretical and practical aspects to design and implement DG systems are considered by many national and foreign scientists. A.V. Kyrylenko, A.V. Prakhovnyk, V.G. Sychenko, S.P. Denysiuk, A.V. Kriukov, Ye.I. Sokol, O.S. Yandulsky, V.O. Kostiuk, R. Caldon, S.Conti and many others contributed much to solve the problem [2-10].

As for the railway mains, Professor K.G. Markvardt initiated the distributed power supply systems for their traction loads in the mid part of the last century [11-12]. He formulated power supply principles for a catenary with the help of amplifying points connected to longitudinal high voltage transmission line of direct current or alternative current. Location of such amplifying points, operating on the principle of the distributed system, between operating substations injects the catenary with no increase in the basic aggregate power output.

Currently, numerous scientific sources are focused on the improvement of the distributed generation within the railway consumers of electric power. Such studies as [1, 13-15] concern RES integration into the systems of traction and non-traction electric power supply as amplifying points as well.

It is known [16, 17], that the indicators of the quality of electrical energy in the power supply systems of traction and non-traction consumers of railway transport do not comply with regulatory documents and standards that regulate the above indicators. Currently, this problem is present in the power supply networks of the railways of Ukraine [17] and in foreign countries [18-20].

For example [18, 19], in India, today an electric traction system is used based on drives of electric motors of DC locomotives and is powered from a network with a voltage level equal to 25 kV. The quality of electrical energy in the above networks is the main problem, since the latter is associated with very high power and high voltage of consumers. One of the ways to improve the power quality indicators is the use of wind power plants directly connected with the power supply system of railway locomotives.

The authors of the paper [20] propose to provide railway traffic safety installations, that must operate continuously and with nominal parameters, in order to reduce electricity consumption and increase the reliability of power supply, an alternative solution for their power supply, that provides for the supply of electricity from a photovoltaic system installed next to the box for household appliances. At the same time, the photovoltaic system, together with the existing power supply system, provides a redundant power source for consumers powered through the junction box.

The paper [21] is devoted to the study of the issues of improving the quality of electricity in traction power supply systems of trains by integrating renewable energy sources into existing power supply systems, namely, photovoltaic solar panels.

The paper [22] is devoted solving the problem of replacement of energy supply sources at the railroad transport, in particular the sources used to feed signaling, centralizing and interlocking (SIB) devices, that are non – traction consumers, from generators operating on DGA type diesel fuel, to renewable energy sources, to solar photovoltaics stations of small and medium capacity.

Despite the fact that the energy generated by RES is still too expensive, the world tendency is to increase the amount of implementation of such sources. That depends upon the environmental pollution by modern power industry and deficit of fossil fuel. Moreover, it stimulates their use in railway systems as well. It takes place even in spite of the impossibility to have governmental support in the form of the “green tariff”. The implementation may be illustrated by a pilot project of parallel operation of solar power plant and external power supply of 10 kV buses at a traction substation Sambir (Western Railway) [1].

The purpose of the work is to consider the possibility of developing generation capacity on the railway to provide energy to its own consumers through the introduction of mini power plants using a local renewable resources - wind energy and solar radiation.

It is the most profitable idea now to build own RES electric power stations connecting them to external mains which will then energize a railway. It is the only case when electric power, generated by RES, enters a power market and obtains all the “green tariff” advantages which make the implementation economically attractive. However, the abovementioned cannot solve any problem concerning the departmental mains. Thus, the example of the implemented pilot project in Sambir is still a sole one. Unfortunately, it is not very successful connection of solar power station.

Material and results of research

Analyzing electricity quality indices within the system of non-traction consumer supply inclusive of wind power plant (WPP) connected to it

A network, which wiring diagram is shown in Fig. 1., may exemplify tendency of RES use. In the context of the wiring diagram, three-winding transformer, which 27.5 kV traction winding is brought on the power supply system of electric propelled vehicles (EPVs), is connected to a common power line (PL) with $U=115$ kV. Another 6.3 kV winding of the transformer supplies non-traction consumers. Alternative RES-based source is connected to a distributing point (DP). Output voltage of the source corresponds to 6 kV voltage of departmental PL.

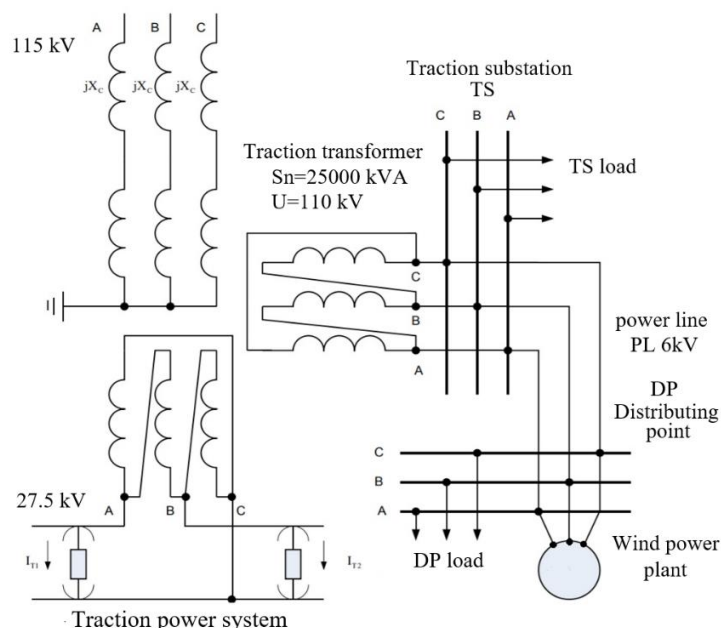


Figure 1 – Supply system for traction and non-traction consumers by electric mains to which WPPs are connected

To analyze a possibility of electric power quality improvement within the considered supply network for non-traction consumers, its model, which wiring diagram is represented in Fig. 2 (general model), is applied for the required experiments. Figure 3a) shows the elements of Subsystem 1, 3; figure 3b) shows the elements of Subsystem 2; figure 4 shows the elements of Subsystem 4. The modeling was performed within MatLab environment using Simulink software package.

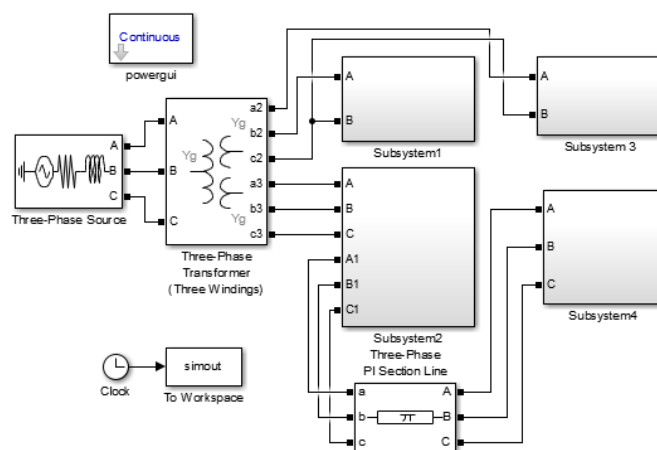


Figure 2 – General model of railway mains where RES is connected to transformer substation (TS) wiring of non-traction consumers

The analysis involved 115 kV power supply and a transformer, corresponding to characteristics of traction transformer $S_n=25000$ kVA. The transformer voltage is 115/27.5/6.6 kV. Two electric locomotives are connected to a traction winding of the transformer. Total current of each locomotive is 300 A; reactive power factor is $\text{tg}\varphi=1$.

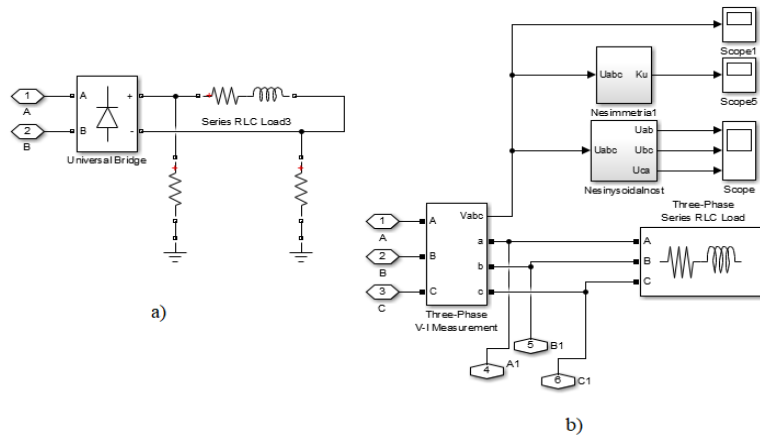


Figure 3 – Models of Subsystems: a) Subsystem 1, 3; b) Subsystem 2

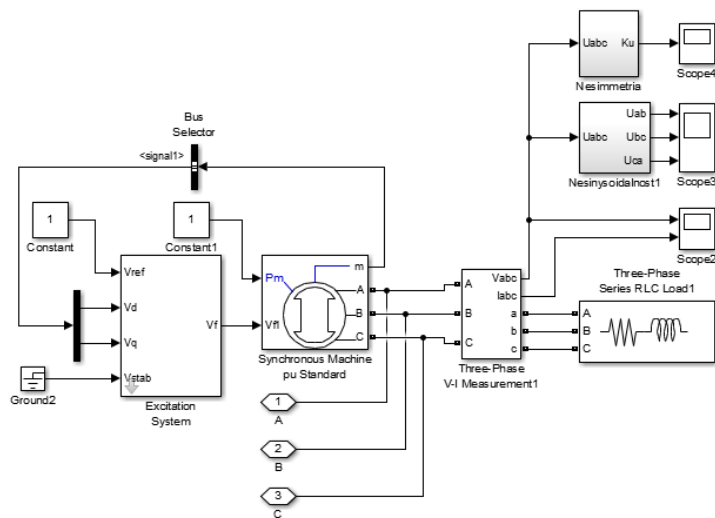


Figure 4 – Model of Subsystem 4

Additional source, simulating WPP operation, is connected to 6 kV distributing point supplying power to consumers not belonging to railway. Its nominal output and $\cos\phi$ of the latter may vary gradually in the process of the experiment from zero value (the source disconnection from the mains) up to 4000 kW power and $\cos\phi=1$. Synchronous generator model in Simulink turned out to be the most adequate. Total output of all consumers, supplied by 6.6 kV winding, was 8 MW. 6 kV PL has 6 km length and following parameters:

$$R_0 = 0.2590 \text{ Ohm / km ;}$$

$x_0 = 0.4 \text{ Ohm / km}$ which corresponds to AC-120/19 wire.

As an example, Fig. 5 demonstrates the obtained oscillogram of linear BC voltage on DP buses when WPP is disconnected from the mains. The calculated values of inharmonicity and asymmetry coefficients, in terms of a negative sequence and voltage deviations, corresponding to it, are

$$R_{non-sinusoidal} = 13.1\% ;$$

$$R_{asymmetric} = 15.8\% ; \text{ and } \Delta U = 8\%$$

respectively. As it has been predicted, the quality values exceed significantly the acceptable values.

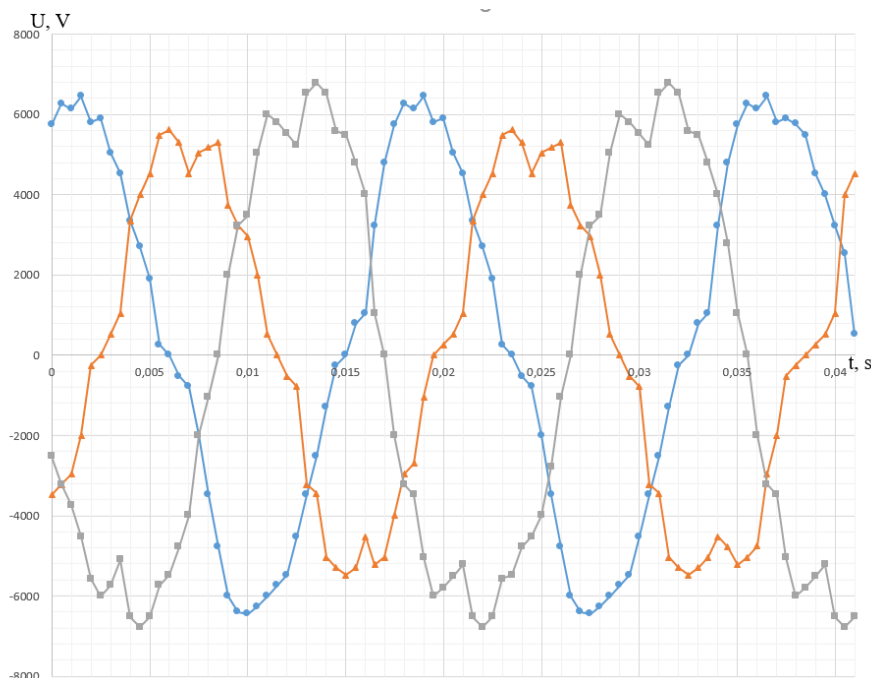


Figure 5 – Voltage oscillogram on DP buses when WPP is disconnected

Fig. 6 shows the obtained range of the mentioned linear voltage as well as its temporal changes. As it is understood, the range involves dozens of harmonics with rather large amplitudes. However, that is unacceptable for non-traction supply power grids.

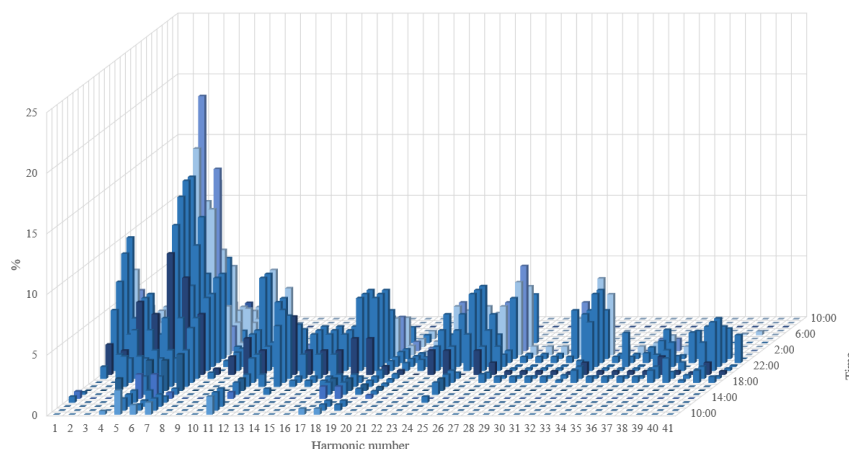


Figure 6 – Range of linear BC voltage on DP buses before WPP connection

If WPP is connected to the mains in terms of the coupling then the indices experience their gradual improvement along with increase in the renewable source voltage. When voltage was 4000 kW, their values were 6.02%; 3%; and 3.8% respectively. Fig. 7 explains the changes in linear BC voltage.

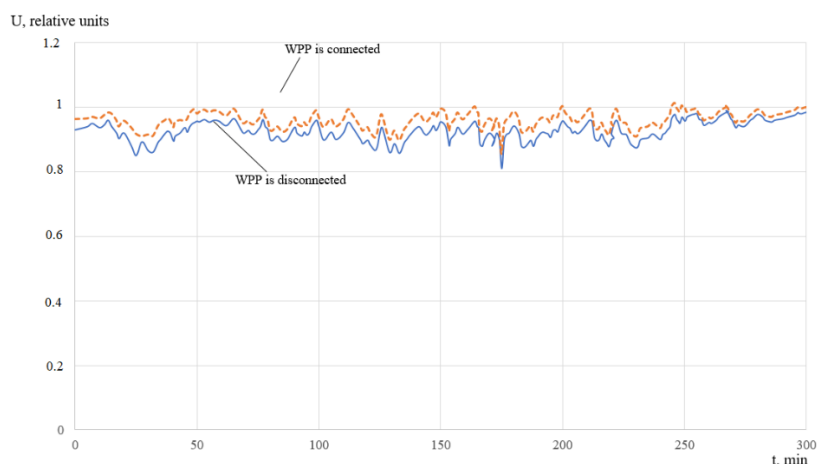


Figure 7 – Variations in linear BC voltage during a locomotive travel when

WPP is connected and disconnected- Figures 8, 9, and 10 demonstrate dependences of the coefficient and deviations of linear voltage from the output of the connected renewable source. The dependences result from the experiments. They mean that such WPP implementation in the railway mains can improve significantly the electricity quality within a supply network of their non-traction consumers as well as non-departmental ones. Nevertheless, approximation of the quality indices to acceptable values is only possible when output of the additional source is not less than a nominal value of total load of all the consumers connected to 6.6

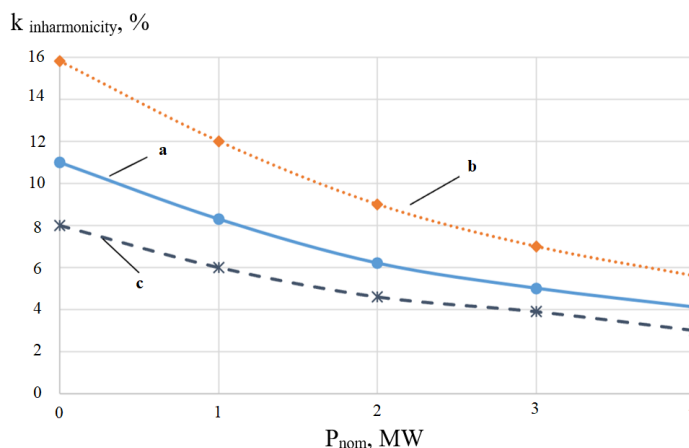


Figure 8 – Dependence of the inharmonicity coefficient of linear voltage within DP upon WPP output: a) AB; b) BC; and c) CA

kV winding. As it has been already mentioned, the latter was 8 MW in terms of the simulated case.

As for the influence of a power factor ($\cos\phi$) of additional source on the electricity quality indices, it has been found that if it varies within 0.5-1.0 then their value deviation is not more than 1.5%. Thus, it may be assumed that in terms of such a diagram of WPP connection, the parameter will not influence the electricity quality within the mains.

Ultimately, if one pays attention to variations in output of wind power plants, which can be constructed in south-eastern Ukraine, it becomes understood that the efficient system is required to accumulate electric energy generated by them during a day and to balance the capacity in terms of seasons. The system should combine adequately different types of plants with their number and type optimization according to the mentioned alternative of WPP use for a railway and guarantee electricity quality within the supply sources for its non-traction as well as non-departmental ones.

Determining features of influence of photovoltaic plants (PVPs), connected to supply systems of non-traction consumers, on electricity quality within the latter

Several different diagrams are available to couple power circuits and transformers within TS. Traditionally, a diagram with double transformation is applied. Other cases apply a single transformation diagram, when consumers are supplied through a traction transformer which primary winding is connected directly to the general mains, i.e. with no extra transformation.

From the viewpoint of photovoltaic plants (PVP) connection to the mains, the two mentioned cases (exclusive of traction DC power grids) use an inverter transforming electric energy from solar batteries or accumulators into AC being acceptable for supply systems of non-traction consumers. Thus, to analyze PVP influence on the electricity quality within the mentioned system, it is quite sufficient to use e-analogue of railway mains while replacing its generator model by inverter model.

General nature of additional power source parameter influence on inharmonicity and asymmetry coefficients in terms of the reverse voltage sequence and voltage variation in the case of PVP use remains almost invariable. Approximation of the quality indices to the allowable values is only possible if PVP output is not less than 35-40% of the value of the total load of non-traction consumers. As for the voltage range, the case has demonstrated certain specific features.

Fig. 11 shows the obtained ranges of linear voltage on DP buses when PVP is connected to it in accordance with the stated diagram. In comparison with the corresponding range before the additional source connection (Fig. 6), electricity quality demonstrates its significant improvement both in terms of harmonic composition and in terms of harmonics left. However, attention should be paid to the fact that 3rd and 5th harmonics are singled out which was not demonstrated while WPP connecting. Even if PVP output is 3000 MW (i.e. 37% of the considered load of non-traction consumers), their coefficients are 4 and 5.5% respectively despite the fact that the allowable indices are 3 and 4%.

Taking into consideration the information from [24], it has been assumed that within the voltage range, 3rd and 5th harmonics are stipulated by operation of the used inverters. To support the idea, voltage range has been obtained at the output Fronius inverter (Austria) connected to the experimental solar power plant (Fig.12). The inverters are meant to operate as a part of the photovoltaic systems. The facilities are rather popular now.

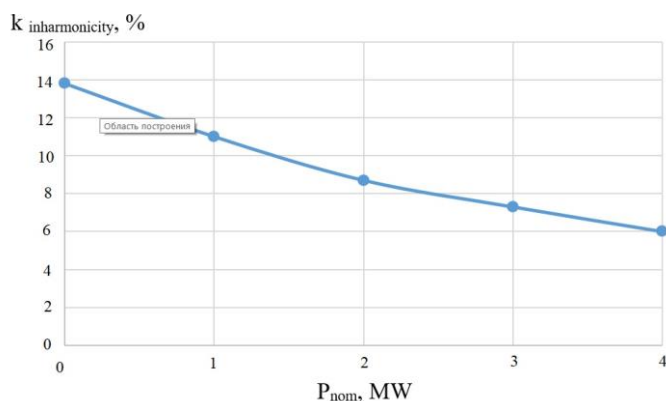


Figure 9 – Dependence of the voltage asymmetry coefficient in terms of the negative phase sequence within DP upon WPP output
Voltage (relative units)

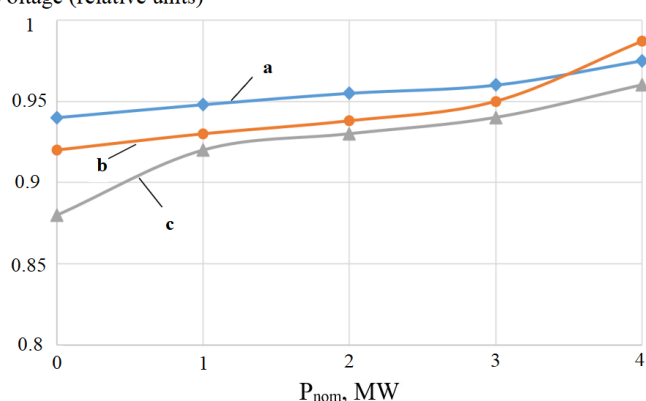
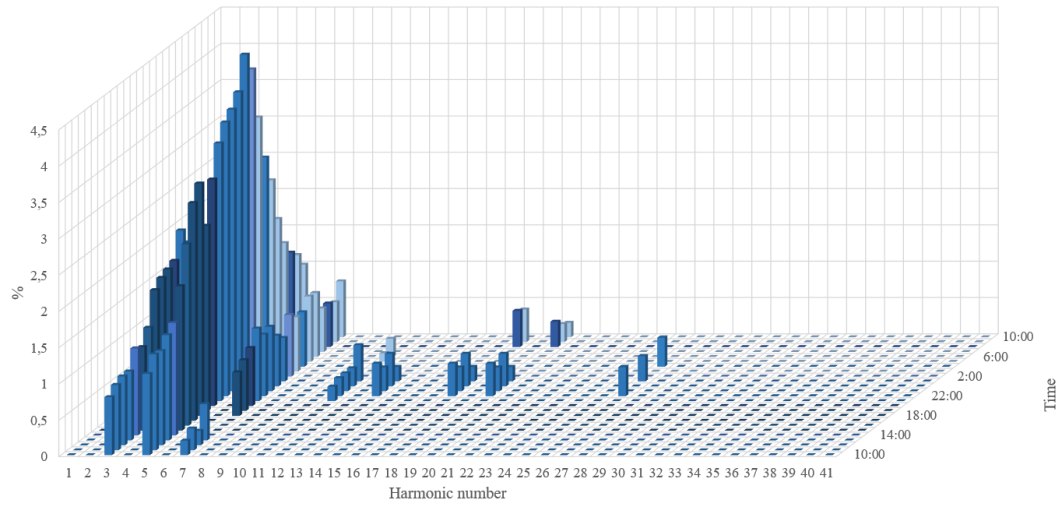
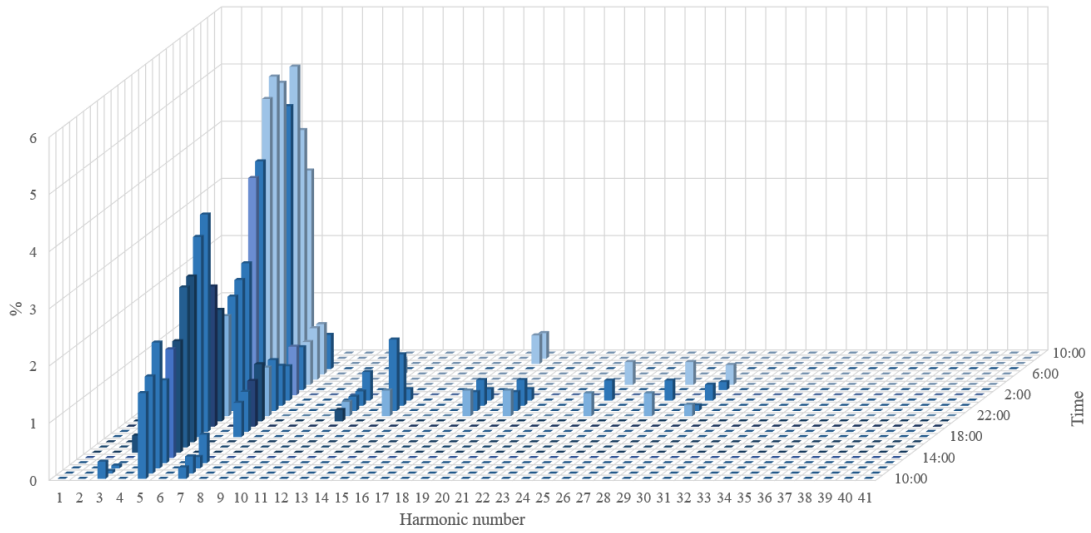


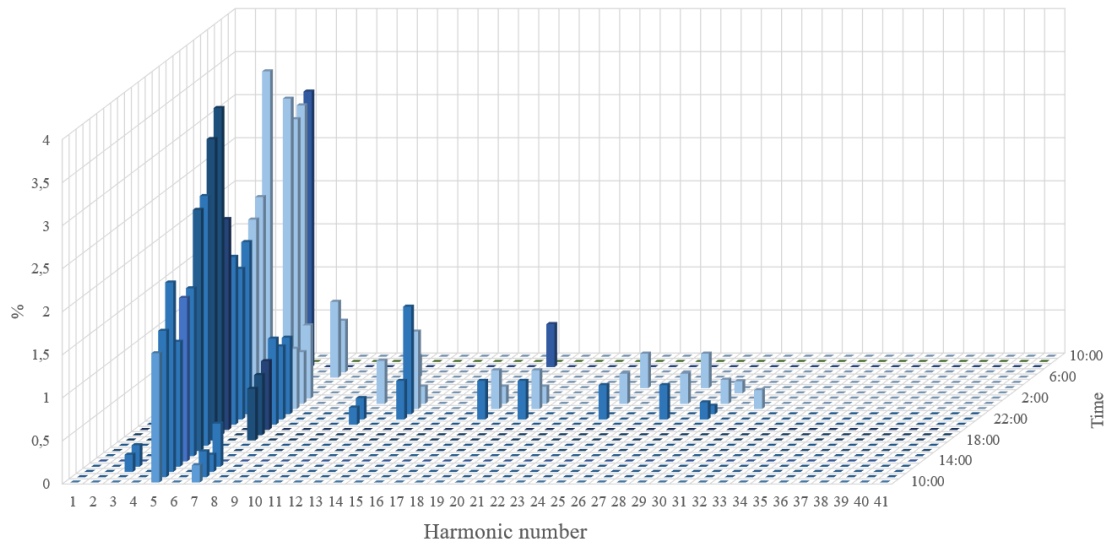
Figure 10 – Dependence of the linear voltage deviation within the WPP area connection upon the output of the latter:
a) AB; b) BC; and c) CA



a)



b)



c)Figure 11 – Linear voltage ranges on DP buses of the supply system for non-traction consumers when PVPs are connected to them: a) AB; b) BC; and c) CA

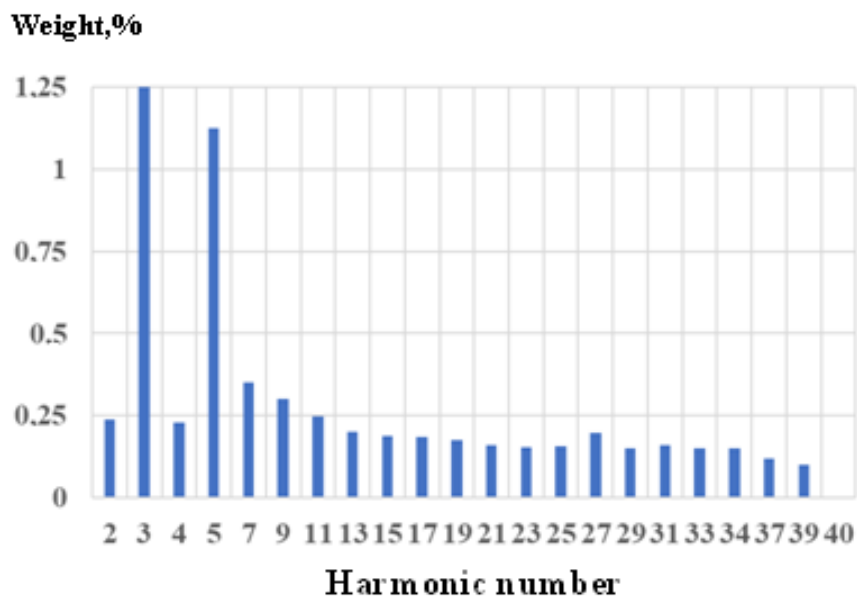


Figure 12 – Weight composition of harmonics as a part of voltage range at the output of Fronius inverter

It turns out that to compare with the electromechanical converters when WPP are applied, PVP connection through inverters is undesirable procedure since it needs additional use of filters for the frequencies. The most expedient idea is to connect PVP directly to DC traction power grid or find out other ways to connect them to supply system of non-traction consumers omitting inverters. The matter is that railways have both necessary and large alienated territories. Hence, they can be used to place such distributed sources.

A system with connection of the distributed solar generators, proposed by [15], may exemplify the mentioned PVP use. Fig. 13 demonstrates its diagram where solar panels are interconnected series parallel in photovoltaic modules (PVMs) located along the rail at the alienated territories. Each PVM is connected to an adapting converter (AC) separating it galvanically from further supply system part. Output DC voltage of each AC is not more than 50 V corresponding to the electrical safety conditions.

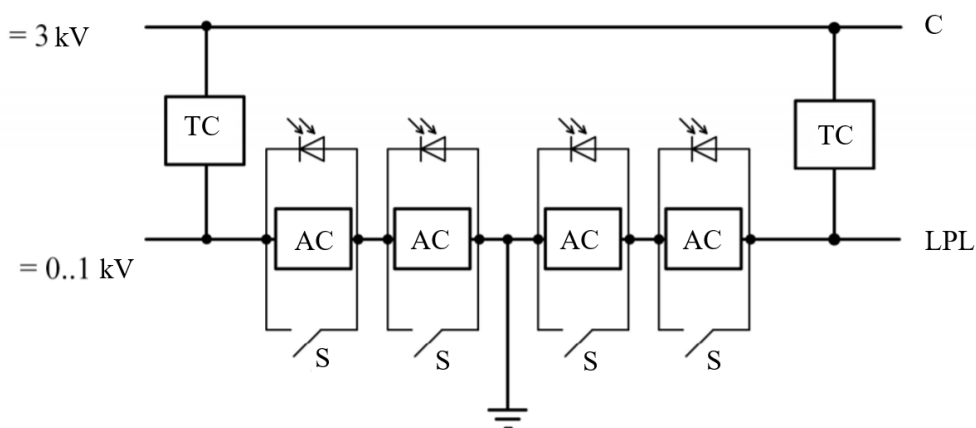


Figure 13 – Diagram of PVP connection to DC railway catenary

In parallel with the catenary, single-wire longitudinal power line (LPL) is installed using either the catenary supports or separately at the alienated territory. The PLP connects separate photovoltaic modules into one point-to-point circuit. The latter consists of sections with 1 kV output voltage; each of them is connected to the catenary through a transient converter. The rail itself may be used as a ground wire for LPL.

Switches (Ss), shunting each photovoltaic module, prevent from the emergency mode if breakdown takes place. In terms of serial connection, the circuit results in the integrating system failure. Hence, in terms of the case, the damaged module is shunted with the help of the switch, and other part of the system continues its operation although its output voltage decreases.

Fig. 14 explains a diagram of a shunting switch. If a photovoltaic module circuit is disconnected then voltage U_m increases up to a breakdown stabilizer value VD_c , and i_y current opens VS four-layer switch while passing within its control electrode circuit.

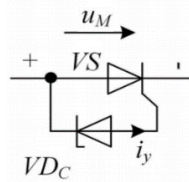


Figure 14 – Diagram of a shunting switch

Transient converter is connected to LPL section. It consists of input filter (two Ca condensers and primary winding of bushing transformer (BT); voltage inverter (VI), rectifier (R), and output LC-filter (Fig. 15). Output TC clamps are connected right to a catenary with 3 kV voltage.

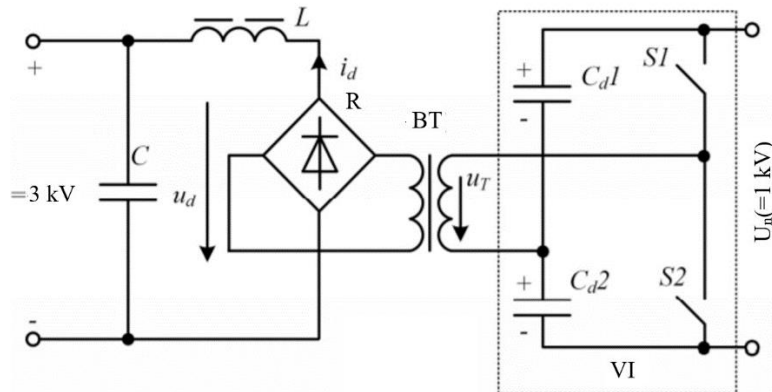


Figure 15 – Diagram of transient converter to supply a DC catenary using PVPs

The converter is a traditional forward TC used to energize electronic equipment [25]. The both considered examples (i.e. TC and AC) are small enough to be installed right on catenary supports.

Actually, the considered case of PVP connection to railway mains involves no accumulator for the energy generated by it. The fact predicts possibilities of simultaneous use of wind power plants as well which would help stabilize the electricity generation amounts. Taking into consideration the fact that first ones have DC output voltage and last ones have AC output voltage, they can be integrated into one system of non-traction consumer supply system while applying some specific power grid with the combined use of different energy accumulators.

Conclusions

Implementation of possible tendencies to apply RES for railway electric power supply systems is of chaotic and systemless nature. No substantiated idea is available as for the most expedient alternative.

Development of proper electric power stations with RES and their connection to external mains, energizing the railway subsequently, is the most advantageous. However, it cannot solve any problem concerning the departmental mains.

RES introduction into railway electric supply systems by means of connection to 6 kV DPs, energizing non-traction consumers and non-departmental ones and being connected to traction 115/27.5/6.5 kV transformer improves significantly electricity quality within the mains of the mentioned load. Nevertheless, negative sequence coefficients of voltage inharmonicity and asymmetry as well as voltage deviations to the allowable values is possible if only the source output is not less than 35% of the output of the mentioned loads.

Taking into consideration the fact that use of inverters to connect PVPs to the mains results in extra voltage distortions (especially, that concerns 3rd and 5th harmonics), it is the most practical idea to connect solar power plants directly to DC traction power supply system; if not, it is necessary to identify other ways to connect them to supply systems of non-traction consumers.

Taking into consideration the fact that PVPs have direct output voltage and WPPs have alternative one, they should be integrated in one supply system for non-traction consumers by means of combination of various energy accumulators.

References

1. Sychenko, V.G. Integration of solar energy into a system of DC traction electric power supply// Messenger of the NTU "KhPI", 2015, № 12 (1121), Pp. 364-368.
2. Sychenko, V.G., Bosyi, D.A., Kosariev, Ye.M. Improving the methods to calculate the distributed system of traction electric power supply with amplifying points/ Energy-saving, power, energy audit, № 9, V.2, 2014, Pp. 8-18.

3. Denysiuk, S.P. Evaluating efficiency of the combined operation of the distributed sources of electric power generation, inclusive of renewable ones, in the context of electric power systems / S. P. Denysiuk, T. M. Baziuk, D. G. Derevianko // Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University - 2013. – Publication . 3. - Pp. 54-59.
4. Sychenko, V. G. Solar energy integration into a traction DC electric power supply system // Messenger of the NTU “KhPI”. Series: Automation and engineering – 2015. – №12 (1121). – Pp. 364–368.
5. Kyrylenko, O.V. Engineering aspects to implement distributed generation sources in the context of the mains / O.V. Kyrylenko, V.V. Pavlovskiy, L.M. Lukianenko // Technical electrodynamics. — 2011. — № 1. — Pp. 46-53.
6. Kostiuk, V. O. Applied tasks to use hybrid models for optimization of local electric power supply systems with proper generation / V. O. Kostiuk, T. M. Baziuk // Power industry: economy, technologies, ecology. - 2016. - № 3. - Pp. 51-60.
7. Prakhovnyk, A. V. Efficient use of power resources and energy flow concentration of low-potential sources / A. V. Prakhovnyk, T. M. Baziuk // Power industry: economy, technologies, ecology. - 2013. - № 1. - Pp. 41-49.
8. Kriukov, A.V., Zakariukin, V.P., Arsentiev, M.O. Use of the distributed generation methods for electric power supply of non-traction railway consumers // Messenger of Irkutsk State Technical University. – 2009, № 1 (37). – Pp. 190-195.
9. Arsentiev, M.O. Improving electricity quality within electric power supply systems of non-traction consumers relying upon the distributed generation facilities / M.O. Arsentiev, A.V. Kriukov // High technologies, system analysis, modeling. – 2010, № 3(27). – Pp.169-175.
10. Kyrylenko, O.V., Trach, I.V. Technical features of electric power supply system functioning in terms of integration of the distributed generation sources / O.V. Kyrylenko, I.V. Trach // Scientific papers of NASU Institute of Electrodynamics: Collection of scientific papers — K.: NASU IED, 2009. — Publication 24. — Pp. 3-6.
11. Markvardt, K.G. Power supply of the electrified railways. – M.: Transport, 1982. – 528 pp.
12. Markvardt, K.G. Power supply of electric railways [Energosnabzhenie elektricheskikh zheleznnykh dorog], Transzheldorizdat, Moscow, 1959. 288 pp.
13. Sychenko, V.G. Electric power quality on 10 kV buses in terms of *traction substation-solar power plant* parallel operation // Sychenko, V.H., Kosariyev, Ye.M., Pulin, M.M. / Electrification of transport, № 13, 2017, Pp. 71-77.
14. Sychenko, V.G., Bondar, O.I., Prykhoda, M.S. analysis of solar generation influence on the operation of traction substations of the electrified railways [E-resource]. <http://journals.urau.ua/index.php/2079-424X/article/view/94793>
15. Goncharov, Yu. P. System to transform energy generated by solar panels along the right-of-way / Yu. P. Goncharov, Ye. I. Sokol, V. V. et al. // Messenger of Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical sciences. - 2015. – Publication 30(2). - Pp. 98-108.
16. V. G. Sychenko, O. I. Bondar, A. V. Mishchenko, V. V. Kuznetsov, A. P. Cordin Estimation of energy efficiency of lines of longitudinal electrical supply of railways with increasing voltage in the network. Electrification of transport, № 14. – 2017 pp. 99-105.
17. Kuznetsov V, Tryputen N, Kuznetsova Y. (2019). Evaluating the Effect of Electric Power Quality upon the Efficiency of Electric Power Consumption. In 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, 556–61. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109 / UKRCON.2019.8879841.
18. S. K. Bade and V. A. Kulkarni, "Analysis of Railway Traction Power System Using Renewable Energy: A Review," 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, 2018, pp. 404-408, doi: 10.1109/ICCPEIC.2018.8525206.
19. S. K. Bade and V. Kulkarni, "Use of Renewable energy in performance enhancement of Indian Traction Power Supply System," 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSSEDPS), Nagpur, 2018, pp. 111-116, doi: 10.1109/ICSSEDPS.2018.8536056.
20. S. Elisabeta, P. Bogdan, P. Ion, N. Valentin and P. Florina, "Use of Renewable Energy Sources to Power Railroad Traffic Safety Installations," 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ATEE.2019.8724999.
21. M. Rageh, A. Ndtoungou, A. Hamadi and K. Al-Haddad, "Railway Traction Supply with PV integration for Power Quality Issues," IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, 2018, pp. 1436-1441, doi: 10.1109/IECON.2018.8591768.
22. O. V. Kravchenko, D. Faleev and I. A. Korostelyova, "Peculiarities of Application of Helioenergetics for Signaling, Interlocking and Blocking Devices at the Railroad Transport," 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/EastConf.2019.8725360.
23. DSTU 3466-96 Electricity quality. Terms and definitions. Kyiv, 1998. 22 pp.
24. Zhuikov, V.Ya., Denysiuk, S.P. Power processes in electric circles with the key elements. – Kyiv. Publishing House TEKST, 2010. – 264 pp.
25. Brown, M. Power sources. Calculation and design. – K.: MK-Press, 2005. - 279 pp.

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто доцільні схеми підключення відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) до залізничних електромереж. На сьогодні впровадження розподіленої генерації (РГ) на основі ВДЕ у залізничні електромережі є **актуальним питанням**. Незважаючи на те, що науково-практичні аспекти розробки і впровадження РГ систем досліджуються багатьма вітчизняними і зарубіжними вченими, досі не існує обґрунтованої думки щодо найбільш доцільного використання того чи іншого напрямку впровадження ВДЕ в системи електропостачання залізниць. Є лише рекомендації щодо приєднання ВДЕ до шин тягових

підстанцій. Зараз вигідно створювати власні електростанції з ВДЕ, підключаючи їх до зовнішніх мереж, від яких лише потім отримує живлення залізниця. **Мета роботи** полягає у покращенні якості електроенергії в мережах живлення нетягових споживачів залізниць шляхом підключення до них відновлювальних джерел енергії. **Методика дослідження** ґрунтується на сучасних методах обчислювальної математики, статистики та аналізу інформації з використанням сучасних комп'ютерних технологій. **Результати дослідження.** У роботі розроблено схему живлення тягових і нетягових споживачів від залізничної електромережі, до якої підключені ВДЕ, та модель залізничної електромережі з підключенням ВДЕ до обмотки трансформаторної підстанції (ТП) нетягових споживачів. Впровадження вітроенергетичної установки (ВЕУ) в систему електропостачання залізниць за наведеною схемою може дійсно суттєво покращити якість електроенергії в мережі живлення їх нетягових і невідомчих споживачів. Але наближення показників цієї якості до допустимих значень настає лише тоді, коли потужність додаткового джерела дорівнює не менш ніж 35% від номінальної величини загального навантаження всіх підключених до обмотки 6,6 кВ споживачів. Розглянуто приклад підключення фотоенергетичної установки (ФЕУ) до залізничної мережі, який здійснюється без використання будь-якого накопичувача згенерованої ними енергії. Впровадження можливих напрямків використання ВДЕ в системах електропостачання залізниць відбувається хаотично й безсистемно, і поки що не існує обґрунтованого бачення щодо найбільш доцільного варіанту. **Наукова новизна** полягає у впровадженні відновлюваних джерел енергії в систему електропостачання нетягових споживачів залізничного транспорту. **Практичне значення.** Використання додаткових відновлюваних джерел енергії для живлення нетягових споживачів призводить до мінімізації витрат електроенергії.

Ключові слова: відновлюючи джерела енергії, розподілена генерація, нетягові споживачі залізниць, вітроенергетична установка, фотоенергетична установка.

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены целесообразные схемы подключения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в железнодорожных электросетях. На сегодняшний день внедрение распределенной генерации (РГ) на основе ВИЭ в железнодорожные электросети является **актуальным вопросом**. Несмотря на то, что научно-практические аспекты разработки и внедрения РГ систем исследуются многими отечественными и зарубежными учеными, до сих пор не существует обоснованного мнения по наиболее целесообразному использованию того или иного направления внедрения ВИЭ в системы электроснабжения железных дорог. Есть только рекомендации о присоединении ВИЭ к шинам тяговых подстанций. Сейчас выгодно создавать собственные электростанции с ВИЭ, подключая их к внешним сетям, от которых только потом получает питание железная дорога. **Цель работы** заключается в улучшении качества электроэнергии в сетях питания нетяговых потребителей железных дорог путем подключения к ним возобновляемых источников энергии. **Методика исследования** основывается на современных методах вычислительной математики, статистики и анализа информации с использованием современных компьютерных технологий. **Результаты исследования.** В работе разработана схема питания тяговых и нетяговых потребителей от железнодорожной электросети, к которой подключены ВИЭ, и модель железнодорожной электросети с подключением ВИЭ к обмотке трансформаторной подстанции (ТП) нетяговых потребителей. Внедрение ветроэнергетической установки (ВЕУ) в систему электроснабжения железных дорог по приведенной схеме может действительно существенно улучшить качество электроэнергии в сети питания их нетяговых и неведомственных потребителей. Но приближение показателей этого качества до допустимых значений наступает только тогда, когда мощность дополнительного источника равна не менее 35% от номинальной величины общей нагрузки всех подключенных к обмотке 6,6 кВ потребителей. Рассмотрен пример подключения фотоэнергетической установки (ФЭУ) к железнодорожной сети, осуществляется без использования каких-либо накопителей сгенерированной ими энергии. Внедрение возможных направлений использования ВИЭ в системах электроснабжения железных дорог происходит хаотично и бессистемно, и пока не существует обоснованного видения наиболее целесообразного варианта. **Научная новизна** заключается во внедрении возобновляемых источников энергии в систему электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. **Практическое значение.** Использование дополнительных возобновляемых источников энергии для питания нетяговых потребителей приводит к минимизации затрат электроэнергии.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, распределенная генерация, нетяговые потребители железных дорог, ветроэнергетическая установка, фотоэнергетическая установка.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доцентом Колбом А.А.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З РІЗНИМ ХАРАКТЕРОМ НАВАНТАЖЕННЯ

С.Г. Павлюс¹, В.П. Іващенко², І.І. Папанова¹, В.І. Соборницький³, Г. А. Папанов⁴, Д.В. Ципленков⁵, А.А. Колб⁵, Д.В. Галушко⁶, М.А. Лобко⁶, Д.О. Чернишов⁶, О.О. Ровенський⁵

¹ Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-6654-2529

² Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,

³ Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9329-5738

⁴ Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

⁵ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
tsyplenkov.d.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-0585-5908

⁶ Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна,

EFFICIENCY OF INDUSTRIAL ELECTRICITY CONSUMPTION SYSTEMS WITH DIFFERENT NATURE OF LOAD

S.G. Pavlyus¹, V.P. Ivashchenko², I.I. Papanova¹, V.I. Sobornytskyi³, G.A. Papanov⁴, D.V. Tsyplenkov⁵, A.A. Kolb⁵, D.V. Galushko⁶, M.A. Lobko⁶, D.O. Chernyshov⁶, O.O. Rovenskiy⁵

¹ Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-6654-2529

² National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,

³ Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9329-5738

⁴ National University of Railway Transport Academician V. Lazaryan, Dnipro

⁵ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
tsyplenkov.d.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-0585-5908

⁶ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
kolb.a.a@nmu.one, ORCID 0000-0002-4016-606X

⁷ Dnipro National University named after O. Honchara, Dnipro, Ukraine,

Мета. Підвищення коефіцієнта потужності систем споживання енергії та аналіз їх ефективності в залежності від характеру навантаження.

Методика дослідження полягає у аналізі показників якості електричної енергії споживачів з різним характером навантаження.

Результати дослідження. Досліджено параметри технологічних систем живлення та споживання з лінійним і нелінійним характером навантаження. Показано що явище генерації суттєво впливає на вартість та якість електричної енергії. Встановлено, що для підвищення ефективності енергосистем необхідний індивідуальний підхід до вибору системи компенсування реактивної енергії. Показано, що для лінійних симетричних споживачів ефективними являються типові компенсуючі пристрої.

Наукова новизна. Встановлено залежності показників якості електричної енергії від характеру споживачів.

Практичне значення. Розроблено рекомендації щодо підвищення коефіцієнта потужності в системах електроспоживання при умові мінімальної генерації реактивної енергії. Розроблено рекомендації щодо компенсації реактивної енергії в лінійних несиметричних системах, для чого запропоновано застосування компенсаторів з індивідуальним регулюванням за робочими фазами.

Ключові слова: генерація, електроенергія, коефіцієнт потужності, компенсація, навантаження, потужність, споживач.

Актуальність

На стадії експлуатації діючої енергетичної системи важливе значення мають заходи по підвищенню її економічної ефективності за рахунок покращення показників якості енергії, які в нашій країні регламентуються ГОСТом 13109-97. Відомо, що ефективність електричної системи споживання залежить від багатьох показників, таких як коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми напруги (струму), несиметрія напруги, коефіцієнт форми кривих та ін. Для їх покращення фахові підприємства випускають компенсуючі пристрої реактивної енергії. Але, в ряді випадків

після їх встановлення енергетичні показники якості не досягають очікуваних значень, що пов'язано із зростанням генерації реактивної енергії, ціна за яку суттєво перевищує вартість реактивної енергії. В більшості країн світу при проектуванні систем компенсації цей факт не враховується.

В цьому аспекті актуальною стає необхідність дослідження залежності параметрів якості енергетичних систем від індивідуальних характеристик самої системи навантаження.

Сучасний стан проблеми підвищення ефективності енергосистем

Існуючі розробки з мінімізації втрат потужності здебільшого розглядають питання зменшення величини реактивної енергії у складі повної енергії за рахунок використання компенсаційних пристроїв [1, 2]. Однак вони ефективно працюють лише в лінійних системах споживання при симетричному навантаженні. В усіх інших випадках їх використання не дає бажаного результату.

У переважній більшості споживачі на підприємствах мають несиметричний характер, крім того, у багатьох випадках вони нелінійні (наприклад, частотні перетворювачі і тому подібне). Розвиток сучасної напівпровідникової техніки приводить до збільшення реактивної потужності яка погіршує синусоїдну форму кривої струму. Реальний струм таких споживачів представляє собою ряд синусоїдних складових струму з числа вищих гармонік 3,5,7,11 порядків. Такі споживачі являються нелінійними та несиметричними. Для несиметричних нелінійних споживачів традиційні системи компенсування реактивної енергії не є ефективними з таких причин:

- значно збільшується швидкість росту генерації реактивної енергії.
- мережі змінного струму захаарчуються вищими гармоніками, які в свою чергу негативно впливають на термін служби конденсаторів, збільшується ризик передчасного спрацьовування захисної комутаційної апаратури систем електропостачання, передчасний вихід з ладу споживачів, негативний вплив на систему споживання в тому числі за рахунок можливих резонансних явищ [1, 3].

Компенсувальні пристрої з незалежним регулюванням за окремими фазами [3] ефективно працюють лише в лінійних несиметричних системах.

Реактивна потужність при нелінійних навантаженнях функціонально залежить від величини спотворення кривих струмів і напруг. Це явище вимагає вирішення проблеми компенсації реактивної потужності з урахуванням особливостей несинусоїдних режимів. Крім цього, рівень реактивної потужності впливає на величину напруги. Відсутність єдиного підходу до визначення реактивної потужності робить актуальною розробку теорії реактивної потужності при несинусоїдних режимах. Остання базується на сутності фізичних процесів, що протікають в електричних колах з нелінійними елементами. Авторами [4] детально вивчені фізичні явища, що протікають в одно- і багатофазних системах з R,L,C контурами та коммутаторами. Виведені теоретичні співвідношення для резонансного режиму, без реактивного режиму та режиму накопичення енергії в реактивних елементах.

Для отримання заданих показників якості електроенергії необхідно проводити дослідження конкретного споживача з метою вивчення його середньо-статистичних параметрів, що дає можливість сформулювати вимоги до розробки ефективного компенсуючого пристрою з урахуванням характеру навантаження саме даного споживача.

Мета і постановка задачі

Мета роботи – підвищення коефіцієнта потужності систем споживання енергії та аналіз їх ефективності в залежності від характеру навантаження.

Для виконання поставленої мети необхідно було виконати наступні задачі:

- дослідити залежність показників якості електричної енергії від характеру споживачів;
- розробити рекомендації щодо підвищення коефіцієнта потужності в системах електроспоживання при умові мінімальної генерації реактивної енергії.

Характеристика об'єкта дослідження

В якості об'єктів дослідження обрали 5 реальних підприємств з розрахунковою номінальною потужністю від 50 до 100 кВт та різним характером навантаження.

Перший споживач характеризувався дуже близьким до симетричного активно-індуктивним навантаженням. В основному працювали трифазні симетричні асинхронні комплекси. Для компенсації реактивної потужності використовували традиційну промислову конденсаторну установку. В результаті коефіцієнт потужності мав значення близьке до одиниці, генерація була нехтовно мала [1, 3].

Всі інші дослідні підприємства характеризувались несиметричним навантаженням.

Дослідне підприємство № 2 - вищий навчальний заклад - досягло ефективних показників при використанні компенсувального пристрою з усередненим регулюванням.

На підприємствах № 3, 4 характер навантаження був несиметричний, але лінійний. Досліди показали, що звичайні симетричні пристрої на цих підприємствах забезпечують відносно високий коефіцієнт потужності ($\cos \varphi \approx 0,85$) та мінімальну генерацію тільки при роботі установок в режимі недокомпенсації.

Коефіцієнт потужності цих підприємств суттєво менший за одиницю. Подібну систему компенсації можна використовувати тільки якщо $\text{tg}\varphi < 0,25$. Для подальшого підвищення коефіцієнта потужності слід використовувати компенсувальні пристрої з регулюванням за окремими фазами.

Недосконалість існуючої трифазної системи компенсації полягає в тому, що для несиметричних споживачів використовують симетричні ступені конденсаторних секцій. Це приводить до недо- (перекомпенсації) окремих фаз, і, як наслідок, до збільшення генерації. Для уникнення цієї проблеми існують два шляхи. Можна зменшувати ємність конденсаторів кожної секції, але це веде до економічно не вигідного збільшення ціни самого пристрою. Другий шлях, більш ефективний, полягає у використанні пристроїв із окремим регулюванням за всіма робочими фазами. Порівнювальний аналіз показників наведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати дослідження показників якості на підприємствах з несиметричним навантаженням

Підприємства	Традиційне регулювання			Регулювання за трьома фазами		
	tgφ	Генерація, %	cosφ	tgφ	Генерація, %	cosφ
№3	0,25	10	0,85	0,1	1	0,99
№4	4	12	0,72	0,15	1,5	0,97

Споживач № 5 мав явно виражене несиметричне та нелінійне навантаження. Одночасно були присутні активно - індуктивні та активно - ємнісні приймачі. У зв'язку з нелінійністю ємнісна складова не могла ефективно компенсувати індуктивну складову. Використання типових компенсуючих пристроїв приводило лише до незначного компенсування індуктивної енергії та суттєвого збільшення генерації.

Проаналізуємо роботу цього споживача. Вхідні напруги в режимі холостого ходу були симетричними. Лінійна напруга дорівнювала 380 В, частота мережі 50 Гц. До вводу в експлуатацію нелінійного споживача характер навантаження був активно індуктивний. На цей момент активна енергія складала 20900 кВт·год, реактивна 1630 кВАр·год, генерація 0. При вмиканні навантаження параметри цієї системи дещо змінилися (таблиця 2).

Через 20 годин після вводу в експлуатацію активна енергія склала 47098 кВт·год (зросла на 28 кВт·год), а реактивна енергія виросла на 15 кВАр·год. При цьому генерація збільшилась до 66 кВАр·год. Швидкість росту генерації значно перевищила швидкість зміни реактивної енергії, чого не помічалося у випадках експлуатації лінійних споживачів. Тангенс кута зсуву фаз в рази перевищив допустиме значення.

При такому співвідношенні параметрів системи навантаження у лінійних споживачах індуктивна складова була би повністю скомпенсована. У випадку нелінійних споживачів реактивна енергія зменшилась всього на 40 відсотків. Таким чином, розглянута раніше система компенсації реактивної енергії не може працювати ефективно. З метою вибору ефективного шляху компенсування реактивної складової необхідно провести більш детальний аналіз нелінійної системи.

Аналіз параметрів нелінійного споживача

Для виконання дослідів користувалися запам'ятовуючим цифровим осцилографом С9-8 та електронним аналізатором якості електричної енергії POWER Q Plus. Були отримані векторні, хвильові діаграми та діаграма гармонійних складових напруг та струмів споживача № 5.

З векторної діаграми (рис. 1) видно, що результуючий характер навантаження - активно – ємнісний. Така система генерує реактивну енергію в напрямку джерела.

Таблиця 2 – Параметри споживача № 5 в режимі навантаження

Пара-метри	Фаза А	Фаза В	Фаза С	За всіма фазами
U_{ϕ} , В	221,3	216,6	219,8	
I_{ϕ} , А	57,4	112,7	121,3	
U_L , В	378,9	379,3	381,1	
I_N , А	60,77			
S , кВА	12,7	24,4	26,7	63,9
P , кВт	12,6	24,2	26,4	63,2
Q , кВАр	-1,9	-3,3	-3,5	-8,7

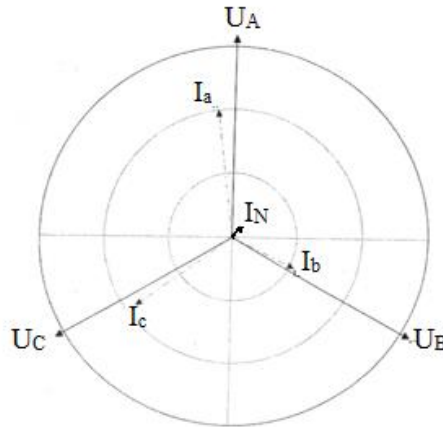


Рис. 1. Векторна діаграма струмів та напруг на вході споживача

З рис. 2 витікає, що крім основної гармоніки з частотою 50 Гц наявні непарні гармонічні складові (3,5,7,9-гармонік струму та напруги). Фазні коефіцієнти гармонік прямої послідовності для напруги склали 1,7 %, 1,8 %, 1,4 %, а для струму – 4,9 %, 4,6 % і 4,5 %, чого не помічалося в споживачах з лінійною симетричною та несиметричною системою навантаження.

На рис. 3 наведені часові залежності миттєвих значень напруги та струму. Чітко видно, що вони спотворені гармонічними складовими. Хоча спотворення кривих напруги не перевищує допустимих стандартних значень, генерація росте в 4,4 рази швидше ніж реактивна енергія. Це при тому, що вартість генерації більше за ціну реактивної енергії у 3 рази.

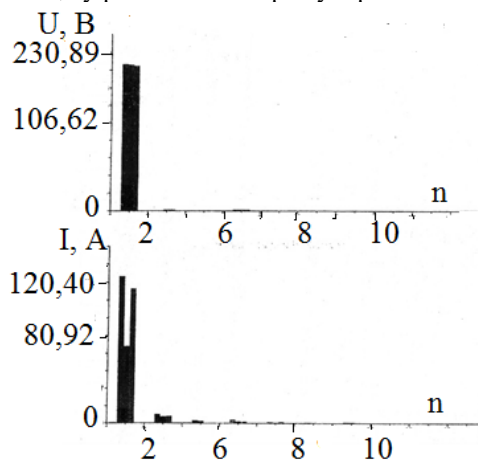


Рис. 2. Гармонічні складові напруги та струму при наявності нелінійного несиметричного споживача (n – номер гармоніки)

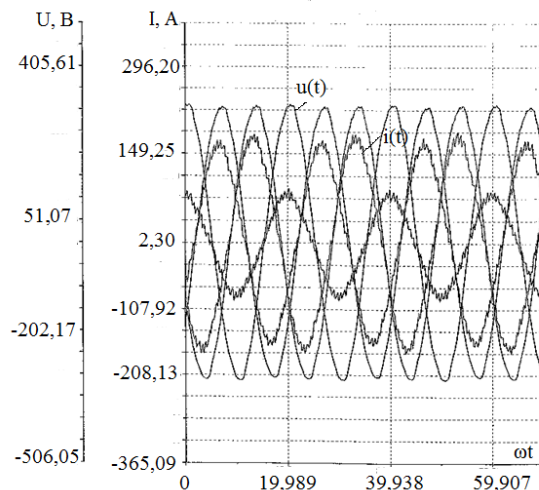


Рис. 3 - Хвильові діаграми напруги та струму на вході нелінійного споживача

Відповідність показників якості електроенергії для несиметричних споживачів будемо оцінювати за коефіцієнтами несиметрії прямої та зворотної послідовностей, значення яких повинні відповідати вимогам ГОСТу 13109-97.

За допомогою символічного методу розрахували коефіцієнти несиметрії для наведеної системи комплексних напруг: $U_a = 221,6e^{j0}$, $U_b = 216,6e^{-j120}$, $U_c = 219,8e^{j120}$.

На основі отриманих даних визначили коефіцієнти послідовностей: коефіцієнт нульової послідовності $K_0 = 1,55 \%$; коефіцієнт зворотної послідовності $K_3 = 0,32 \%$.

Таким чином, при несиметричному нелінійному навантаженні даного споживача коефіцієнти несиметрії відповідають вимогам діючого стандарту показників якості електричної енергії, тобто така система електропостачання має право на існування. Але в реальних умовах швидкість росту генерації в порівнянні з ростом реактивної енергії суттєво більше.

Далі дослідили вплив максимального активно-реактивного навантаження на величину коефіцієнтів послідовностей. Збільшили навантаження з лінійними та нелінійними споживачами. За рахунок падаючої

зовнішньої характеристики силового трансформатора змінилися значення фазних напруг: $U_a = 221,6\text{ej}0$, $U_b = 214\text{ej}120$, $U_c = 196\text{ej}120$. Коефіцієнти нульової та зворотної послідовності відповідно склали 4,6 % і 3,33 %. При такій величині навантаження коефіцієнти вийшли за межі допустимих величин.

Таким чином, одним з головних недоліків нелінійних систем споживання являється наявність гармонічних складових. Для компенсації їх негативного впливу найбільш економічно вигідним є використання пасивних активно-реактивних фільтрів.

На споживачі № 5 використали типовий дросель марки ДТС-013, номінальні параметри якого: розрахункова потужність 50 кВт, номінальний струм 120 А, індуктивність 0,139 мГн.

В результаті використання фільтра були скомпенсовані гармонічні складові непарних гармонік. Але реактивна енергія була нейтралізована усього на 48 %. Тому паралельно з фільтром встановили компенсуючий пристрій з регулюванням за окремими фазами. Порівнювальний аналіз первинних показників і тих, що були отримані після використання компенсуючих засобів, наведені в таблиці 3.

Використані засоби практично знешкодили генерацію, та перетворили існуючу систему споживання на споживач з активним характером навантаження, що дає можливість всю спожиту енергію перетворювати в корисну роботу.

Таблиця 3 – Порівнювальний аналіз параметрів споживача № 5

Параметри	До компенсації	Після компенсації
Активна енергія, кВт·год	28	29,1
Реактивна енергія, кВар·год	15	0,03
Генерація, кВар·год	66	0
$\cos\phi$	0,88	0,99

Висновки

В результаті виконання роботи:

- досліджено параметри технологічних систем живлення та споживання з лінійним і нелінійним характером навантаження. Показано що явище генерації суттєво впливає на вартість та якість електричної енергії;
 - встановлено, що для підвищення ефективності енергосистем необхідний індивідуальний підхід до вибору системи компенсування реактивної енергії;
 - показано, що для лінійних симетричних споживачів ефективними являються типові компенсуючі пристрої;
 - розроблено рекомендації щодо компенсації реактивної енергії в лінійних несиметричних системах, для чого запропоновано застосування компенсаторів з індивідуальним регулюванням за робочими фазами;
 - надано рекомендації щодо компенсації реактивної енергії в нелінійних споживачах за умови мінімальної генерації реактивної енергії, а саме:
 - а) розрахунок гармонічних непарних складових струму та напруги як функцій індивідуальних параметрів споживача;
 - б) вибір відповідної системи фільтрів для отриманих параметрів гармонік струму;
 - в) встановлення пристрою для компенсації лінійної складової некомпенсованої реактивної енергії.
- Такий підхід дав можливість суттєво підвищити коефіцієнт потужності при нульовій генерації.

Бібліографічний список

1. Повышение коэффициента мощности малых государственных предприятий [Текст] / С. Г. Павлюс и др. // Совр. науч. вестник. – 2011. - № 11 (107). – С. 84 - 91.
2. Соборницкий, В. И. Повышение коэффициента мощности электро-термических установок [Текст] / В. И. Соборницкий и др. // Ключові въпроси в съвременната наука: тезиси докл. XII Междунар. науч.-практ. конфер. (София, 15 – 22 априля 2016). – София, 2016. № 23. - С. 19 – 21.
3. Павлюс, Е. С. Повышение эффективности системы электро-потребления университета [Текст] / Е. С. Павлюс и др. // Хімія і сучасні технології: тези допов. VI Міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспір. та молод. вчених (Дніпро, 24 - 26 квітня 2013р.). – Д., 2013. – С. 12.
4. Шидловский, А. К. Элект-рические цепи с вентиляными ком-мутаторами [Текст]: монографія / А. К. Шидловский, В.С. Федий. – К.: ООО Артпринт, 2010. – 269 с. (друк. арк. 12,2).
5. Павлюс, С. Г. Методичні вказівки до лабораторно-практичних занять та організації самостійної роботи з дисципліни "Теорія електричних сигналів і кіл" за освітньо-професійною програмою "бакалавр" для студентів спеціальності 152 "Метрологія та інформаційно-виміррювальна техніка" (частина II) нормативний

блок "Електротехніка" [Текст]: методичні вказівки / С. Г. Павлюс, І. І. Папанова, В. І. Соборницький. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2018. – 34 с.

6. Соборницький, В. І. Эффективность технологических систем питания и потребления электроэнергии [Текст] / В. И. Соборницький и др. // Nauka I studia. - 2016. - № 247 (161). - Р. 35 – 39.

7. Соборницький, В. І. Влияние индуктивности и геометрии токоподводов в сетях высоких и низких частот [Текст] / В. И. Соборницький и др. // - Совр. науч. вестник. – 2017. - № 4 (271). - С. 68 - 74.

АННОТАЦИЯ

Цель. Повышение коэффициента мощности систем потребления энергии и анализ их эффективности в зависимости от характера нагрузки.

Методика исследования заключается в анализе показателей качества электрической энергии потребителей с разным характером нагрузки.

Результаты исследования. Исследованы параметры технологических систем питания и потребления с линейным и нелинейным характером нагрузки. Показано что явление генерации существенно влияет на вар-мость и качество электрической энергии. Установлено, что для повышения эффективности энергосистем необходимо индивидуальный подход к выбору системы компенсации реактивной энергии. Показано, что для линейных симметричных потребителей эффективными являются типичные компенсирующие устройства.

Научная новизна. Установлены зависимости показателей качества электрической энергии от характера потребителей.

Практическое значение. Разработаны рекомендации по повышению коэффициента мощности в системах электропотребления при условии минимальной генерации реактивной энергии. Разработаны рекомендации по компенсации реактивной энергии в линейных несимметричных системах, для чего предложено использование компенсаторов с индивидуальным регулированием по рабочим фазам.

Ключевые слова: генерация, электроэнергия, коэффициент мощности, компенсация, нагрузки, мощность, потребитель.

ABSTRACT

Goal. Increasing the power factor of energy consumption systems and analysis of their efficiency depending on the nature of the load.

The research methodology consists in the analysis of indicators of quality of electric energy of consumers with various character of loading.

Results of the research. The parameters of technological systems of power supply and consumption with linear and nonlinear nature of loading are investigated. It is shown that the phenomenon of generation significantly affects the cost and quality of electricity. It is established that to increase the efficiency of power systems requires an individual approach to the choice of reactive energy compensation system. It is shown that typical compensating devices are effective for linear symmetrical consumers.

Scientific novelty. The dependences of electricity quality indicators on the nature of consumers are established.

Practical meaning. Recommendations for increasing the power factor in power consumption systems with minimal generation of reactive energy have been developed. Recommendations for reactive energy compensation in linear asymmetric systems have been developed, for which the use of compensators with individual regulation by operating phases is proposed.

Keywords: generation, electricity, power factor, compensation, load, power, consumer.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Папайкою Ю.А.

ОБЛІК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

Н.С. Дрешпак¹, С.І. Випанасенко², О.С. Дрешпак¹

¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
rector@nmu.org.ua, ORCID 0000-0002-4453-1378

² Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
rector@nmu.org.ua, ORCID 0000-0002-0986-9488

³ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
rector@nmu.org.ua, ORCID 0000-0003-1019-4382

ELECTRICITY ACCOUNTING IN ENERGY EFFICIENCY CONTROL SYSTEMS

N. Dreshpak¹, S. Vypanasenko², A. Dreshpak³

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
rector@nmu.org.ua, ORCID 0000-0002-4453-1378

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
rector@nmu.org.ua, ORCID 0000-0002-0986-9488

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
rector@nmu.org.ua, ORCID 0000-0003-1019-4382

Мета статті – оцінити можливості та визначити доцільність використання існуючих систем обліку електроенергії в системах контролю енергоефективності виробничих процесів промислових підприємств.

Методика дослідження - аналіз функцій існуючих систем обліку електроенергії та їх поєднання з функціями систем контролю енергоефективності.

Результати дослідження. Розглянуто зв'язок системи контролю ефективності використання електроенергії з іншими складовими системи енергоменеджменту. Сформульовані вимоги до об'єкту управління та системи його контролю. Показано, що структурна побудова і розташування точок обліку електроенергії існуючих розподільчих мереж промислового підприємства в основному відповідають умовам, необхідним для впровадження систем контролю енергоефективності.

Наукова новизна. Обґрунтована доцільність застосування систем контролю та обліку енергоресурсів (АСКОЕ) в системах контролю енергоефективності, що зумовлено орієнтацією цих систем на значну кількість об'єктів контролю та точок обліку електроенергії, необхідністю мінімізації похибки облікованих значень, оперативністю передачі даних в центр обробки інформації, можливістю зміни періодичності збору інформації, наявністю доступу до архіву даних.

Практичне значення. Існуюче програмне забезпечення АСКОЕ не здатне забезпечити виконання функцій системи контролю енергоефективності повною мірою. Запропоновано часткове використання його можливостей. Відокремлення функцій АСКОЕ від інших функцій системи контролю енергоефективності дозволяє розглядати необхідне програмне забезпечення у вигляді самостійних модулів, взаємодія яких реалізує повний перелік функцій системи контролю.

Ключові слова: облік електроенергії, контроль енергоефективності, системи енергоменеджменту.

Вступ. Викладені в [1,2] недоліки існуючих систем контролю ефективності споживання енергії при-
таманні системам контролю різних видів енергетичних ресурсів. Що стосується відмінностей цих систем, то у першу чергу слід звернути увагу на особливості їх технічної реалізації. Відрізняються системи як структурною побудовою, що проявляється у різному ступені їх розгалуженості, обслуговуванні різної кількості споживачів, так і відмінностями технічних характеристик, режимів обліку енергії. Очевидно, що і при удосконаленні різних за призначенням систем контролю ефективності споживання енергії слід урахувати особливості умов їх функціонування. Існуючі відмінності систем контролю обмежують можливості для узагальнення результатів виконаних досліджень. Це спонукало авторів статті орієнтуватися на контроль показників конкретного виду енергії – електричної. Зосередження уваги на споживанні електричної енергії зумовлено широкою сферою її застосування, значною вартістю і потребує поглибленого аналізу рівня споживання, пошуку ефективних заходів з енергозбереження. Умови споживання електричної енергії можуть бути різними, але значна кількість приймачів працює в умовах протікання швидкоплинних процесів, що потребує підвищеної оперативності функціонування систем контролю. Системи контролю споживання електричної енергії повинні бути достатньо інформативними для прийняття вірних управлінських рішень і забезпечувати прийнятну достовірність отриманих результатів. Забезпечення цих важливих

вимог можливе при наявності ефективного обліку електричної енергії. Існуючі системи обліку електричної енергії багатофункціональні, високотехнологічні [3] і завдяки цьому можуть служити основою для часткової реалізації функцій систем контролю енергоефективності, що підлягають створенню [4].

Задача дослідження полягає в аналізі функцій існуючих систем обліку електроенергії з точки зору можливості та доцільності їх використання в системах контролю енергоефективності промислових підприємств.

Рішення задачі. Розглянемо зв'язок систем контролю енергоефективності з іншими складовими системи управління енерговикористанням (системи енергоменеджменту) (рис.1) [1]. Об'єктом управління може бути промислове підприємство, його структурний підрозділ або окремий енергоємний агрегат, орієнтовані на випуск окремого виду продукції.

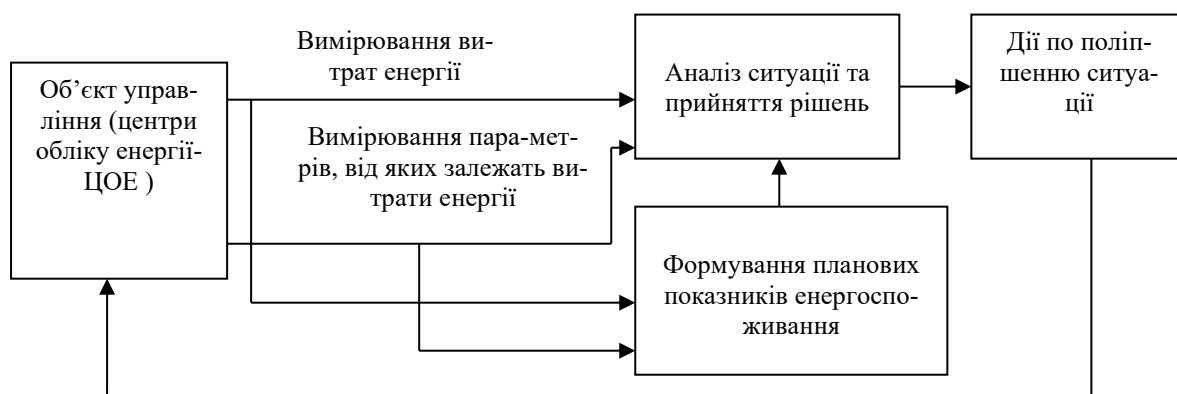


Рисунок 1 – Система контролю енергоефективності в структурі системи енергоменеджменту

Якщо підприємство або його підрозділ спеціалізуються на випуску декількох видів продукції, то об'єктом управління є та його частина, яка здійснює випуск одного виду продукції. Таким чином, багато-профільні підприємства можуть бути умовно поділені на декілька об'єктів, де здійснюється управління енергоспоживанням виробництва окремого виду продукції. Часто технологічний процес не завершується випуском товарної продукції, а представляє собою проміжну операцію виготовлення напівфабрикату. При цьому принципової різниці у визначенні об'єкта управління не існує. Для кожного об'єкта управління необхідно здійснювати облік спожитої енергії, а також реєструвати кількість отриманої продукції або напівфабрикатів. Так як мова йде про визначення фактичних значень питомого енергоспоживання, то необхідно чітко зіставляти значення витрат енергії з відповідним цим витратам випуском продукції (напівфабрикатів). Тобто слід звернути увагу на необхідність повного урахування витрат енергії, пов'язаних з технологічним процесом виробництва. Якщо облік спожитої енергії не буде повним, то це може внести суттєві зміни в показники енергоефективності та привести до невірних управлінських рішень, спрямованих на вирішення завдань енергозбереження [1]. Причиною неповного обліку енергії може бути наявність окремих технологічних операцій, енергетичні витрати на виконання яких не фіксуються. Це може бути зумовлено, наприклад, відсутністю достатньої кількості лічильників електричної енергії. Інша ситуація, що ускладнює процедуру вимірювання витрат енергії, полягає у застосуванні одного і того ж обладнання для одночасного виконання технологічної операції з різними виробами, енергоємність виготовлення яких контролюється. Розподілення обліку витрат енергії на виготовлення різних видів продукції часто здійснюють шляхом зміни структури електричних мереж, визначення раціональних точок обліку енергії, встановлення додаткових лічильників електричної енергії.

Слід зазначити, що структури існуючих електричних мереж промислових підприємств певною мірою відповідають їх адміністративному поділу, розподіленню виробничого процесу по технологічним ознакам. Розгалуженість мереж з окремим живленням адміністративних будівель, виробничих цехів, поєднується з відповідним визначенням точок обліку електроенергії окремих споживачів. І структурна побудова існуючих мереж і розташування точок обліку в цілому відповідають завданням визначення синтезованих енергетичних балансів підприємств, сприяють нормуванню та прогнозуванню витрат електроенергії як на виконання окремих технологічних процесів, так і на виробництво продукції в цілому. Ці позитивні ознаки існуючих систем можуть бути корисні при виділенні об'єктів управління і створенні відповідних систем контролю енергоефективності в рамках існуючих систем енергозабезпечення підприємства. Якщо об'єктом управління є структурний підрозділ підприємства (наприклад, цех з виробництва продукції), то необхідно звернути увагу на енергоємність технологічних операцій, суттєвість зміни питомих витрат енергії в часі. Якщо ці показники значимі, тоді введення контролю за використанням енергії і управління цим процесом доцільні, і їх економічна ефективність, як свідчать дослідження [1], безумовна. Це

підтверджується зокрема тим, що упровадження заходів з енергозбереження на енергоємних виробництвах, як правило, є більш відчутним у порівнянні з менш енергоємними.

Існує широкий перелік засобів обліку електричної енергії [3]. Вони відрізняються за принципом визначення обсягу спожитої енергії (електронні, індукційні), їх призначенням (комерційного та технічного обліку), точністю обліку енергії (існує ряд фіксованих значень похибки вимірювання). Підключення лічильників до електричної мережі здійснюють, як правило, використовуючи додаткові пристрої (вимірювальні трансформатори струму та напруги). Вони вносять відповідну похибку в результати вимірювання, причому значення похибки значною мірою залежить від ступеня навантаження вимірювальних трансформаторів. Існує методика, яка дозволяє визначати рівні похибок вимірювання спожитої електроенергії [5], що є важливим чинником для обґрунтування достовірності фактичних значень питомого споживання енергії об'єктом управління. В системах контролю енергоспоживання підприємства в цілому можливе застосування лічильників комерційного обліку, що забезпечить підвищення точності вимірювань. Якщо мова йде про структурні підрозділи підприємства, то доцільно використовувати лічильники технічного обліку. Вони мають меншу вартість і забезпечують вимірювання з достатньою для вирішення сформульованих завдань контролю точністю.

Достовірність результатів співставлення фактичних і нормованих значень питомих витрат енергії (рис.1) значною мірою залежить від похибки нормування, про що наголошувалось в [1]. Так як значення нормованих витрат є результатом аналізу стохастичних зав'язків змінних, то виникає завдання визначення похибки нормованих значень на основі аналізу отриманих в центрі обліку енергії статистичних даних.

Розглянемо іншу складову обліку, яка передбачає вимірювання параметрів процесу, від яких залежать витрати енергії об'єктом управління (рис. 1). Перш за все, необхідно звернути увагу на кількість виготовленої продукції та кількість відбракованої в результаті контролю її якості. Достовірність зафіксованих в процесі контролю кількісних показників повинна бути високою, так як вони безпосередньо впливають на показник енергоємності. Акцент на високу достовірність отриманої інформації надзвичайно важливий, так як виготовлення не облікованої продукції, на жаль, є розповсюдженим явищем сьогодення. Зрозуміло, що відсутність обліку не гарантує відсутності споживання енергії в процесі виготовлення не облікованої продукції. Якщо статистичний метод нормування показника питомого енергоспоживання передбачає застосування регресійного аналізу, то важливим є визначення конкретних значень параметрів, які уведені в математичну модель. Повинна існувати можливість безперешкодної реєстрації цих параметрів в умовах діючої технологічної лінії. Тому вибору цих параметрів, обґрунтованого порядку їх реєстрації слід приділяти особливу увагу. При цьому не слід забувати про те, що перелік врахованих параметрів є надзвичайно важливим для визначення впливу окремих факторів на показник питомої енергоємності процесу. Необхідно звести до мінімуму похибку реєстрації. Бажано, щоб зафіксоване значення фактору впливу використовувалось не тільки в системі контролю ефективності споживання енергії, а мало значення для функціонування інших систем виробництва (наприклад, дані маркшейдерських вимірювань, метрологічних показників і т.п.) Їх наявність у звітній документації підприємства суттєво підвищує достовірність інформації, дозволяє розглядати їх як ряди статистичних даних, отриманих в умовах конкретного виробництва. Аналізуючи сказане, приходимо до висновку про те, що облік необхідної для функціонування системи контролю інформації, передбачає отримання її як від засобів обліку електричної енергії, так і від засобів вимірювання неелектричних величин. Для цього можуть бути задіяні як системи автоматизованого обліку, так і засоби ручної реєстрації даних. Інформаційні потоки підлягають обробці з використанням комп'ютерної програми формування нормованих значень енергоспоживання, співставлення даних, визначення впливу окремих факторів на енергоефективність процесу, розрахунку інтегральних характеристик. Тобто важливі функції системи контролю (рис.1) будуть реалізовані комп'ютерною програмою, яку необхідно розробити. Очевидно, що розробка програми потребує відповідного математичного забезпечення. Воно повинно акумулювати нові ідеї стосовно підвищення оперативності, точності, інформативності контролю [1]. Розвиток теоретичних засад контролю енергоефективності дозволить здійснювати операції управління процесом виробництва на принципово новій основі його інформаційного забезпечення, уникнути невдалих необґрунтованих рішень.

Виникають питання, пов'язані з технічною реалізацією систем контролю. Запропонований підхід до їх вирішення полягає у спробі максимального застосування існуючих засобів, які спроможні реалізувати у повному обсязі або частково сформульовані до систем вимоги [1]. При виборі лічильників електричної енергії слід урахувати можливості їх встановлення у визначених точках обліку, передачі даних для здійснення відповідних розрахунків, налаштування необхідних параметрів процедури обліку. Необхідно урахувати, що в межах енергоємного підприємства формують, як правило, декілька об'єктів управління, тобто слід орієнтуватися на значну кількість точок обліку. В розподільчих електричних мережах промислових підприємств точки обліку зазвичай визначають в підстанціях та розподільчих пунктах [1].

Необхідність реалізації оперативного обліку в системі контролю енергоефективності спонукає до застосування в її складі автоматизованих систем обліку, де вимірювання здійснюють з певною періодичністю, існує можливість обробки отриманих даних без суттєвої затримки в часі. Безліч точок обліку,

зумовлених значною кількістю об'єктів управління, орієнтація на одночасну обробку інформації в спільному центрі обробки даних, дозволяє розглядати в якості прийнятного варіанту для впровадження контролю енергоефективності застосування автоматизованих цифрових систем отримання та обробки даних АСКОЕ.

Програмне забезпечення АСКОЕ має прості алгоритми формування нормованих значень. Часто контроль здійснюється у формі, коли фіксується перевищення або неприйнятне для споживача зниження вимірюваного параметра відносно встановленого рівня. Ясно, що такий рівень контролю не може задовольнити вимог, визначених для систем контролю ефективності використання енергії. Очевидно, що підхід для вирішення сформульованого завдання полягає у поєднанні функцій, що реалізуються в АСКОЕ (у першу чергу, процедури обліку), з функціями спеціально розробленого для контролю енергоефективності процесів програмного забезпечення.

В залежності від призначення АСКОЕ поділяють на системи технічного та комерційного обліку [3]. Виходячи із визначеного об'єкту дослідження, завдань контролю [4], слід орієнтуватися на технічних облік, який урахує споживання енергії підприємством та його підрозділами. Відомо, що результати технічного обліку АСКОЕ використовують також для нормування, планування і навіть управління процесом енергоспоживання [3]. Незважаючи на те, що використання АСКОЕ для забезпечення цих функцій в окремих випадках є прийнятним, слід зазначити, що закладені в ранні періоди створення таких систем алгоритми їх реалізації не можуть бути застосовані для виконання сформульованих завдань контролю енергоефективності [4] і їх необхідно удосконалювати. Між тим, деякі функції АСКОЕ є прийнятними для створюваної системи контролю і можуть бути задіяні при її розробці. Структура системи контролю наведена на (рис.2).

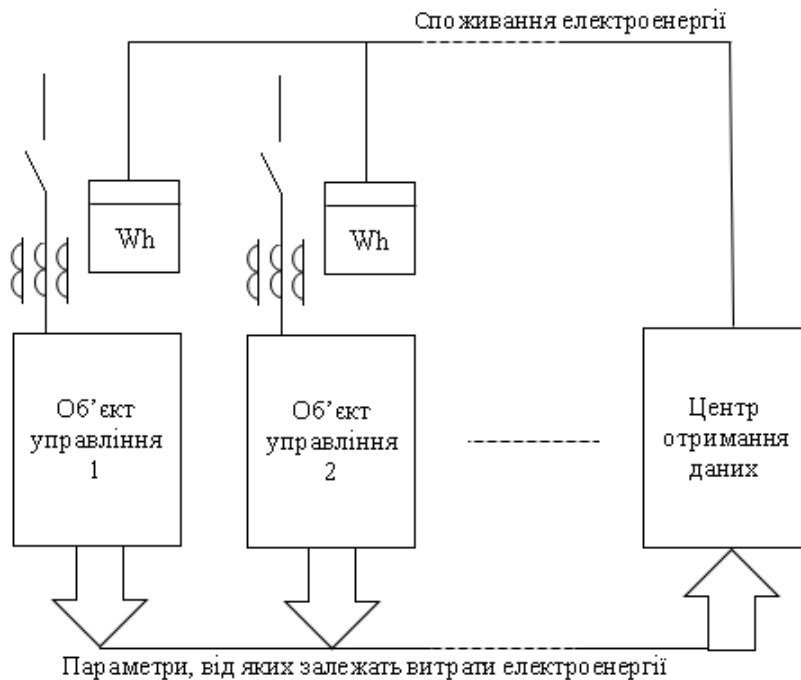


Рисунок 2 – Система контролю енергоефективності з використанням АСКОЕ

На більшості підприємств використання систем АСКОЕ передбачає становлення лічильників електричної енергії у визначених точках обліку (в трансформаторних підстанціях, розподільчих пунктах) [3]. Реєстрація отриманої лічильниками інформації може здійснюватися різними способами (обхід лічильників оператором, передача даних в центр обробки інформації з використанням безпроводних або провідних каналів зв'язку). Технічні системи обліку часто поєднують з комерційними. Для створюваної системи контролю таке поєднання є доцільним у випадку, коли аналізу підлягає як споживання електроенергії підприємством (комерційний облік), так і реєструються витрати енергії окремими підрозділами, технологічними агрегатами (технічний облік).

Центр обробки даних містить ЕОМ, яка здійснює облік електричної енергії, спожитої декількома об'єктами управління 1,2...n, обробку даних і їх представлення у належному вигляді. Одночасно здійснюють вимірювання неелектричних величин, які впливають на процес електроспоживання в об'єктах управління. Інформація також потрапляє в центр обробки даних. Поєднання інформаційних потоків дозволяє реалізувати повний перелік функцій, характерних для системи, що підлягає розробці. Важливо те, що

частина функцій, притаманних АСКОВЕ, поєднується з функціями, необхідними для реалізації систем контролю. Таке поєднання відбувається завдяки встановленню програмного забезпечення АСКОВЕ та розробленої програми контролю енергоефективності в одній ОЕМ з наступним об'єднанням їх функцій для вирішення спільних завдань.

Існує необхідність окремого розгляду тих функцій АСКОВЕ, які будуть використані в системі контролю енергоефективності. Незважаючи на суттєве різноманіття систем АСКОВЕ, їх функціональні можливості відрізняються незначною мірою. Більшість існуючих систем частково реалізують функції, необхідні для роботи створеної системи контролю. В табл.1 наведено перелік основних функцій системи контролю і окремо виділені функції АСКОВЕ, які доцільно використовувати для реалізації основних функцій. Їх використання дозволить суттєво зменшити трудомісткість робіт, пов'язаних з впровадженням системи контролю, так як значно спростується процедура отримання необхідної інформації. Зрозуміло, що в системі контролю задіяна частина функцій, які здатна виконувати АСКОВЕ. Але це не свідчить про те, що планується тільки часткове їх використання. АСКОВЕ мають більш широкі можливості для реалізації обліку, контролю і управління енергоспоживанням, і ці можливості можуть бути використані повною мірою при вирішенні додаткових завдань, не пов'язаних з контролем енергоефективності. Очевидно, що основні функції системи контролю енергоефективності (табл.1) повинні реалізовуватися при розробці програми контролю, яка взаємодіє з програмним забезпеченням АСКОВЕ.

Таблиця 1

Використання АСКОВЕ для часткової реалізації функцій системи контролю енергоефективності	
Функції АСКОВЕ, що можуть бути задіяні в системах контролю енергоефективності	Основні функції системи контролю енергоефективності
- Одночасний облік електроенергії в декількох точках системи електропостачання і передача даних в центр їх обробки; - Можливість зміни інтервалу обліку електроенергії та періодичний збір результатів вимірювань; - Формування архіву даних обліку з можливістю доступу до цих даних у визначених проміжках часу; - Можливість взаємодії з іншим програмним забезпеченням системи контролю енергоефективності.	- Визначення нормованих значень ефективності споживання електричної енергії; - Співставлення фактичних показників енергоефективності з нормованими значеннями; - Визначення впливу окремих факторів на показник енергоефективності; - Розробка інтегральних характеристик ефективності споживання електричної енергії.

Необхідно звернути увагу на те, що виконання функцій контролю енергоефективності не можливо без оперативного забезпечення програми контролю достовірною інформацією з визначених точок обліку, отримання якої здійснює АСКОВЕ. В той же час, слід підкреслити, що реалізований в більшості АСКОВЕ набір функцій контролю показників енергоспоживання суттєво відрізняється від наведеного в табл.1 переліку основних функцій контролю енергоефективності. Це пояснюється, зокрема, тим, що реалізація перерахованих в табл.1 функцій контролю передбачає наявність додаткової інформації про значення параметрів, від яких залежать витрати електроенергії.

Висновки

1. Структурна побудова та розташування точок обліку існуючих розподільчих систем електропостачання промислових підприємств створюють, як правило, сприятливі умови для нормування питомих витрат енергії, що необхідно враховувати при формуванні об'єктів управління системи енергоменеджменту і створенні систем контролю ефективності використання електроенергії.

2. При використанні статистичного методу нормування питомого енергоспоживання існує необхідність визначення похибки визначення нормованого значення, що важливо для оцінки достовірності отриманих результатів контролю енергоефективності в процесі зіставлення фактичних значень енергоспоживання з нормованими.

3. На відміну від АСКОВЕ, системи контролю ефективності споживання електричної енергії використовують не тільки інформацію з лічильників енергії, а, крім того, отримують дані про значення параметрів об'єктів управління, від яких залежить енергоспоживання. Таким чином, програмне забезпечення АСКОВЕ не здатне забезпечити виконання функцій систем контролю у визначеному обсязі. Існує можливість і обґрунтована доцільність часткового використання цих функцій.

4. Відокремлення функцій АСКОВЕ від інших функцій систем контролю енергоефективності дозволяє розглядати програмне забезпечення цих систем як самостійні модулі і використати їх можливості для взаємодії в центрі обробки даних з метою об'єднання і реалізації повного переліку перерахованих функцій.

Перелік посилань

1. Півняк, Г.Г., Випанасенко, С.І., Хованська, О.І., Хацкевич, Ю.В., Дрешпак, Н.С. (2013). *Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.
2. Vypanasenko, S.I., Dreshpak, N.S. (2015). *Informational and methodological support for energy efficiency control*. Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, Vol. 2, 53-57.
3. Дрешпак, Н.С., Випанасенко, С.І. (2016). *Розширення можливостей аналізу інформації автоматизованих систем обліку енергії*. Збірник наукових праць НГУ, №2, 7-9.
4. Ожегов, А.Н. (2006). Системы АСКУЭ. Киров.: Вятский государственный институт.
5. Научно-технический совет Национальной комиссии Минэнерго по вопросам регулирования электроэнергетики Украины (1997). Главный правовой портал Украины: *Концепция построения автоматизированных систем учета электроэнергии в условиях энергорынка*. Режим доступа: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/GK1437.html

АННОТАЦІЯ

Цель статьи - оценить возможности и определить целесообразность использования существующих систем учета электроэнергии в системах контроля энергоэффективности производственных процессов промышленных предприятий.

Методика исследования - анализ функций существующих систем учета электроэнергии и их сочетания с функциями систем контроля энергоэффективности.

Результаты исследования. Рассмотрена связь системы контроля эффективности использования электроэнергии с другими составляющими системы энергоменеджмента. Сформулированы требования к объекту управления и системы его контроля. Показано, что структурное построение и расположения точек учета электроэнергии существующих распределительных сетей промышленного предприятия в основном соответствуют условиям, необходимым для внедрения систем контроля энергоэффективности.

Научная новизна. Обоснована целесообразность применения систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ) в системах контроля энергоэффективности, что обусловлено ориентацией этих систем на значительное количество объектов контроля и точек учета электроэнергии, необходимостью минимизации погрешности учетных значений, оперативностью передачи данных в центр обработки информации, возможностью изменения периодичности сбора информации, наличием доступа к архиву данных.

Практическое значение. Существующее программное обеспечение АСКУЭ не способно обеспечить выполнение функций системы контроля энергоэффективности в полной мере. Предложено частичное использование его возможностей. Отделение функций АСКУЭ от других функций системы контроля энергоэффективности позволяет рассматривать необходимое программное обеспечение в виде самостоятельных модулей, взаимодействие которых реализует полный перечень функций системы контроля.

Ключевые слова: учет электроэнергии, контроль энергоэффективности, системы энергоменеджмента.

ABSTRACT

Purpose of work – to assess possibilities and define usefulness of the existing electricity meter reading systems in energy efficiency control systems of technological processes at industrial enterprises.

Research methods – analyzing functions of the existing electricity meter systems and their combination with the functions of energy efficiency control systems.

Research results. The connection between control systems and other components of energy management system is considered. Requirements for the management object, and the control systems, are formulated. It is shown that the structural construction and location of electricity metering points in the existing distribution networks at industrial enterprise mainly meet the conditions for implementing energy efficiency control systems.

Scientific novelty. The necessity for using automatic meter reading (AMR) systems, which is due to orientating the systems on a significant number of the control objects and electricity metering points, the need to increase accuracy of the metered values, frequency in the transmission data, as well as the ability to change periodicity of data collection, and the availability of access to the data archive, is substantiated.

Practical significance. The existing AMR system's software is not fully able to carry out functions of the system for energy efficiency control. Partial use of its capabilities is offered. Separating the AMR system's functions from the other functions of the system for energy efficiency control allows us to consider the corresponding software in the form of independent modules, interaction of which provides realizing full list of functions of the control system.

Key words: electricity accounting, energy efficiency control, energy management systems.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доцентом Колбом А.А.

ОЦІНКА СТАНУ ЯКОСТІ НАПРУГИ У ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

І.В. Жежеленко¹, Ю.А. Папайка², І.М. Луценко³, О.Г. Лисенко⁴

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро,
epp@pstu.edu ORCID ID 0000-0003-4120-2517

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро,
papaika.yu.a@nmu.one ORCID ID 0000-0001-6953-1705

³ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро,
lutsenko.i.m@nmu.one ORCID ID 0000-0001-6406-2364

⁴ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро,
lysenko.o.g@nmu.one ORCID ID 0000-0002-7041-671X

ASSESSMENT OF VOLTAGE QUALITY IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS

I. Zhezhelenko¹, Yu. Papaika², I. Lutsenko³, O. Lysenko⁴

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
epp@pstu.edu ORCID ID 0000-0003-4120-2517

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
papaika.yu.a@nmu.one ORCID ID 0000-0001-6953-1705

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
lutsenko.i.m@nmu.one ORCID ID 0000-0001-6406-2364

⁴ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
lysenko.o.g@nmu.one ORCID ID 0000-0002-7041-671X

Мета статті – оцінка стану якості напруги в промислових електричних мережах з урахуванням різкого зростання несиметричних та нелінійних навантажень та визначення залежності втрат електроенергії від показників економічного розвитку країни.

Методика. При дослідженні було використано метод експертних оцінок та методи статистичного аналізу для визначення середніх значень втрат електроенергії.

Результати. Наукове обґрунтування високих рівнів втрат електроенергії у країнах, що розвиваються доводиться невирішеністю проблеми якості напруги та дуже низькими значеннями натурального коефіцієнта потужності в промислових, розподільчих та магістральних електричних мережах.

Наукова новизна. У статті подано аналіз проблем якості електроенергії на даний момент та описується важливість вирішення цих проблем. Рішення ґрунтуються, головним чином, на зміні рівня гармонік, що впливають на енергосистеми, і таким чином покращенні якості електроенергії. У статті проводиться аналіз комплексного погіршення якості напруги в електричних мережах при зміні характеру електричного навантаження.

Практична значимість. Знаходження закономірностей втрат електроенергії та ВВП країни. Дослідження проводяться для промислових систем електропостачання. На основі дослідження визначаються першочергові задачі для вирішення проблеми низької якості напруги в Україні.

Ключові слова: якість електроенергії, системи електропостачання, вищі гармоніки, втрати електричної енергії.

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними дослідженнями

У системах електропостачання в даний час існує три найважливіші взаємопов'язані проблеми: якість електроенергії (ЯЕ), надійність електропостачання та завищені втрати електроенергії [1-3].

Проблема якості електроенергії (ЯЕ) відноситься до числа найважливіших проблем сучасної електроенергетики. Зміст цієї проблеми в основному зводиться до наступного: оцінки електромагнітної сумісності (ЕМС), джерел електромагнітних завад та інших навантажень, оцінки економічного збитку, що виникає при цьому, оцінки значень електромагнітних завад, що генеруються різними «проблемними» навантаженнями, прогнозування їх значень у вузлах систем електропостачання, і, нарешті, мінімізації рівнів завад до значень, допустимих відповідними стандартами [1-3, 8].

Проблема ЯЕ включає аспекти: нормативний, розрахунковий, технічний і економічний. Останнім часом значний розвиток отримують економічний і правовий аспекти проблеми. Таким чином, проблема ЯЕ може розглядатися як самостійна галузь знань, що сформувалася в останні десятиліття минулого століття.

Технічний та економічний аспекти. Надзвичайно показово проблему ЯЕ ілюструє її економічний аспект. За останніми даними щорічний економічний збиток в США [4, 5], обумовлений низькою якістю

електроенергії, складає 40-50 млрд. дол./рік. за рахунок негативного впливу, головним чином, вищих гармонік, а також несиметрії та коливань напруги.

Діапазони змін показників якості електроенергії на підприємствах різних галузей зазвичай широкі та в багатьох випадках виходять за межі допустимих за нормами відповідних стандартів, наприклад, ГОСТ 13109-97. Зростання потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень навіть в розвинених країнах випереджає впровадження заходів по мінімізації електромагнітних завад. Як наслідок, наприклад, в низьковольтних розподільчих мережах Швейцарії рівень гармонік протягом 12 років зріс на 30% [1, 4-6].

Сумарна встановлена потужність керованих вентильних перетворювачів на листових і сортових прокатних станах досягає 1000 МВт, на алюмінієвих комбінатах - понад 1000 МВт. Споруджувані електродугові сталеплавильні печі мають пічні трансформатори потужністю 200 МВА. Навіть ці приклади свідчать про масштаби джерел електромагнітних завад [7, 8].

Як відомо, економічний збиток, пов'язаний з низькою ЯЕ, має електромагнітну і технологічну складові. Електромагнітна - визначається збільшенням втрат активної потужності і скороченням терміну служби ізоляції електрообладнання. Технологічна складова збитку обумовлена впливом ЯЕ на продуктивність технологічних установок і собівартість продукції, що випускається, а також частковою або повною зупинкою виробництва. Збільшення втрат електроенергії за рахунок її низької якості може досягати 15-20%. Значення відносних втрат електроенергії в електричних мережах промислово розвинених країн за усередненими даними за 2015-2020 рр. знаходяться в межах 4-7%. Так, у Німеччині - 4%, у Франції-7%, в Австрії, Бельгії, Чехії – 5%, США -6%, Італії, Швейцарії та Японії - 7%. Ці держави мають високе значення внутрішнього валового продукту (ВВП) за паритетом купівельної спроможності (ПКС) на душу населення, що перевищує 20 тис.дол. США: США - 62,5 тис.дол, Австрія і Німеччина-52,5, Італія - 39,6, Франція - 45,8 тис.дол. Оцінка факторів, що впливають на енергоефективність систем електропостачання при валовому внутрішньому продукті більше 20 тис.дол, наведена нижче у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення втрат електроенергії в деяких країнах світу			
Країна	ВВП на душу населення, тис. дол	Втрати електроенергії при передачі та розподілу, %	Споживання електроенергії на душу населення, тис. кВт·год
Австрія	52,1	5	8,5
Бельгія	43,1	5	8,0
Німеччина	52,5	4	7,0
Нідерланди	56,3	4	6,8
США	62,5	6	13,0
Чехія	37,3	5	6,3
Японія	44,2	5	7,8
Італія	39,6	7	5,2
Франція	45,8	7	7,4
Російська федерація	26,7	10	6,5
Вірменія	8,2	12	1,90
Молдова	5,0	25	1,35
Монголія	11,9	15	1,90
Білорусь	18,3	11	3,60
Україна	9,3	12	3,60
Румунія	19,8	12	2,50

У той же час в країнах з ВВП за ПКС менше 20 тис.дол. (Молдові, Білорусі, Румунії, Монголії) відносні втрати в мережах перевищують 10%. Фактично втрати в електричних мережах Білорусі та України в 1.5-2.5 рази більше, ніж в електричних мережах промислово розвинених країн

З наведених цифр випливає, що має місце зв'язок значень втрат електроенергії в електричних мережах різних країн з рівнем економіки цих держав. У країнах з більш розвинутою економікою, як правило, вище технічна культура виробництва, передачі і розподілу електроенергії, використовуються сучасні системи управління режимами роботи електричних мереж, контролю і обліку електроенергії, живуть і працюють платоспроможні і дисципліновані споживачі, діють чітка нормативно-правова база і система тарифного регулювання [1, 9].

Високий рівень втрат в електричних мережах пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, фізичним і моральним зносом мережі, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги та невирішеністю проблем якості електричної енергії [8].

Низький рівень якості електричної енергії призводить до зниження енергетичної ефективності електричних мереж за рахунок збільшення втрат активної та реактивної потужностей, технологічних витрат електроенергії на її транспортування, до зниження терміну служби електроустаткування, збільшення

капітальних вкладень в електричні мережі, порушення умов нормального функціонування енергетичної системи.

Розвиток електроенергетики характеризується інтенсивним зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У ряді країн обсяги введення ВДЕ вже сьогодні значно перевищують обсяги введення джерел традиційної генерації [6, 7].

Якщо в 2015 р загальна частка ВДЕ в генерації електроенергії в світі становила лише 5%, то в 2030 році вона становитиме 18,6%, а до 2050 р збільшиться до 48%. Таким чином, зміна загальної частки ВДЕ в генерації електроенергії в 2050 році збільшиться в 8,6 разів. При цьому генерація сонячних електростанцій зросте в 30 разів, при середньорічному темпі зростання 10,2%, а генерація вітряних електростанцій збільшиться в 11 раз при середньорічному темпі зростання 7,1%.

Сонячна генерація не створює коливань потужності в енергосистемі, тим не менш, надлишок її протягом періодів річної сонячної погоди викликає додаткові складності навіть для нормального режиму роботи енергосистеми. Ця нерегульована генерація для забезпечення балансів потужності в енергосистемі повинна покриватися класичними джерелами енергії або іншими спеціальними пристроями.

Більш складну ситуацію створює вітрова генерація. Однією з головних проблем використання енергії вітру є нестабільна генерація потужності: нестабільний по величині характер вітру призводить до непрогнозованих і нерегульованих змін потужності вітроагрегату і до нестаціонарного характеру вироблення електроенергії вітроелектростанціями, що впливає на надійність і ефективність функціонування енергосистеми і створює значні складності для нормального режиму роботи енергосистеми. Швидкість вітру має стохастичний характер; а потужність вітрогенератора залежить від швидкості вітру в третьому ступені. За рахунок цього змінюється і потужність, що видається вітроелектростанцією. Стохастичний характер задачі активної потужності вітроелектростанціями викликає коливання частоти в енергосистемі, зміни їх амплітуди і швидкості. Виникає також проблема впливу вітроелектростанції на ЯЕ в енергосистемі і підключених до неї споживачів, що може призвести не тільки до коливань частоти в енергосистемі, появи флікера і коливань напруги, але і до провалів напруги. Крім того коливання вітроелектростанцій при зміні швидкості вітру призводить до низькочастотних коливань і створює нові проблеми для стабільності енергосистеми і динамічних процесів в ній.

Низькочастотні коливання природні для кожної енергосистеми і виникають внаслідок малих змін навантаження і збурень (наприклад, відключень генераторів або ліній), і в ході електромеханічних перехідних процесів в енергосистемах в результаті виникнення істотного небалансу потужності в енергорайоні; вони виникають як при коливанні параметрів нормального режиму енергосистеми, так і за рахунок вимушених коливань, що викликаються конкретним джерелом.

Зміна складу генерації, пов'язана з ВДЕ, призводить до зменшення постійних інерції елементів систем електропостачання, збільшує чутливість параметрів режиму до малих збурень. В результаті енергосистема набуває нових властивостей, в тому числі і деяких негативні, які проявляються, зокрема, у виникненні низькочастотних коливань її режимних параметрів.

В електроенергетичних системах діапазон власних частот низькочастотних коливань знаходиться в межах 0,1-3,0 Гц. Зазвичай, наближення режиму енергосистеми до межі по стійкості, некоректна настройка АРЗ генераторів і автоматичних регуляторів швидкості обертання сприяють виникненню цих коливань. Вони представляють серйозну небезпеку, так як розвиток слабодемпфованих низькочастотних коливань може призвести до порушення коливальної стійкості енергосистеми і викликати системну аварію. Саме тому низькочастотні коливання потужності є однією з основних проблем, що впливають на надійність і функціонування електричних систем [6].

Впровадження вітроелектростанцій призводить до додаткового (в порівнянні з традиційними джерелами електроенергії) зменшення інерційності енергосистеми і, як наслідок, до зростання значень показників якості електроенергії в першу чергу, провалів і флікер напруги. Комплекс цих явищ виникає також за рахунок збільшення потужності короткого замикання у вузлі.

Ця особливість в найбільшій мірі характерна для промислових підприємств. Як свідчить досвід, раціональний діапазон значень потужності короткого замикання становить: в мережах 6-35 кВ - 150 - 1500 МВА, в мережах 110-220 кВ - 5000 - 10000 МВА. З тією ж метою рекомендується застосування статичних компенсаторів реактивної потужності СТАТКОМ, електромагнітних синхронних (СК) і асинхронних (АСК) компенсаторів з великою кратністю струму збудження.

Провали напруги (ПН) часто призводять до перерв електропостачання і, відповідно, до виникнення технологічного збитку. ПН часто виникають в результаті відключень повітряних ліній і подальшого автоматичного повторного включення (однофазного чи іншого), а також в результаті включення потужних споживачів та інших причин, вони негативно впливають на роботу електроприймачів і, перш за все, чутливих до завад елементів, що входять до складу систем управління і контролю. У більшості випадків вони виконуються на базі мікропроцесорної техніки або використання ЕОМ. Вплив ПН в ряді випадків призводить не тільки до локальних аварійних ситуацій, а й до повної зупинки виробництва. Особливу небезпеку ПН представляють для виробництв з використанням роботизованих комплексів. Кожен провал напруги призводить в середньому до відмови 20 одиниць технологічного устаткування. Аналогічна ситуація мала

місце на автомобільному заводі: в грозовий сезон автоматизовані лінії фірми «Рено» з автоматикою фірми «Сіменс» простоювали по декілька годин на добу.

Характерно, що збільшення потужності електроприймачів та кількості повітряних ліній, що живлять підприємство, знижує надійність електропостачання. Це пояснюється тим, що дещо знижується глибина провалів, але збільшується їх кількість за рахунок розширення зони впливу. Так, наприклад, при підключенні до районної підстанції, яка живить завод хімволокна, додатковою повітряною лінією 330 кВ середньорічне число провалів напруги на підстанції заводу збільшилося за рік на 18% [7, 8].

Головними чинниками, що визначають вплив ПН на стійкість заводочутливих пристроїв (тобто відсутність помилкового спрацювання), є глибина провалу (в меншій мірі тривалість), склад навантаження мережі підприємства, а також рівень гармонік. Отже, нормувати необхідно допустиме значення деякої функції цих параметрів.

В останнє десятиріччя в електротехнічній практиці стає актуальним питання інтергармонік (ІГ) - гармонійних коливань, з частотами не кратними частоті живильної мережі. У амплітудно-частотному спектрі вони знаходяться між канонічними гармоніками або канонічними і неканонічними.

Виникнення ІГ у багатьох випадках зумовлено низькочастотними коливаннями, характерними для мереж з різкозмінними нелінійними навантаженнями, такими як електродугові сталеплавильні печі, зварювальні установки, частотно-регульовані джерела реактивної потужності, електроприводи з частотним регулюванням швидкості обертання. ІГ також є причиною появи додаткових втрат активної енергії, прискореного старіння ізоляції і в цілому зниження надійності електропостачання. У цехах з великою питомою вагою зварювальних агрегатів втрати електроенергії за рахунок ІГ досягають 3% величини втрат від канонічних гармонік.

Компенсація реактивної потужності (КРП) в електричних мережах дозволяє за рахунок оптимізації завантаження окремих ліній і підстанцій нормалізувати рівні напруги в дефіцитних з реактивної потужності районах, зняти обмеження на відключення окремих ліній у зв'язку з ліквідацією аварій та вивід їх в ремонт або на реконструкцію.

З огляду на порівняно високу економічну і енергетичну ефективність компенсації реактивної потужності, в промислово розвинених країнах їй приділяють велику увагу. Зокрема, у Франції, Швеції, Німеччині потужність конденсаторних установок становить 35% від активної пікової потужності, в США і Японії - близько 70%. В окремих енергокомпаніях США потужність встановлених пристроїв, що компенсують становить 100% від потужності генераторів. При цьому в багатьох країнах спостерігається тенденція зменшення видачі генераторами електростанцій реактивної потужності за рахунок збільшення частки реактивної потужності, що виробляється конденсаторами.

Коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi$ в режимі максимальних навантажень в США, Японії і більшості європейських країн в залежності від номінальної напруги мережі підтримується на рівні 0,2 - 0,4, що відповідає $\cos\varphi = 0,92 - 0,98$. В останні роки в багатьох енергосистемах США розподільні електричні мережі в режимі максимальних навантажень працюють з $\text{tg}\varphi = 0$. Компенсація реактивної потужності як і раніше залишається одним з пріоритетних заходів в розроблюваних в даний час програмах підвищення ефективності процесу передачі і розподілу електричної енергії.

Розрахунково-аналітичний аспект проблеми якості електроенергії в системах електропостачання пром підприємств має ряд специфічних особливостей, хоча загальноприйняте положення - розрахунок на підставі лінійних схем заміщення, в яких джерело електромагнітної перешкоди представляється у вигляді джерела струму або джерела ЕРС - залишається незмінним. Розрахунки виконуються як в детермінованій, так і в ймовірнісній постановці.

Важливим є питання про точність (або похибки) розрахунків, бо це багато в чому визначає методику розрахунків і їх обсяг. Можливості сучасної комп'ютерної техніки дозволяють проводити розрахунок в досить складних енергосистемах з урахуванням максимального числа факторів, проте в цьому випадку висока точність розрахунків далеко не завжди досягається в зв'язку з неповнотою і некоректністю вихідної інформації. Не завжди висока точність розрахунку, скажімо, з похибкою до 5%, є необхідністю. Визнання цих фактів зумовлює доцільність застосування досить простих методів розрахунку, в тому числі при машинному проектуванні. Так, в національній електротехнічній компанії Франції *EdF* для розрахунку несинусоїдальних режимів з метою вибору технічних засобів для зниження рівнів гармонік використовуються спрощені методики: активний опір визначається за значенням споживаної активної потужності і приймається незалежно від частоти, фази струмів гармонік джерел вважають співпадаючими і т.д.

Висока точність може бути досягнута за допомогою відомих спрощених методик, що виключають необхідність вдаватися до врахування максимального числа факторів; наприклад, при розрахунку несинусоїдальних режимів можна вважати амплітудно-частотну характеристику вузла мережі підприємства лінійною в діапазоні частот до 650 Гц, а опір елементів мережі визначати за усередненими значеннями.

При розрахунках несинусоїдальних режимів прийнято частотну характеристику активних опорів елементів мережі приймати з умов різкого прояву поверхневого ефекту. При цьому, як свідчить практика, напруги і струми гармонік можуть бути визначені з достатньою точністю для мереж 6-10 кВ. Однак оцінки цих параметрів в резонансних режимах і величин втрат, а також інших аспектів впливу гармонік на електрообладнання вимагають знання досить точних значень активних опорів. Вони повинні визначатися з

урахуванням не тільки поверхневого ефекту, а й ефекту близькості, впливу вихрових струмів, розподіленості параметрів і інших чинників.

Питання обліку амплітудно-частотних характеристик живильної енергосистеми в вузлі підключення промислових навантажень заслуговує на особливу увагу. Ця характеристика може вважатися лінійною, якщо до шин 6-10 кВ підприємства підключена ТЕЦ (блок-станція) або до вузла мережі 110 кВ і вище підключена потужна електростанція. Або якщо в мережі 6-10 кВ є потужний парк синхронних і асинхронних електродвигунів з встановленою потужністю не менше 100 МВА. В інших випадках врахування амплітудно-частотної характеристики є обов'язковим.

У разі складної розгалуженої мережі енергосистеми, в першому наближенні можна обмежитися урахуванням прилеглих ліній і їх навантажень. Взагалі питання про те, яку частину мережі можна не враховувати (відсікти) підлягає подальшій розробці. Розподіленість параметрів високовольтних повітряних ліній з похибкою не більше 1% можна не враховувати при довжині її 270 км і менше.

Централізована корекція несинусоїдальних режимів, рекомендована однією з останніх сесій CIGRE, в ряді випадків може виявитися більш доцільною в економічному відношенні. Ідея такої фільтрації гармонік полягає в розміщенні одного або декількох фільтрокомпенсуючих пристроїв на одній з підстанцій розподільної мережі, що забезпечує зниження несинусоїдальності до допустимих значень у всіх вузлах мережі. Використання централізованої корекції несинусоїдальних режимів в порівнянні з локальною забезпечує в конкретних випадках зниження втрат на 15-25%.

Розрахунок несиметричних режимів досить традиційний. До останнього часу не було ясності з визначенням значення опору зворотної послідовності вентильних перетворювачів. Суворий підхід, заснований на аналізі електромагнітних процесів в перетворювачі при несиметричних режимах, дав подвоєне значення опору прямої послідовності.

Слід зазначити, що безпосередній перерахунок значень коефіцієнта несиметрії для вузлів мережі, якщо відомо його значення в вузлі з джерелом несиметрії, неможливий. Необхідно визначити задаючий струм зворотної послідовності і вести розрахунок відомими методами. Розрахунок аналогічний випадку розрахунку гармонік, більш того, на практиці використовується єдина програма розрахунків.

Розрахунок амплітуди коливань напруги і оцінка допустимості їх у вузлах мережі підприємства відповідно до прийнятих в даний час підходів, заснований на імітуванні впливу коливань світлового потоку на прийняту модель органу зору людини. Аналіз коливань напруги різної форми кривих дозволяє оцінити ступінь цього впливу - інтенсивність або дозу флікера - тільки у випадку, якщо крива коливання напруги і її параметри відомі з достатньою точністю, тому прогноз очікуваного рівня коливань дуже ускладнений.

Для нормалізації показників ЯЕ застосовують технічні та організаційні заходи. Так, фільтрокомпенсуючі пристрої на базі простих режекторних або складних комбінованих фільтрів забезпечують фільтрацію вищих гармонік і компенсацію реактивної потужності. Ще більш широкими можливостями володіють активні і гібридні фільтри, за допомогою яких знижується також рівень інтергармонік. Швидкодіючі статичні компенсатори знижують рівень коливань напруги, але одночасно покращують гармонійний склад напруги мережі і знижують несиметрію.

Для поділу швидкозмінних і спокійних навантажень можуть використовуватися різні схеми і пристрої. Найбільш простою є схема, заснована на використанні здвоєного реактора: спокійні та швидкозмінні навантаження підключаються до різних секцій (обмоток) реактора. Застосування цього способу для підключення дугових печей і потужних електродвигунів дозволяє в ряді випадків забезпечити на шинах «спокійного» навантаження коливання, допустимі стандартом. Для різкозмінних і спокійних навантажень застосовуються також трансформатори з розщепленими обмотками.

Застосування тих чи інших технічних засобів в конкретних випадках обґрунтовується технічними показниками і економічними розрахунками.

Висновки

В даний час можна говорити про наближення до корінного вирішення проблеми якості електроенергії. Це стане можливим лише при розробці економічно обґрунтованих норм, методів і засобів мінімізації рівнів показників якості електроенергії, рішення правових питань проблеми, а в країнах з перехідною економікою - при підйомі економіки.

Перелік посилань

1. Papaika Yu., Pivnyak G., Zhezhelanko I. (2018). Energetychna efektyvnist system electropostachannya. Dnipro. Dnipro University of Technology. 149 p.
2. Papaika Yu., Pivnyak G., Zhezhelanko I. (2016). Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise power supply. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. № 5. 62-66.
3. Papaika Y., Lysenko O., Kosobudzki G. (2017). Power Quality and Resonances in Power Supply Systems with non-sinusoidal Loads. *Advanced engineering forum*, Trans Tech Publication, Switzerland. 143-150.
4. Pivnyak G. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G. Pivnyak, I. Zhezhelanko, Yu. Papaika // "Energy Efficiency improvement of geotechnical systems", Taylor&Francis Group (A Balkema Book). – 2013. – P. 11-18.

5. Інтелектуальні електричні мережі і елементи та режими. За ред. акад. НАН України О.В. Кириленко. – Інститут електродинаміки НАН України, 2016, 400 стр.
6. Pivnyak G.G. Transients in Electric Power Supply Systems: textbook for students of higher educational institutions / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; under the editorship of Academician of National Academy of Sciences of Ukraine Professor G.G. Pivnyak. – Switzerland: TTP. – 2016 – 382 p.p.
7. Жежеленко И.В. Оценочные методы определения экономического эквивалента реактивной мощности / И.В. Жежеленко, Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнич електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 98. – С. 3-6.
8. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, Ю.С. Саенко, Н.А. Нойбергер. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
9. Огляд енергетичної галузі за 2017 рік. – Всеукраїнська енергетична асамблея (ВЕА), 2018 рік

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы проблемы качества электроэнергии в современных системах электро-снабжения предприятий. Проведен анализ качества в нескольких странах мира.

Цель статьи - оценка состояния качества напряжения в промышленных электрических сетях с учетом резкого роста несимметричных и нелинейных нагрузок и определение зависимости потерь электроэнергии от показателей экономического развития страны.

Методика. При исследовании был использован метод экспертных оценок и методы статистического анализа для определения средних значений потерь электроэнергии.

Результаты. Научное объяснение высоким уровням потерь электроэнергии в развивающихся странах объясняется нерешенностью проблемы качества напряжения и очень низкими значениями натурального коэффициента мощности в промышленных, распределительных и магистральных электрических сетях.

Научная новизна. В статье представлен анализ проблем качества электроэнергии на данный момент и описывается важность решения этих проблем. Решения основываются, главным образом, на изменении уровня гармоник, влияющие на энергосистемы, и таким образом улучшается качество электроэнергии. В статье проводится анализ комплексного ухудшение качества напряжения в электрических сетях при изменении характера электрической нагрузки.

Практическая значимость. Нахождение закономерностей потерь электроэнергии от ВВП страны. Исследования проводятся для промышленных систем электроснабжения. На основе исследования определяются первоочередные задачи для решения проблемы низкого качества напряжения в Украине.

Ключевые слова: качество электроэнергии, системы электроснабжения, высшие гармоники, потери электрической энергии.

ABSTRACT

The article considers the problem of electricity quality in modern power supply systems of enterprises. The analysis of quality in several countries of the world is carried out.

The purpose of the article is to assess the state of voltage quality in industrial electrical networks, taking into account the sharp increase in asymmetric and nonlinear loads and to determine the dependence of electricity losses on the indicators of economic development of the country.

Method. The method of expert estimations and methods of statistical analysis were used to determine the average values of electricity losses.

Results. The scientific explanation for the high levels of electricity losses in developing countries is due to the unresolved problem of voltage quality and very low values of the natural power factor in industrial, distribution and main electricity networks.

Scientific novelty. The article presents an analysis of electricity quality problems at the moment and describes the importance of solving these problems. The solutions are based mainly on changing the level of harmonics that affect the power systems, and thus improve the quality of electricity. The article analyzes the complex deterioration of voltage quality in electrical networks when changing the nature of the electrical load.

Practical significance. Finding patterns of electricity losses and GDP of the country. Research is conducted for industrial power supply systems. Based on the research, the priority tasks for solving the problem of low voltage quality in Ukraine are determined.

Key words: electricity quality, power supply systems, higher harmonics, electricity losses.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Випанасенко С.І.

УДК 621.35.231

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ ПРИ ОДНОПОЛЮСНОМ ТОРКАННІ В МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

В.С. Хілов

Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
khilov.v.s@nmu.one, ORCID 0000-0002-5583-4323

COMPENSATION EFFICIENCY ANALYSIS OF CAPACITIVE CURRENTS WHEN SINGLE-POLE TOUCHING IN A NETWORK WITH INSULATED NEUTRAL

V. Khilov

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
khilov.v.s@nmu.one, ORCID 0000-0002-5583-4323

Анотація. Метою роботи є оцінка діапазонів змін напруги зсуву нейтралі, уражаючих напруг і струму в мережах з ізолюованою нейтраллю як без компенсації, так і з компенсацією ємнісних струмів. В дослідженні використовувалось методи аналізу теорії лінійних електричних кіл. У результаті роботи отримано аналітичні співвідношення для струмів і напруг при однополюсного торканні в мережах з ізолюованою нейтраллю. Оцінений діапазон змін опорів мережі. Встановлено закономірності зміни уражає напруги і струму в залежності від параметрів мережі. Практичним значенням результатів роботи є розробка рекомендацій на створення пристроїв компенсації і пристроїв захисту при однополюсному торканні в мережі з ізолюованою нейтраллю.

Ключові слова: трифазна трипровідна мережа, наруга зсуву, уражаючі напруга та струм, активний опір, ємність мережі, індуктивність компенсуючого дроселя.

Вступ. При електрифікації гірничих підприємств застосовуються трифазні електричні мережі з ізолюованою нейтраллю трансформаторів [1, 2]. У таких мережах струми витоку і струм, що проходить через тіло людини при його однополюсного доторку до струмоведучих частин, цілком визначаються опорами ізоляції і ємностями мережі щодо землі [3, 4].

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Схема заміщення мережі з ізолюованою нейтраллю відома [5-10] та зображена на рис.1. На рисунку прийняті наступні позначення: $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ – комплексні значення діючих величин електрорухомих сил джерела енергії; N, n – загальні точки фаз на джерелі живлення і на навантаженні (землі); R_A, R_B, R_C – активні опори окремих фаз мережі щодо землі; C_A, C_B, C_C – ємності окремих фаз мережі щодо землі; L_a, L_b, L_c – індуктивності окремих фаз компенсуючого дроселя щодо землі; R_a, R_b, R_c – активні опори окремих фаз компенсуючого дроселя щодо землі; r_c – активний опір тіла людини при торканні фази C.

Формулювання мети і завдань досліджень. Метою роботи є оцінка діапазонів змін напруги зсуву нейтралі, уражаючих напруг і струму в мережах з ізолюованою нейтраллю як без компенсації, так і з компенсацією ємнісних струмів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані і вирішені наступні завдання досліджень:

- отримати аналітичні співвідношення для струмів і напруг при однополюсного торканні в мережах з ізолюованою нейтраллю;
- оцінити діапазон змін опорів мережі;
- встановити закономірності зміни уражаєчих напруги і струму в залежності від параметрів мережі.

Методика досліджень. З точки зору теорії лінійних кіл схема заміщення являє собою трифазну трипровідну мережу за схемою зірка - зірка без нульового проводу з симетричним джерелом живлення і несиметричним навантаженням. Аналіз роботи такої схеми доцільно проводити методом вузлових потенціалів з визначенням напруги зсуву між нейтральними точками джерела енергії та землі [11-13].

Викладення основного матеріалу. Повні опору провідників мережі $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ щодо землі

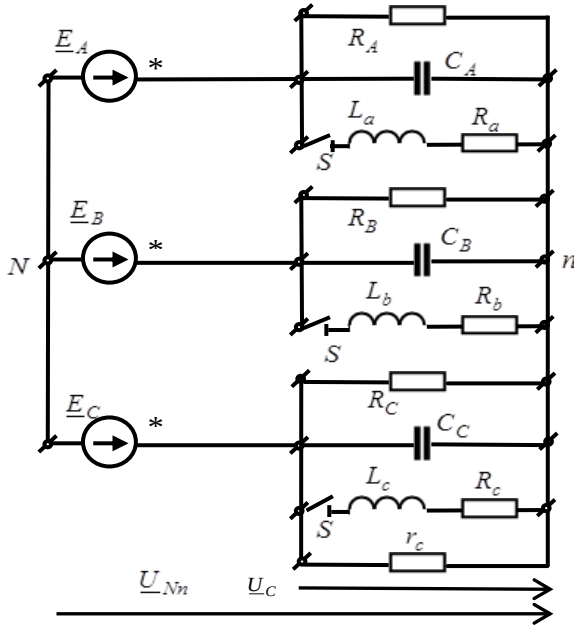
$$\underline{Y}_A = G_A + j\omega C_A, \underline{Y}_B = G_B + j\omega C_B, \underline{Y}_C = G_C + j\omega C_C,$$

де активні опори $G_A = R_A^{-1}, G_B = R_B^{-1}, G_C = R_C^{-1}$ щодо землі; ω – кутова частота; $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Напруга зсуву нейтралі при торканні фази C

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C + \underline{E}_C g_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + g_C}.$$

Якщо прийняти однакові провідності $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}$ щодо землі та ввести $g_C = r_C^{-1}$ – провідність



торкання, то напруга зміщення нейтралі буде $\underline{U}_C = \underline{E}_C g_C / (3\underline{Y} + g_C)$.

При торканні фазного проводу C людиною, вона потрапляє під дію напруги

$$\begin{aligned} \underline{U}_C &= \underline{E}_C - \underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C - \underline{E}_C \frac{g_C}{3\underline{Y} + g_C} = \\ &= \underline{E}_C \frac{3\underline{Y}}{3\underline{Y} + g_C}, \end{aligned}$$

якщо витримується співвідношення $g_C \ll 3\underline{Y}$, то $\underline{U}_C = \underline{E}_C$ і до тіла людини прикладається фазна напруга. Чим менше опір (більше провідність) торкання $g_C \gg 3\underline{Y}$, тим меншу напругу потрапляє тіло людини.

Людина потрапляє під дію струму

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{r_C} = \underline{E}_C \frac{3\underline{Y}}{3\underline{Y} + g_C} g_C.$$

Рисунок 1 – Схема заміщення трифазної мережі з ізольованою нейтраллю

Зараз в мережах з ізольованою нейтраллю контроль стану ізоляції і захисне відключення здійснюється за допомогою спеціальних апаратів

[5, 6]. У цих апаратах для зниження струму через тіло людини застосовується компенсація ємнісної складової цього струму. Досягається це включенням в мережу компенсуючих дроселів L_a, L_b, L_c (рис.1, ключі S замкнуті). Для такої схеми напруга зсуву нейтралі

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{E}_A (G_A + j\omega C_A + (R_a + j\omega L_a)^{-1}) + \underline{E}_B (G_B + j\omega C_B + (R_b + j\omega L_b)^{-1}) + \underline{E}_C (G_C + j\omega C_C + (R_c + j\omega L_c)^{-1}) + \underline{E}_C g_C}{G_A + j\omega C_A + (R_a + j\omega L_a)^{-1} + G_B + j\omega C_B + (R_b + j\omega L_b)^{-1} + G_C + j\omega C_C + (R_c + j\omega L_c)^{-1} + g_C}.$$

Якщо прийняти фазні провідності G_A, G_B, G_C , ємності C_A, C_B, C_C і індуктивності L_a, L_b, L_c однаково, то напруга зміщення нейтралі

$$\underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C g_C / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C).$$

Напруга торкання фази C

$$\begin{aligned} \underline{U}_C &= \underline{E}_C - \underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C - \underline{E}_C g_C / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C) = \\ &= \underline{E}_C (3G_C + 3j\omega C_C) / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C). \end{aligned}$$

Величина уражаючої струму

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{r_C} = \underline{E}_C g_C (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c)) / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C).$$

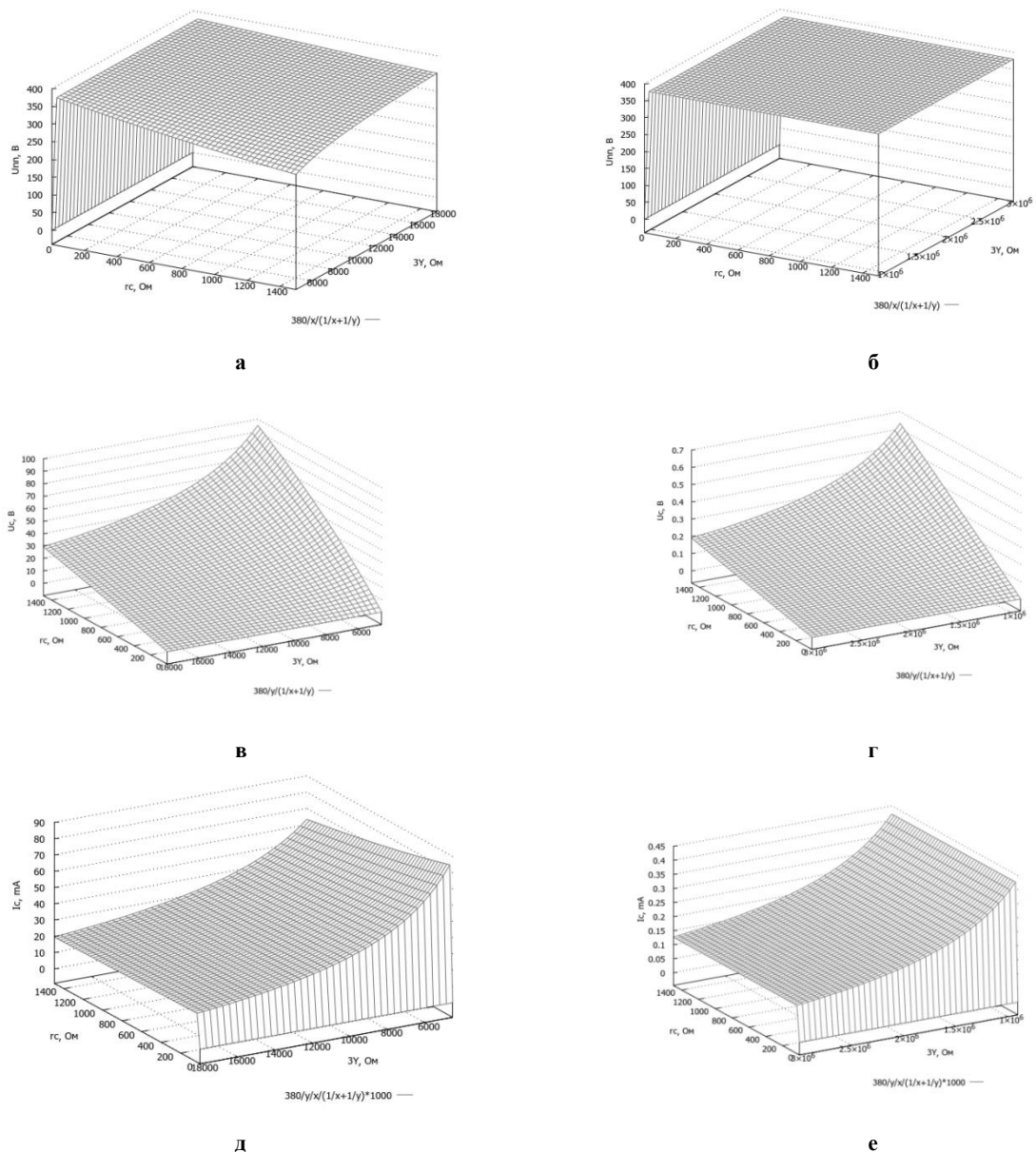


Рисунок 2 – Залежності зсуву нейтральної напруги (а, б – за наявності компенсуючих дроселів), напруги торкання (в, г- за наявності компенсуючих дроселів), струму торкання (д, е- за наявності компенсуючих дроселів)

За виконанням двох умов та $j\omega C_s = 1/j\omega L_a$ у трифазній мережі виникає явище резонансу струмів. Напруга зсуву нейтралі прагнучим до значення фазної електрорушійної сили ЕС, вражаючи напруга і струм прагнутимуть до нуля при виконанні умови $3G_C \ll g_c$. Однак реальні дроселі індуктивності мають кінцеві внутрішні активні опори, що призводить до погіршення компенсуючих властивостей ємнісних струмів при однофазному дотуку ланцюга з ізолюваною нейтраллю.

Отримані аналітичні співвідношення дозволяють оцінити діапазон зміни величини вражаючого струму, а також ефективність компенсації ємнісних струмів при однофазному торканні мережі з ізолюваною нейтраллю.

Обираємо діапазон зміни параметрів, що відповідає найбільш розповирием мережам з ізолюваною нейтраллю [5-10].

Діапазон зміни параметрів:

- величина ємності на фазу 0,5мкФ ... 1,5мкф;
- активний опір струмів витоку на фазу 0.5Мом ... 1.5 Мом;
- модуль повного опору для струмів витоку на фазу 1.5 Ком ... 6.0Ком;
- активний опір тіла людини 0.5 Ком ... 1.5 Ком.

У виділеному діапазоні зміни параметрів прораховані напруги зсуву нейтралі, напруги і струми доторкання, рис.2.

Висновки. Аналіз кількісних параметрів надає підстави встановити наступні закономірності:

- напруга зсуву нейтралі прагне до значення фазної напруги до якої зроблено торкання;
- зменшення опору тіла людини зі збільшенням повного опору фази веде до зменшення значення напруги зсуву нейтралі, а отже до підвищення електротравматизму;
- підключення компенсуючих дроселів дозволяє істотно збільшити величину напруги зсуву нейтралі, що сприятливо позначається на зменшенні електротравматизму;
- найбільш несприятливе співвідношення опорів – це мале значення повного опір мережі та великий опір тіла людини, що у решті призводить до великого значення напруги торкання, яке може доходити до 100 В за відсутності компенсуючих дроселів;
- наявність у схемі компенсуючих дроселів дозволяє знизити напругу торкання на три порядки;
- уражаюча сила струму збільшується зі збільшенням опору тіла людини і зменшенням значення повного опору струмів витоку, яка може доходити до значення 80 мА;
- під'єднання компенсуючих дроселей дозволяє знизити величину уражаючого струму на три порядки;
- наявність активних опорів в повному опорі для струмів витоку і компенсуючих дроселів істотно зменшує ефективність компенсації ємнісних струмів з одночасним збільшенням значення уражаючого струму.

Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей змін значень уражаючих напруг і струмів у обраному діапазоні змін параметрів живлячої мережі.

Практичне значення результатів роботи є встановлення того, що при розробці пристроїв компенсації і пристроїв захисту необхідно брати до уваги вплив активних опорів елементів мережі на умову компенсації ємнісних струмів у мережах з ізолюваною нейтралю.

Список літератури

- 1.Дзюбан В. С. Справочник энергетика угольной шахты. [Текст] / В. С. Дзюбан, И. Г. Ширнин, Б. Н.Ванеев, В. М. Гостищев. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001 – 512 с.
2. Вареник Є.О. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок [Текст] / Є.О. Вареник, С.І. Випа-насенко, В.С. Дзюбан, Н.А. Шидловська, Ф.П. Шкрабець. – Д.: Національний гірничий університет, 2004 – 334 с.
- 3.Півняк Г.Г. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт [Текст] / Г.Г. Півняк, Ф.П.Шкрабець, В.Т.Заїка, Ю.Т.Разумний. – Д.: Національний гірничий університет, 2004 – 206 с.
- 4.Шкрабець Ф.П. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях [Текст] / Ф.П. Шкрабець, Н.А. Шид-ловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник – Д.: Национальный горный университет, 2003 – 151 с.
5. ДСТУ ГОСТ 31612-2012 Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования.
- 6.Цапенко Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей [Текст] / Е.Ф. Цапенко, Л.И.Сычев, П.Н.Кулешов. – М.: Недра, 1988 – 213 с.
7. Дзюбан В.С. Справочник энергетика угольной шахты [Текст] / Дзюбан В.С., Риман Я.С., Маслий А.К. – М., Недра, 1983 – 542 с.
- 12.Пивняк Г.Г. Несимметричные повреждения в электрических цепях [Текст] / Пивняк Г.Г., Шкрабець Ф.П. – М.: Не-дра, 1993 – 192 с.
- 8.Півняк Г.Г. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт [Текст] / Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П., Заїка В.Т., Разумний Ю.Т. – Д.: Національний гірничий університет, 2004 – 206 с.
- 9.Шкрабець Ф.П. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях [Текст] / Ф.П. Шкрабець, Н.А. Шид-ловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник – Д.: Национальный горный университет, 2003 – 151 с.
10. Khilov V.S. Theoretical Fndamentals of Eectrical Engineering. Ministry of Since and Education of Ukraine/ National Mining University. – Д.: Національний гірничий університет, 2018 – 467 с.
11. Хілов В.С. Дослідження можливостей використання інформаційно-вимірювальної системи для визначення скла-дових частин опору ізоляції кабельної мережі [Текст] / В.С. Хілов, К.П.Фофанов – Гірнича електромехані-ка та авто-матика. Дніп-ропетровськ, ДВНЗ, 2015, №94, с. 21-24.
12. Хілов В.С. Влияние центрального токопровода на емкость кабельной линии [Текст] / В.С. Хілов, К.П.Фофанов – Електротехнические комплексы и системы. Киев, Наука и техника, 2016, №19(95), с. 79-83.
13. Хілов В.С. Дослідження можливостей використання методу дзеркальних відо-бражень для визначення ємного-го опору ізоляції кабельної мережі Форум гірників [Текст] / В.С. Хілов, К.П.Фофанов – Дніпропетровськ, ДВНЗ, 2015, №3, с. 181-186.

Аннотация

Целью работы является оценка диапазонов изменений напряжения смещения нейтрали, поражающих напряжений и тока в сетях с изолированной нейтралью как без компенсации, так и с компенсацией емкостных токов. В исследовании использовались **методы анализа** теории линейных электрических цепей. В результате работы получены аналитические соотношения для токов и напряжений при однополюсного касания в сетях с изолированной нейтралью. Оценка диапазон изменений сопротивлений сети. **Уста-новлены** закономерности изменения поражает напряжения и тока в зависимости от параметров сети.

Практическим значением результатов работы является разработка рекомендаций на создание устройств компенсации и устройств защиты при однополюсном касании в сети с ограждена нейтралью.

Ключевые слова: *трехфазная трехпроводная сеть, надругательство сдвига, поражающие напряжение и ток, активное сопротивление, емкость сети, индуктивность компенсирующего дросселя.*

ABSTRACT

The aim of the work is to estimate the ranges of changes of neutral bias voltage, striking voltages and current in networks with isolated neutral both without compensation and with compensation of capacitive currents. The methods of analysis of the theory of linear electric circuits were used in the research. As a result of work analytical relations for currents and voltages at unipolar contact in networks with the isolated neutral are received. The range of changes in network resistances is estimated. Regularities of change of striking voltage and current depending on network parameters are established. The practical significance of the results of the work is the development of recommendations for the creation of compensation devices and protection devices for unipolar contact in a network with isolated neutral.

Key words: *three-phase three-wire network, bias voltage, striking voltage and current, active resistance, network capacity, inductance of compensating inductor.*

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, професором Луценко І.М.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 517.442

ПОХИБКИ ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДУ ІНТЕГРУВАННЯ ФУНКЦІЙ КОМПЛЕКСНОЇ ЗМІННОЇ

А.В. Кожевников¹, Л.І. Мещеряков²

¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
kozhevnykov.a.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-0078-2546

² Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
meshcheriakov.l.i@nmu.one, ORCID 0000-0002-9579-1970

ERRORS OF COMPLEX VARIABLE FUNCTION NUMERICAL INTEGRATION METHOD

A. Kozhevnykov¹, L. Meshcheryakov²

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,

¹ kozhevnykov.a.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-0078-2546

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,

² meshcheriakov.l.i@nmu.one, ORCID 0000-0002-9579-1970

Анотація. Метою роботи є отримання й аналіз співвідношень для похибок, які виникають під час чисельного інтегрування функцій комплексної змінної. При дослідженні використовувалися методи математичного аналізу, теорії наближених обчислень та теорії функцій комплексної змінної. У результаті роботи отримані аналітичні співвідношення для розрахунку похибок чисельного інтегрування функцій комплексної змінної: модуля локальної похибки на кожному кроці інтегрування, а також істинного, наближеного та верхнього граничного значення модуля похибок за контуром інтегрування. Верифікація отриманих формул абсолютної похибки чисельного інтегрування функцій комплексної змінної проводилася на прикладі обчислення інтегралу, який має аналітичне розв’язування. Побудовані та проаналізовані залежності похибок від модуля кроку інтегрування. Для малих значень модулю кроку істинне значення модулю похибки добре збігається з наближеним. Для максимального значення модуля кроку, який відповідає обчисленню інтеграла за один крок, наближене значення модуля похибки збігається зі значенням оцінки його верхнього граничного значення. Графік залежності логарифму верхнього граничного значення модуля похибки від логарифму модуля кроку інтегрування має лінійний характер. Проведене обчислення похибок чисельного методу розрахунків перехідної функції системи автоматичного регулювання з ПД-ПІД-контроллером. Порівняння результатів, отриманих аналітичним та чисельним методами, доводить хорошу узгодженість чисельного розв’язку з аналітичним у межах обчислених похибок. Наукова новизна роботи полягає в отриманні аналітичних співвідношень для розрахунку похибок чисельного інтегрування функцій комплексної змінної: модуля локальної похибки на кожному кроці інтегрування, а також наближеного та верхнього граничного значення модуля похибок за контуром інтегрування. Практичним значенням результатів роботи є можливість отримання напередвизначених похибок чисельного інтегрування функцій комплексної змінної за рахунок вибору кроку інтегрування, що може бути використано для покращення якості аналізу перехідних процесів у електротехнічних системах та системах автоматичного регулювання.

Ключові слова: чисельне інтегрування, функція комплексної змінної, похибка чисельного методу, зворотне перетворення Лапласа.

Вступ. При розв’язанні низки прикладних задач електротехніки, електроніки, теорії автоматичного керування і теплофізики використовуються чисельні методи функцій комплексної змінної. До останніх, зокрема, відносяться методи розв’язання диференціальних рівнянь з використанням перетворень Лапласу. Такі методи, що одержали назву операторних, дозволяють приводити диференціальні рівняння, в які входить шукана функція-оригінал, до вигляду алгебраїчних щодо зображення цієї функції. Отримані рівняння вирішуються відносно функції-зображення, після чого остаточний результат знаходиться шляхом переходу від отриманого зображення до оригіналу. Останній етап рішення є найбільш складним, що

обумовлено неможливістю аналітичного розв'язування задач зворотного перетворення в загальному випадку, а також проблемами збіжності і стійкості чисельних методів розв'язання таких задач.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Найбільш просто задача зворотного перетворення Лапласа вирішується аналітично, в тому разі, якщо зображення рішень є дрібно-раціональні функції. При цьому застосовується розкладання зображень на елементарні дробі і їх почленний перехід у простір оригіналів з використанням властивості лінійності перетворення. Однак, при значному числі полюсів зображення використання такого підходу призводить до громіздких обчислень. Крім того, при розв'язанні операторними методами диференціальних рівнянь у часткових похідних можуть виникати зображення, які не є дрібно-раціональними, зокрема, мероморфні функції. Під останніми розуміються функції комплексної змінної, аналітичні у всій площині, за винятком ліченої множини ізольованих полюсів. У таких випадках отримання оригіналів зображень можуть бути використані чисельні методи зворотного перетворення Лапласа. Питанням обґрунтування вибору чисельного методу зворотного перетворення Лапласа для знаходження оригіналів мероморфних функцій з кінцевим числом полюсів стосовно задач розв'язання хвильових рівнянь, які описують перехідні процеси в довгих лініях, присвячена робота [1]. У ній зроблений порівняльний аналіз найбільш поширених чисельних методів зворотного перетворення Лапласа, а також запропонований і обґрунтований метод знаходження оригіналів мероморфних функцій з кінцевим числом полюсів. Метод базується на чисельному визначенні інтегралу за замкненим контуром, що охоплює полюса зображення. Цей метод отримав подальший розвиток у роботі [2], де, за його допомогою, був проведений розрахунок перехідної функції системи автоматичного регулювання нестійкого об'єкта третього порядку з ПД-ПД-контроллером. Також були розглянуті особливості інтегрування функцій комплексної змінної за контурами різної форми. Втім, наразі, в інформаційних джерелах відсутня інформація про похибки чисельного інтегрування функцій комплексної змінної.

Формулювання мети і завдань досліджень. Метою роботи є отримання й аналіз співвідношень для похибок, які виникають при чисельному інтегруванні функцій комплексної змінної.

Для досягнення поставленої мети були: отримані аналітичні співвідношення для розрахунку похибок чисельного інтегрування функцій комплексної змінної, проаналізовані залежності похибок від модуля кроку інтегрування, визначені похибки чисельного методу розрахунків перехідної функції системи автоматичного регулювання з ПД-ПД- контроллером та порівняні результати, отримані аналітичним та чисельним методами.

Методика досліджень. При дослідженнях використовувалися методи математичного аналізу, теорії наближених обчислень та теорії функцій комплексної змінної.

Викладення основного матеріалу досліджень. Визначення похибки чисельного інтегрування функції комплексної змінної розглянуто на прикладі квадратурного методу середніх прямокутників з використанням підходу, який наведений в роботі [2]. Для даного методу абсолютна похибка, яка виникає під час інтегруванні функції $f(z)$ за довільним контуром Γ , становить

$$|R_0| = \left| \int_{\Gamma} f(z) dz - \sum_{i=1}^N f \left\{ z_0 + \sum_{i=1}^N \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta z_i \right] \right\} \cdot \Delta z_i \right|. \quad (1)$$

Тут Δz_i – приріст аргумента на i – му кроці інтегрування, z_0 – початкова точка контура Γ .

З іншого боку, з урахуванням правил наближених обчислень, максимальне значення похибки згідно формули (1) можна визначити як суму абсолютних значень похибок R_i на кожному кроці (локальних похибок), тобто

$$|R| = \sum_{i=1}^N |R_i|, \quad (2)$$

яка не перевищує значення

$$|R_{\max}| = \sum_{i=1}^N \max_{\Gamma} |R_i|. \quad (3)$$

Знайдемо величину R_i . Для цього розкладемо функцію $f(z)$ в околиці крапки

$$z_{i-\frac{1}{2}} = z_0 + \sum_{i=1}^i \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta z_i, \quad (4)$$

і запишемо

$$\begin{aligned} f(z) = & f\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) + f'\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \left(z - z_{i-\frac{1}{2}}\right) + \frac{1}{2!} \cdot f''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \left(z - z_{i-\frac{1}{2}}\right)^2 + \\ & + \frac{1}{3!} \cdot f'''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \left(z - z_{i-\frac{1}{2}}\right)^3 + O(\Delta z_i^4). \end{aligned} \quad (5)$$

Тут $\Delta z_i = z_i - z_{i-1} = 2 \cdot \left(z_i - z_{i-\frac{1}{2}}\right) = -2 \cdot \left(z_{i-1} - z_{i-\frac{1}{2}}\right)$ – приріст незалежної змінної на i – му кроці інтегрування.

Інтегруючи функцію $f(z)$ на сегменті $[z_{i-1}, z_i]$, маємо

$$\begin{aligned} \int_{z_{i-1}}^{z_i} f(z) dz = & f\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot z \Big|_{z_{i-1}}^{z_i} + \frac{1}{2} \cdot f'\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \left(z - z_{i-\frac{1}{2}}\right) \Big|_{z_{i-1}}^{z_i} + \\ & + \frac{1}{6} \cdot f''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \left(z - z_{i-\frac{1}{2}}\right)^3 \Big|_{z_{i-1}}^{z_i} + \frac{1}{24} \cdot f'''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \left(z - z_{i-\frac{1}{2}}\right)^4 \Big|_{z_{i-1}}^{z_i} + \\ & + O(\Delta z_i^5) = f\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \Delta z_i + \frac{1}{2} \cdot f'\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \left[\left(\frac{\Delta z_i}{2}\right)^2 - \left(-\frac{\Delta z_i}{2}\right)^2\right] + \\ & + \frac{1}{6} \cdot f''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \left[\left(\frac{\Delta z_i}{2}\right)^3 - \left(-\frac{\Delta z_i}{2}\right)^3\right] + \frac{1}{24} \cdot f'''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \left[\left(\frac{\Delta z_i}{2}\right)^4 - \left(-\frac{\Delta z_i}{2}\right)^4\right] + \\ & + O(\Delta z_i^5) = \left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \Delta z_i + \frac{\Delta z_i^3}{24} \cdot f''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) + O(\Delta z_i^5). \end{aligned} \quad (6)$$

При малих значеннях Δz_i , нехтуючи останнім членом виразу (6), який має більш високий порядок малості порівняно з іншими, можна записати

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i} f(z) dz = f\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \cdot \Delta z_i + R_i. \quad (7)$$

При цьому модуль абсолютної похибки чисельного інтегрування

$$|R_i| = \frac{|\Delta z_i^3|}{24} \cdot \left| f''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \right| = \frac{\Delta r_i^3}{24} \cdot \left| f''\left(z_{i-\frac{1}{2}}\right) \right|. \quad (8)$$

Тут $\Delta z_i = \Delta r_i \cdot \exp(j \cdot \Delta \varphi_i)$, де Δz_i , $\Delta \varphi_i$ – приріст модуля та аргумент прирісту незалежної змінної на i – му кроці інтегрування. У разі, якщо модуль кроку інтегрування є постійним $\Delta z_i = \Delta r$, то з урахуванням виразів (2) та (3) можна записати

$$\begin{aligned}
 |R_{\max}| &\leq \sum_{i=1}^N \frac{\Delta r^3}{24} \cdot \max_{\Gamma} |f''(z)| = \frac{\Delta r^2}{24} \cdot \max_{\Gamma} |f''(z)| \cdot \sum_{i=1}^N \Delta r = \\
 &= \frac{\Delta r^2 \cdot L(\Gamma)}{24} \cdot \max_{\Gamma} |f''(z)|,
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

де $L(\Gamma)$ – довжина контуру інтегрування, $\max_{\Gamma} |f''(z)|$ – максимальне значення другої похідної підінтегральної функції вздовж контуру інтегрування. У разі чисельного задання функції $f(z)$ остання величина може бути обчислена за допомогою кінцевих різниць

$$\max_{\Gamma} |f^{(k)}(z)| \approx \frac{\max_{\Gamma} |\Delta^{(k)}(z_i)|}{\Delta r^k},
 \tag{10}$$

де $\Delta^{(k)}(z_i)$ – кінцева різниця k -го порядку, яка може бути рекурентно розрахована за допомогою кінцевих різниць нижчих порядків як

$$\Delta^{(k)} f(z_i) = \Delta^{(k-1)} f(z_{i+1}) - \Delta^{(k-1)} f(z_i).
 \tag{11}$$

Верифікація отриманих формул абсолютної похибки чисельного інтегрування функцій комплексної змінної розглядалася на прикладі обчислення інтегралу $\int_0^{2(1+j)} z^4 dz = \frac{32}{5}(1+j)^5$. На рис. 1 наведені отримані залежності похибок чисельного інтегрування $|R_0|$, $|R|$, $|R_{\max}|$ за формулами (1) – (3) від модуля кроку інтегрування. З графіків випливає, що, для малих значень модулю кроку, істинне значення модуля похибки $|R_0|$ добре збігається з наближенням $|R|$. З іншого боку, для максимального значення модуля кроку, який відповідає обчисленню інтеграла за один крок, наближене значення модуля похибки $|R|$ збігається зі значенням оцінки його верхнього граничного значення $|R_{\max}|$. Це є цілком природнім, оскільки при одному кроці інтегрування, формула (2) переходить у формулу (3). Графік залежності логарифму модуля похибки $|R_{\max}|$ від логарифму модуля кроку інтегрування очікувано має лінійний вигляд.

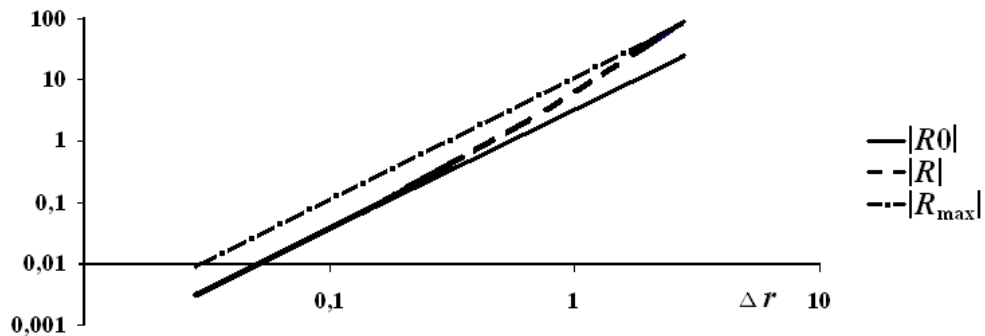


Рисунок 1 – Графіки залежностей похибок чисельного інтегрування від модулю кроку інтегрування

Ще одним прикладом використання розробленого математичного апарату є розрахунок перехідної функції системи автоматичного регулювання нестійкого об'єкту третього порядку з ПД-ПД-контролером [3], який був розглянутий у роботі [2] без урахування виникаючих похибок. Структурна схема системи зображена на рис. 2.

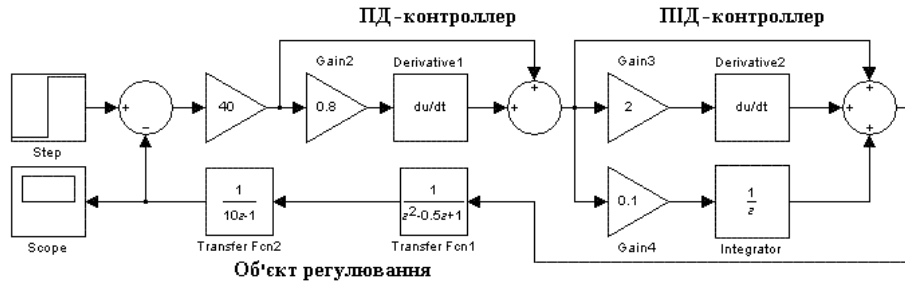


Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання з ПД-ПД-контроллером

В роботі показано, що система є стійкою, а зображення перехідної функції системи має вигляд

$$F(z) = \frac{1}{z} - \frac{-18,8 + 8,23z}{10(z^2 + 5,45z + 10,1)} - \frac{-0,025 + 1,77z}{10(z^2 + 0,398z + 0,04)}. \quad (12)$$

Функція $F(z)$ має п'ять полюсів: 0 , $-2,7 \pm 1,68j$, $-0,2 \pm 0,014j$. Оригінал перехідної функції $u(t)$ для зображення $F(z)$ визначався шляхом численного інтегрування за виразом

$$u(t) = \oint_{\Gamma} \exp(z \cdot t) \cdot F(z) dz. \quad (13)$$

Інтегрування здійснювалося за замкненим прямокутним контуром Γ , який охоплює всі полюси зображення і складається з відрізків прямих: $\text{Re}(z) = -3$, $\text{Re}(z) = -3$, $\text{Im}(z) = -2$, $\text{Im}(z) = 2$, модуль кроку інтегрування $\Delta t = 0,04$. Слід зазначити, що, оскільки при обчисленні зворотного перетворення Лапласа, як підінтегральна буде функція $\exp(z \cdot t) \cdot F(z)$, то друга похідна функції, яка використовується при розрахунку величини $|R_{\max}|$ за формулою (9), має вигляд

$$f''(z, t) = \exp(z \cdot t) \cdot F''(z) + 2 \cdot t \cdot \exp(z \cdot t) \cdot F'(z) + t^2 \cdot \exp(z \cdot t) \cdot F(z). \quad (14)$$

На рис. 3 зображено графіки перехідної функції системи автоматичного регулювання, які були отримані аналітичним та чисельним методами.

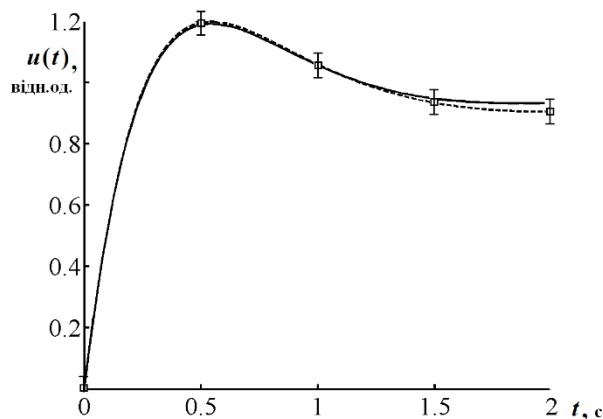


Рисунок 3 – Графіки перехідної функції системи автоматичного регулювання, отримані шляхом розрахунку методами: — аналітичним, ----- чисельним

На графік, який відповідає чисельному методу нанесені похибки інтегрування $|R_{\max}|$. Наведені на рис. 3 криві доводять добру узгодженість чисельного методу розрахунку з аналітичним у межах обчислених похибок.

Висновки.

Таким чином в роботі:

1. Отримані аналітичні співвідношення для розрахунку похибок чисельного інтегрування функцій комплексної змінної: модуля локальної похибки на кожному кроці інтегрування, а також істинного, наближеного та верхнього граничного значень модуля похибок за контуром інтегрування. Проаналізовані залежності похибок від модуля кроку інтегрування.

2. За допомогою розробленого раніше методу зворотного перетворення Лапласа на основі чисельного інтегрування та розрахунків перехідної функції системи автоматичного регулювання з ПД-ПІД-контролером, обчислені похибки чисельного методу, які порівнювалися з результатами, отриманими аналітичним методом.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні аналітичних співвідношень для розрахунку похибок чисельного інтегрування функцій комплексної змінної: модуля локальної похибки на кожному кроці інтегрування, а також наближеного та верхнього граничного значення модуля похибок за контуром інтегрування.

Практичним значенням результатів роботи є надана ними можливість отримання напередвизначених похибок чисельного інтегрування функцій комплексної змінної за рахунок вибору кроку інтегрування, що може бути використано для покращення якості аналізу перехідних процесів у електротехнічних системах та системах автоматичного регулювання.

Список літератури

1. Кожевников А.В. Обоснование выбора численного метода обратного преобразования Лапласа для нахождения оригиналов мероморфных функций с конечным числом полюсов [Текст] / Г.Е. Денисова, А.В. Кожевников // Збірник наукових праць: научн.-техн. сб. – Днепропетровск: НГУ, 2007. – № 27 – С. 184 – 192.
2. Кожевников А. В. Применение численного метода обратного преобразования Лапласа при анализе систем автоматического регулирования [Текст] / Г.Е. Кожевников А. В., Цвиркун Л.И. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.–техн. зб.– Дніпропетровськ: НГУ, 2017. – Вып.98 – С. 41 – 45.
3. Федосов Б. Т. О стабилизации линейных неустойчивых объектов охватом их обратной связью: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://model.exponenta.ru/bt/bt_1315_Stab_NeUst.htm#L11.

Аннотация. Целью работы является получение и анализ соотношений для ошибок, возникающих при численном интегрировании функций комплексной переменной. При исследованиях использовались методы математического анализа, теории приближенных вычислений и теории функций комплексного переменного. В результате исследований получены аналитические соотношения для расчета погрешностей численного интегрирования функций комплексной переменной: модуля локальной погрешности на каждом шаге интегрирования, а также истинного, приближенного и верхнего предельного значения модуля погрешностей по контуру интегрирования. Верификация полученных формул абсолютной погрешности численного интегрирования функций комплексной переменной проводилась на примере вычисления интеграла, который имеет аналитическое решение. Построены и проанализированы зависимости погрешностей от модуля шага интегрирования. Для малых значений модуля шага истинное значение модуля погрешности хорошо соответствует приближенному. Для максимального значения модуля шага, который соответствует вычислению интеграла за один шаг, приближенное значение модуля погрешности совпадает со значением оценки его верхнего порогового значения. График зависимости логарифма модуля верхнего граничного значения погрешности от логарифма модуля шага интегрирования имеет линейный характер. Проведены вычисления погрешностей численного метода расчетов переходной функции системы автоматического регулирования с ПД-ПИД-контроллером. Сравнение результатов, полученных аналитическим и численным методами показывает хорошую согласованность численного решения с аналитическим в пределах вычисленных ошибок. Научная новизна работы заключается в получении аналитических соотношений для расчета погрешностей численного интегрирования функций комплексной переменной: модуля локальной погрешности на каждом шаге интегрирования, а также приближенного и верхнего предельного значения модуля погрешностей по контуру интегрирования. Практическая значимость результатов работы состоит в предоставленной возможности получения предопределенных погрешностей численного интегрирования функций комплексной переменной за счет выбора шага интегрирования, что может быть использовано для улучшения качества анализа переходных процессов в электротехнических системах и системах автоматического регулирования.

Ключевые слова: численное интегрирование, функция комплексной переменной, погрешность численного метода, обратное преобразование Лапласа.

Annotation. The purpose of work of this work is to obtain and analyze the relations for errors that occur during the numerical integration of functions of a complex variable. The research methods has been used are: mathematical analysis, the theory of approximate calculations and the theory of functions of a complex variable. As a research results, we obtain analytical relations for calculating the errors of complex variable function numerical integration: the modulus of local error at each integration step, as well as the true, approximate and upper limit values of the modulus of errors on the integration contour. Verification of the obtained formulas of absolute errors of complex variable function numerical integration was carried out on the example of calculation of an integral which has an analytical solution. The dependences of the errors on the module of the integration step has been constructed and analyzed. For small values of the step modulus, the true value of the error modulus corresponds well to the approximation. For the maximum value of the modulus of the step, which corresponds to the calculation of the integral for one step, the approximate value of the modulus of error coincides with the value of the estimate of its upper threshold value. The graph of the dependence of the logarithm of the module of the upper limit value of the error on the logarithm of the module of the integration step is linear. The errors of the numerical method for calculating the transient function of an automatic control system with a PD-PID-controller has been calculated. A comparison of the results obtained by analytical and numerical methods shows a good correspondnence of the numerical solution with the analytical within the calculated errors. The scientific novelty of the work is to obtain analytical relations for calculating the errors of complex variable function numerical integration: the modulus of local error at each integration step, as well as the approximate and upper limit of the modulus of errors in the integration contour. The practical significance of work results is ability to obtain predetermined errors of complex variable function numerical integration by choosing the integration step, which can be used to improve the quality of transients analysis in electrotechnical and automatic control systems.

Keywords: numerical integration, complex variable function, numerical method error, inverse Laplace transform.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Ткачевим В.В.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ГЕОЛОГО-МАРКШЕЙДЕРСЬКОГО ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРОЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ ПРИ ЗАКРИТТІ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

М.О. Алексєєв¹, О.С. Кучин², В.С. Власов³

¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, alekseev.m.o@nmu.one, ORCID 0000-0001-8726-7469

² Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, askuchin77@gmail.com, ORCID 0000-0003-4031-164X

³ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, vladswls@gmail.com, ORCID 0000-0003-2011-1085

AUTOMATION OF GEOLOGICAL-SURVEYOR SUPPORT FOR FORECASTING HYDROECOLOGICAL RISKS ARISING WHEN CLOSING COAL MINES

M.A. Alekseyev¹, O.S. Kuchin², V.S. Vlasov³

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, alekseev.m.o@nmu.one, ORCID 0000-0001-8726-7469

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, askuchin77@gmail.com, ORCID 0000-0003-4031-164X

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, vladswls@gmail.com, ORCID 0000-0003-2011-1085

Мета. Розробка методики підготовки даних для автоматизації геолого-маркшейдерського забезпечення прогнозування гідроекологічних ризиків, які виникають при закритті вугільних шахт та їх моделювання за допомогою програми «САМАРА».

Методика. У даній роботі запропонована методика підготовки для автоматизації геолого-маркшейдерських даних и моделювання процесів осідання земної поверхні, яка підроблена гірничими роботами, що дозволяє визначити площі й об'єми зон підтопленої земної поверхні. Для цього розглянута послідовність підготовки геолого-маркшейдерських даних для створення бази даних з допомогою якої була побудована геоінформаційна модель підтопленої земної поверхні, зрушеної гірничими роботами. Ця модель реалізована за допомогою програмного забезпечення «САМАРА».

Результат. Розроблена методика дозволила створити за допомогою програмного забезпечення «САМАРА» модель земної поверхні, яка підтоплена при її підробці гірничими роботами на прикладі шахти «Тернівська» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». А також підроблені площі і об'єми між вихідною та осівшеною поверхнею та між поверхнею, що осіла і дзеркалом ґрунтових вод.

Наукова новизна. Полягає в розробці методики підготовки даних для автоматизації геолого-маркшейдерського забезпечення прогнозування гідроекологічних ризиків, які виникають при закритті вугільних шахт та їх моделювання за допомогою програми «САМАРА».

Практична значимість. Полягає в розробці бази даних, яка дозволяє автоматизувати процеси моделювання та прогнозувати гідро-екологічні ризики, які виникають при закритті вугільних шахт. У процесі використання програмного забезпечення «САМАРА» було встановлено ряд серйозних недоліків, які підтверджують необхідність розробки програмного забезпечення, яке дозволяло би автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків при підробці очисними роботами земної поверхні в умовах шахт Західного Донбасу і було більш ефективним у роботі.

Ключові слова: автоматизація, база даних, гідроекологічні ризики, затоплення, моделювання поверхні, осідання.

Вступ

Шахти Західного Донбасу, які були побудовані 50 років тому вже відпрацювали більшу частину своїх запасів. Уже закрита шахта «Першетравнева». На черзі «Тернівська» і «ім. Сташкова». Ліквідація шахт супроводжується значними негативними наслідками, основними з яких є: деформація земної поверхні, підтоплення, заболочування земель, погіршення якості водних ресурсів та ін.

Нині розрахунок параметрів опускання земної поверхні, яка підроблена очисними роботами виконується маркшейдерською службою тільки у випадках підробки життєва важливих народно-господарських об'єктів. А також, відповідними службами шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» не про-

водяться роботи за визначенням гідроекологічних ризиків на момент закриття вугільних шахт. Це пов'язано з відсутністю автоматизованих систем їх визначення і багатофакторністю умов розробки родовища вугілля до яких відносяться: розміри шахтного поля, кількість пластів, що відпрацьовується і зміна їх потужності, розміри і конфігурація виїмкових полів, глибина залягання вугільних пластів та ґрунтових вод та ін. Тому розробка автоматизованої системи прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу з урахуванням багатофакторної моделі і великого об'єму вихідних даних є актуальною науковою задачею.

Виникає необхідність у використанні існуючих, бо розробка нових інформаційних систем, що забезпечують збір та накопичення вихідної інформації з мінімальними затратами і високою надійністю, обробкою цієї інформації для прийняття в подальшому управлінських рішень по мінімізації гідроекологічних ризиків.

Для цього необхідно розробити методику прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті вугільних шахт Західного Донбасу яка дозволяє автоматизувати геолого-маркшейдерське забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постановка задачі дослідження

При вирішенні задачі прогнозування процесів, що виникають при функціонуванні та закритті відпрацьованих шахтних комплексів і протікають в просторі і в часі, дуже важливо правильно вибрати інструментарій, що адекватно трансформує в необхідну форму, та представляє і аналізує набори даних предметної області.

Здійснення такого вибору є досить складним завданням, оскільки в даний час існує широкий спектр інформаційних технологій, систем і програмних продуктів, які забезпечують вирішення проблем моделювання процесів в різних областях [1].

На теперішній час на ринку присутній наступний ряд комерційних і некомерційних систем, а саме: GRASS; gvSIG; qGIS; ArcGIS; ILWIS GIS; uDIG; CAMAPA.

GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) – вдає із себе модульну геоінформаційну систему, яка надає доступ до більш ніж 300 модулів при роботі з дво- і тривимірними растровими і векторними даними. За функціональними можливостями вона схожа з продуктом ArcGIS Info [2].

Можливості GRASS – моделювання ерозії, аналіз ландшафтної структури, вирішення транспортних проблем, аналіз вододілів.

Перевагами є модульність, відкритість вихідного коду, а недоліками недружній інтерфейс, топологічні конфлікти між кордонами, можуть привести до помилок в розрахунках і аналізі даних.

gvSIG (*Generalitat Valenciana, Sistema d'Informació Geogràfica*) – один з найбільших проєктів, розробка якого прагнула до заміни ESRI ArcView в органах муніципальної влади Іспанії. gvSIG підтримує роботу з растровими і векторними даними, а також здатний працювати з геоданими, що зберігаються в різних БД. Функції по роботі з растровими даними побудовані на основі алгоритмів проєкту SAGA. Мова програмування – Java [3].

Перевагами gvSIG є підтримка великої кількості векторних і растрових форматів, поширюється з відкритим вихідним кодом за ліцензією GPL, інтерфейс успадковує принцип організації у ArcGIS view. К недолікам треба віднести – відсутність документації для розробників і залежність від більш ніж 100 C++ і Java бібліотек, необхідність встановлювати готові проєкти в певну папку на диск, недостатня підтримка користувачів.

qGIS (*Quantum GIS*) – метою розробки даної програми було створення більш легкого і зрозумілого інтерфейсу, ніж у аналогічних продуктів. Домігшись цього, проєкт широко розвинув свою функціональність за допомогою модулів розширення на C++, або Python. QGIS має одне з найбільш розвинених співтовариств в середовищі відкритих ГІС, при цьому кількість розробників постійно збільшується, чому сприяє наявність хорошої документації по процесу розробки і зручна архітектура [4].

Перевагами є легкий і зрозумілий інтерфейс, одне з найбільших ком'юніті, велика документація, можливість написання модулів на C++ або Python, програма вільно розповсюджується за ліцензією GPL. Що до недоліків то в деяких випадках комерційні ГІС мають більше інструментарію, модулів і можливостей.

ArcGIS – сімейство геоінформаційних програмних продуктів американської компанії ESRI. Застосовуються для земельних кадастрів, в задачах землеустрою, обліку об'єктів нерухомості, систем інженерних комунікацій, геодезії та надрокористування та інших областях. Є однією з найбільш використовуваних комерційних ГІС-систем в світі з унікальним набором інструментів. Деякі з них не мають аналогів в інших ГІС-системах [5].

Перевагами є унікальний набір інструментів і модулів, хороша клієнтська підтримка, велика документація. К недолікам можливо віднести велику вартість ліцензії.

ILWIS GIS – геоінформаційна система, яка поєднує в собі функціональність векторної і растрової ГІС призначеної для вирішення широкого діапазону завдань, від аналізу зображень до моделювання ерозійних процесів [6] – [7].

Функціональних можливостей ПЗ ILWIS досить, щоб повноцінно працювати з векторними даними і виробляти оформлення карт для виведення. Програмний пакет підтримує імпорт найбільш поширених векторних і растрових форматів, підключення баз даних і WMS-сервісів. Ця програма підтримує роботу бібліотеки GDAL, що дозволяє їй працювати з більш широким списком форматів даних.

Перевагами є відкритий вихідний код, наявність інструментарію для аналізу ерозійних процесів, а недоліками – застаріла версія програми.

«САМАРА» (CAD/GIS) – система близька до систем AM / FM. Основне її призначення – автоматизація основних операцій камеральної обробки інформації маркшейдерським (геолого-маркшейдерських) відділом гірничодобувного підприємства. В якості платформи для системи «САМАРА» виступає програмне забезпечення AutoCAD [8].

Перевагами є різке зниження ймовірності помилок, оперативна підготовка звітної документації, вільне одержання суміщених з різних горизонтів планів, можливість подання вироблення в тривимірному просторі і проведення необхідних вимірювань та ін. Той факт, що «САМАРА» є додатком до ПЗ AutoCAD, забезпечує широку інтеграцію реалізованої нею технології з відомими CAD і GIS технологіями. Серед більш ніж 4000 офіційно зареєстрованих додатків до AutoCAD існують системи, що розширюють технологію «САМАРИ».

Недоліком є те, що внаслідок постійної зміни даних, потрібно проводити регулярне оновлення моделі. У зв'язку з тим, що внесення змін до бази даних процес досить непростий, то забезпечення достовірності моделювання є складним завданням. Наступним недоліком є те, що, в зв'язку з багатокomпонентністю процесу гірської видобутку, цифрова модель шахти повинна містити в собі величезну кількість взаємозалежної інформації. Тому для зберігання, обробки і регулярного резервування, для виключення можливості втрати інформації такої моделі потрібен великий обсяг зовнішньої і оперативної пам'яті.

Виконав аналіз різних програмних продуктів можливо зробити висновок, що незаперечною перевагою є те, що у випадку з GIS «САМАРА» є прямий зв'язок з розробниками даної GIS, що значно прискорює і спрощує виконання поставлених завдань і проведення досліджень. Таким чином, порівнявши всі показники пропріетарних і вільних GIS-систем вибір був зупинений на GIS-системі «САМАРА».

Відповідно до цього метою дослідження є розробка методики підготовки даних для автоматизації геолого-маркшейдерського забезпечення прогнозування гідроекологічних ризиків, які виникають при закритті вугільних шахт за допомогою методів математичного моделювання.

Рішення задачі. Запропонована методика, яка заснована на комплексному підході до виникнення гідроекологічних ризиків і їх наслідків. Вона охоплює основні етапи їх аналізу і прогнозування, враховує особливості екосистеми досліджуваного регіону. Розробка методики ґрунтувалася на формалізації процесів аналізу, об'ємному моделюванні досліджуваного об'єкта і прогнозуванні гідро-екологічних ризиків. Це в подальшому дозволить розробити нову інформаційну технологію з метою автоматизації зазначених процесів, що, в свою чергу, дозволить скоротити часові і трудові витрати на прийняття рішень і їх реалізацію.

В ході роботи використовували різні групи даних і їх джерела. Це дозволило обґрунтувати структуру даних, яка використовується в роботі і систематизувати інформацію на кожному етапі її застосування.

При розробці цієї методики, та виконання досліджень по прогнозуванню гідроекологічних ризиків, були виділені наступні етапи:

1. Створення **Бази Даних** (БД). На цьому етапі визначаються носії, з яких необхідно збирати вихідні дані і здійснювати вибір конкретних даних. Здійснюється створення БД;
2. **Побудова поверхонь** – відбувається побудова вихідної земної поверхні, водоносного горизонту і вугільних пластів;
3. **Нанесення виїмкових ділянок** – проміжним етапом при побудові підробленої поверхні, є нанесення видобувних ділянок для кожного вугільного пласта. За правилами проведення маркшейдерських робіт, необхідно розбивати видобувні ділянки на прямокутники різної форми;
4. **Побудова підробленої поверхні** – при виїмці кожного вугільного пласта;
5. **Визначення площ та об'єму осідань земної поверхні.**
6. **Визначення площ та об'єму затоплених ділянок на земній поверхні.**

На кожному етапі проведення робіт необхідно ставити конкретну задачу, від якої буде залежати алгоритм її виконання, ступінь формалізації процесів і об'єм необхідних вихідних даних. При проведенні прогнозування гідроекологічних ризиків це означає, що ми можемо оцінити площі та об'єми зон затопленої поверхні, які розташовуються між поверхнею, яка деформована та дзеркалом води, яка вийшла на поверхню.

Для вирішення поставленого завдання, необхідно:

1. Сформувати БД значень координат точок геологорозвідувальних свердловин для побудови об'ємної моделі.
2. Основою для ухвалення управлінських рішень щодо для мінімізації гідро-екологічних ризиків необхідно побудувати карту прогнозу очікуваних деформацій земної поверхні та на ній виділити площі,

де очікується процес зрушення. Для цього необхідно побудувати 3-х вимірну модель шахтного поля досліджуваного об'єкта з візуалізацією поверхні і всіх вугільних пластів [9].

3. Виконати моделювання зміни земної поверхні при послідовній виїмці кожного вугільного пласта.

4. Після завершення моделювання опускання підробленої поверхні при виїмці кожного вугільного пласта необхідно побудувати дзеркало води, для визначення підтоплених ділянок підробленої гірничими роботами території.

5. Сформувати список підтоплених ділянок підробленої території, що дозволить розробити систему прийняття рішень з мінімізації гідро-екологічних ризиків.

6. Сформувати висновки за результатами виконання перерахованих етапів.

Блок-схема виконання досліджень надана на рис.1.

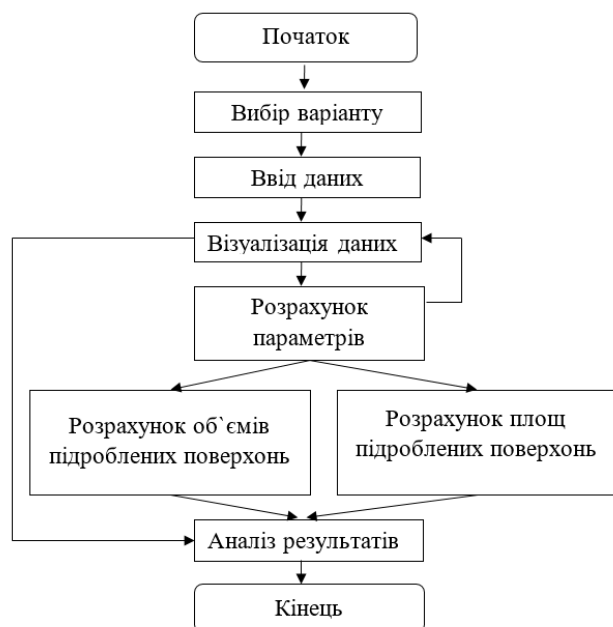


Рис.1. Блок-схема виконання досліджень

Реалізація запропонованої методики виконувалась на прикладі «ш. Тернівська» яка одна із перших планується до закриття.

Цей об'єкт дослідження («ш. Тернівська») можна описати наступними характеристиками:

- розмір шахтного поля – 11,7 км²;
- в чотирьох вугільних пластах С₄^н, С₅, С₆^н, С₈^н потужністю 0,9 –1,5 м зосереджено близько 21000 т промислових запасів, які при річній виробничій потужності шахти 1700 т будуть відпрацьовані до 2031 року; за попередніми розрахунками при виїмці зазначених пластів очікуване опускання поверхні може скласти близько 4 метрів;
- на частині поверхні шахтного поля розташовується місто Тернівка, який при закритті «ш. Тернівська» ризикує бути підтопленими;
- ситуація ускладнюється ще й тим, що через шахтне поле протікають річки Самара, Тернівка і Мала Тернівка;
- на території шахтних полів частково розташовані автомагістраль і залізниця державного значення Київ – Донецьк.
- по шахті «Тернівка» є вся необхідна інформація (геологічна, гідрологічна, плани

гірничих виробок та ін.) необхідна для виконання повноцінних досліджень і вирішення поставлених у завдань.

Після вибору об'єкту дослідження, наступним етапом є побудова цифрових карт і поверхонь. Для цього необхідна інформація про розвідувальні свердловини і пройдені виробки, як підготовчі так і очисних на основі яких будуються просторові моделі поверхні землі і вугільних пластів. Однією з найскладніших проблем видобутку і їх наслідків є отримання необхідних даних [10].

З огляду на специфіку роботи гірничого підприємства, вихідні дані для складання бази даних, можна отримувати з таких джерел:

- 1) Паперові карти;
- 2) Електронні карти;
- 3) Готові електронні таблиці і БД;
- 4) Паспорти свердловин.

Дані всіх типів передбачається зберігати в БД. На рис. 2 наведена блок-схема первинних і розрахункових даних.

З урахуванням особливостей корпоративної безпеки вугільних підприємств, на першому етапі роботи вихідні дані знімалися вручну з паперових карт.

Кожна карта являє собою детальний план гірничих виробок по кожному відпрацьованому вугільному пласту з нанесенням на них сітки свердловин.

Якщо розглянути збільшений фрагмент плану гірничих виробок (рис. 3), то можна побачити, що кожна свердловина описується чотирма основними характеристиками:

- 1) Номер свердловини;
- 2) Відмітка гирла свердловини (червоний колір);
- 3) Глибина свердловини (блакитний колір);
- 4) Потужність вугільного пласта (зелений колір).

Таким чином паперові карти дозволяють зібрати найбільш повний набір вихідних даних для побудови 3-х мірної моделі поверхні і кожного пласта.



Рис.2. Структурна схема первинних і розрахункових даних:
А – первинні дані; Б – дані які розраховуються

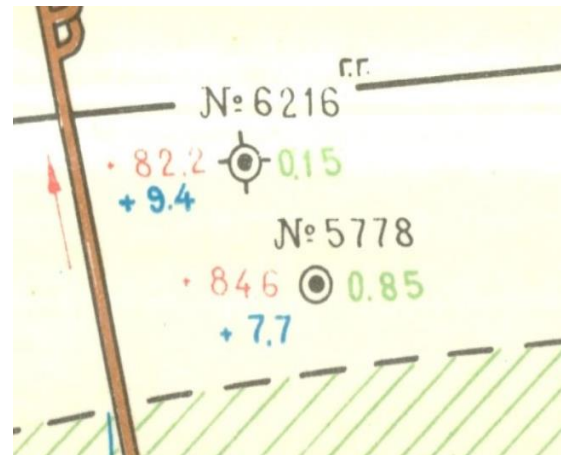


Рис.3. Приклад зображення свердловини на плані гірських виробок пласта С₈

За результатом збору та обробки вихідних даних була створена БД свердловин, де зберігаються такі дані, як:

- 1) Назва свердловини;
- 2) X – координата, м;
- 3) Y – координата, м;
- 4) Z1 – абсолютна відмітка гирла свердловини, м;
- 5) Z2 – абсолютна відмітка точки перетину свердловини з пластом, м;
- 6) m – координата, м (потужність вугільного пласта);

Наступним етапом проведення дослідження є побудова моделі з використанням програмного забезпечення «САМАРА», де основними поверхнями є:

- земна поверхня (саме з нею в подальшому порівнюються поверхні, отримані в процесі прогнозування можливого її осідання після виїмки вугільних пластів);
- поверхня вугільного пласта;
- границі (контури) очисних робіт;
- поверхня осідання;
- поверхня ґрунтових вод і наявних водних об'єктів (використовується для визначення територій можливого затоплення) яка будується за допомогою отриманих даних з карт водоносного горизонту Павлоградського вугільного басейну, де використовуючи X,Y координати розвідувальних свердловин та значень ліній водоносних горизонтів були інтерпольовані значення водоносного горизонту для кожної свердловини [11] – [12];

Зазначені карти і поверхні використовуються головним чином для візуалізації стану екосистеми і наслідків проведення гірських робіт.

Приклад побудованої моделі поверхонь «ш. Тернівська» зображена на рис. 4.

Спочатку були зібрані вихідні гірничо-геологічні дані виїмкових ділянок, та нанесені на модель (рис. 5).

Далі, використовуючи інформацію про черговість виїмки вугільних пластів, їх потужності, що виймається, і розташуванні ціликів, із застосуванням методики розрахунку опускання земної поверхні [13] була визначена величина її опускання:

$$\eta = 0,9 \cdot m \cdot \cos(\alpha), \quad (2.1)$$

де η – осідання земної поверхні, м;
 m – потужність, що виймається, м;
 α – кут падіння пласта, град.

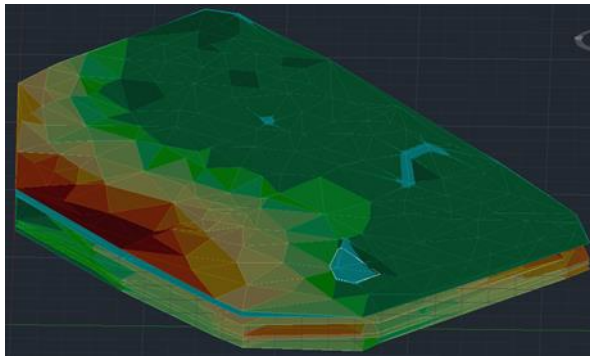


Рисунок 4 – Модель поверхонь «ш. Тернівська»

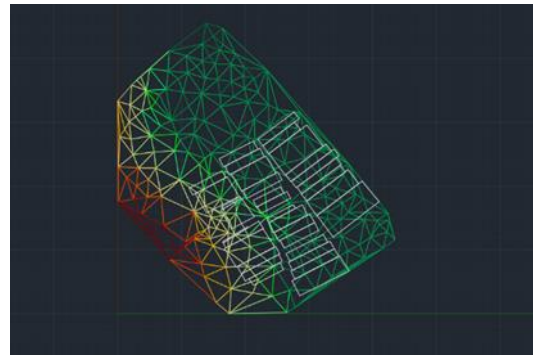


Рис.5. Ділянки очисних робіт пласта С4

Отримані значення використовувалися для розрахунку висотних відміток поверхонь опускання після послідовного відпрацювання кожного з вугільних пластів. При цьому осідання підсумовувалося, і на останньому етапі рівень земної поверхні відповідає її положенням після закриття шахти.

В результаті отримано модель підробленої поверхні при виїмці пластів C_4^H , C_5 , C_6^H , C_8^H .

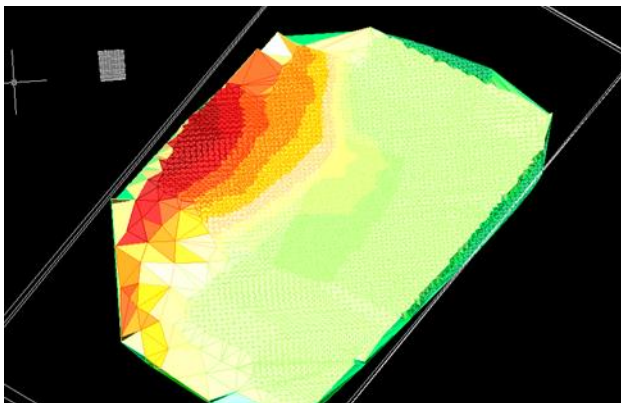


Рисунок 6 – Осіла земна поверхня після відпрацювання пластів C_4^H , C_5 , C_6^H , C_8^H

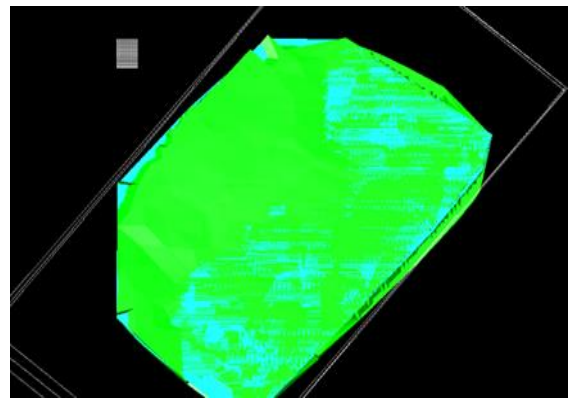


Рисунок 7 – Результати моделювання зрушеної поверхні, при відпрацюванні чотирьох пластів «ш. Тернівська» з візуалізацією зон підтоплення

Заключним етапом моделювання є побудова поверхні ґрунтових вод, на підставі якої будуть візуалізовано затоплені ділянки на поверхні шахтного поля «ш. Тернівська» і визначені площі і обсяги цих ділянок. На рис.7 наведені результати моделювання підробленої поверхні чотирма пластами «ш. Тернівська» з візуалізацією зон затоплення.

В результаті моделювання за допомогою програмного забезпечення «САМАРА» були визначені площі і обсяги зон затоплення в межах контуру зони впливу очисних робіт «ш. Тернівська» після її закриття.

В результаті моделювання за допомогою програмного забезпечення «САМАРА» були визначені площі та об'єми зон підтоплення в межах контуру зони впливу очисних робіт «ш. Тернівська» після її закриття, які показані в табл. 1.

Таблиця 1.

Результати моделювання зміни площі і об'ємів зон підтоплення при відпрацюванні чотирьох вугільних пластів на «ш. Тернівська»

Показники	Пласт C_4	Пласти C_4 та C_5	Пласти C_4 , C_5 та C_6	Усі пласти разом (C_4 , C_5 , C_6 та C_8)
Площа поверхні зрушення, км ²	9,37	14,31	16,35	16,35
Об'єм між вихідною та зрушеною поверхнями, км ³	0,0064	0,014	0,024	0,0256

Площа поверхні підтоплення, км ²	-	0,0543	1,12	1,25
Об'єм підтоплених ділянок, км ³	-	0,00002	0,00043	0,00050

За допомогою програмного забезпечення «САМАРА» встановлено, що максимальна площа поверхні зрушення становить 16,35 км², а об'єм – 0,0256 км³. Максимальний об'єм підтоплення становить 0,0005 км³

Результати моделювання також показали основні недоліки використаної програми «САМАРА» найбільш значущими з яких є:

- відсутність загальної Баз Даних;
- технічна недосконалість супутнього програм-ного забезпечення;
- погане візуальне представлення моделей;
- залежність від ліцензій на супутнє програмне забезпечення;
- необхідність витрат великої кількості часу на реалізацію моделі.

Висновки

Розроблена методика дозволяє побудувати модель вихідної земної поверхні, вугільних пластів з урахуванням виїмкових ділянок і водоносного горизонту.

В результаті моделювання послідовної виїмки вугільних пластів отримані зони затоплення земель на поверхні землі.

Результати дослідження підтверджують можливість прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу, що дозволяє в подальшому приймати управлінські рішення з їх мінімізації за рахунок рекультивції порушених земель.

При використанні програмного продукту «САМАРА» було встановлено ряд серйозних недоліків, які підтверджують необхідність розробки програмного забезпечення, яке дозволяло би автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків при підробці очисними роботами земної поверхні в умовах шахт Західного Донбасу і було б більш ефективним у роботі.

Список літератури

1. Мухамедиев Р.И. Средства автоматизации обработки данных геофизического исследования скважин на месторождениях урана пластово-инфильтрационного типа / Р.И. Мухамедиев, Я.И. Кучин // Электронный журнал Cloud of science – Казахстан, Алматы, 2015. – Т.2. – № 3. – С. 451–463.
2. GRASS GIS [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – General overview. What's GRASS GIS – Бонн, 1998–2017. – Режим доступа: <https://grass.osgeo.org/documentation/general-overview/>.
3. Дубинин М.Ю. Открытые настольные ГИС: обзор текущей ситуации. Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации / М.Ю. Дубинин, Д.А. Рыков // – 2009. – 5 (72). С. – 20–27.
4. Документация qGIS 3.4 [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – A Gentle Introduction to GIS. – Режим доступа: https://docs.qgis.org/3.4/ru/docs/user_manual/preamble/foreword.html.
5. ESRI [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – ArcGIS Pro. – Режим доступа: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro/overview>.
6. Шокин Ю.И. ГИС сегодня: состояние, перспективы, решения / Ю.И. Шокин, В.П. Потапов // ЖВТ. – 2015. – №5. – С. 175 – 213.
7. ILWIS [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Introduction to ILWIS 3.0. – Режим доступа: <https://www.itc.nl/ilwis/users-guide/>.
8. Лаборатория комплексных технологий [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Самара – Режим доступа: <http://lct.com.ua/ru/samara.php>.
9. Каспарьян Э.В. Геомеханика: метод. пособие / Э.В. Каспарьян, А.А. Козырев, М.А. Иофис, А.Б. Макаров. – М.: Высшая школа, 2006. – 504 с.
10. Сученко В.Н. Методы защиты зданий и сооружений от влияния горных работ / В.Н. Сученко, Алафар Халиль Саид // Вестник РУДН – 2014. – №2. – С. 119 –123.
11. Безопасная выемка угля под водными объектами / Б.Я. Гвирицман, Н.Н. Кацнельсон, Е.В. Бошенятов, Г.А. Нес-теров, В. П. Самарин. – М.: Недра, 1977. – 175 с.
12. Zhang Jincai Coal mining under aquifers in China: a case study / Jincai Zhang, Baohong Shen // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004. – N 41. – P.629 – 639.
13. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях – М.: Недра. – 1981. – 288 с.

АННОТАЦИЯ

Цель. Разработка методики подготовки данных для автоматизации геолого-маркшейдерских данных и моделирования процессов оседания земной поверхности, подработанной горными работами, которая позволяет определить площади и объемы зон затопленной земной поверхности. Для этого рассмотрена последовательность подготовки геолого-маркшейдерских данных для создания базы данных с помощью которой была построена геоинформационная модель затопленной земной поверхности, подработанной горными работами. Эта модель реализована с помощью программного обеспечения «САМАРА».

Результат. Разработанная методика позволила создать с помощью программного обеспечения «САМАРА» модель земной поверхности, которая затоплена при ее подработке горными работами на примере шахты «Терновская» ЗАО «ДТЭК Павлоградуголь». А также подсчитаны площади и объемы между исходной и осевшей поверхностью и между поверхностью осевшей и зеркалом грунтовых вод.

Научная новизна. Заключается в разработке методики подготовки данных для автоматизации геолого-маркшейдерского обеспечения прогнозирования гидроэкологических рисков, возникающих при закрытии угольных шахт и их моделирования с помощью программы «САМАРА».

Практическая значимость. Заключается в разработке базы данных, которая позволяет автоматизировать процессы моделирования и прогнозировать гидро-экологические риски, возникающие при закрытии угольных шахт. В процессе использования программного обеспечения «САМАРА» был установлен ряд серьезных недостатков, которые подтверждают необходимость разработки нового программного обеспечения, которое позволяло бы автоматизировать прогнозирование гидроэкологических рисков при подработке очистными работами земной поверхности в условиях шахт Западного Донбасса и было бы более эффективным в работе.

Ключевые слова: автоматизация, база данных, гидро-экологические риски, затопление, моделирования поверхности, оседание.

ABSTRACT

Goal. Development of a method for preparing data for the automation of geological and mine surveying to predict hydroecological risks arising from the closure of coal mines and their modeling using the «SAMARA» program.

Methodology. This article proposes a method of preparation for the automation of geological and mine surveying data and modeling the processes of subsidence of the earth's surface, which is mined, also allows to determine the areas and volumes of zones of the flooded earth's surface. For this, the sequence of preparation of geological and mine surveying data is considered to create a database with the help of which a geoinformation model of the submerged earth surface by mining was built. This model is realized using the «SAMARA» software.

Result. The developed methodology made it possible to create, using the «SAMARA» software, a model of the earth's surface, which was flooded during its mining operations on the example of the «Ternovskaya» mine of ZAO DTEK «Pavlogradugol». And also the areas and volumes between the initial and settled surface and between the surface of the settled and the groundwater table were calculated.

Scientific novelty. It consists in the development of a methodology for preparing data for the automation of geological and mine surveying to predict hydroecological risks arising from the closure of coal mines and their modeling using the «SAMARA» program.

Practical significance. It consists in the development of a database that allows automating the modeling processes and predicting hydro-ecological risks arising from the closure of coal mines. In the process of using the «SAMARA» software, a number of serious shortcomings were identified, which confirm the need to develop software that would make it possible to automate the forecasting of hydro-ecological risks in case of counterfeiting by cleaning works of the earth's surface in the conditions of the mines of Western Donbass and would be more efficient.

Key words: automation, subsidence, surface modeling, flooding, hydro-ecological risks

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Слесаревим В.В.

АРХІТЕКТУРА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ВУЗЛА МЕХАТРОННОГО ПРИСТРОЮ

С.М. Ткаченко¹, Д.О. Бешта², А.В.Кожевніков³

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро,

tkachenko.s.m@nmu.one ORCID 0000-0003-1156-3151

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,

beshta.d.o@nmu.one ORCID 0000-0003-2848-2737

³ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,

kozhevnykov.a.v@nmu.one ORCID 0000-0002-0078-2546

ARCHITECTURE OF THE COMPUTER UNIT OF THE MECHATRONIC DEVICE

S. Tkachenko¹, D. Beshta², A. Kozhevnikov³

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

tkachenko.s.m@nmu.one ORCID 0000-0003-1156-3151

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,

beshta.d.o@nmu.one ORCID 0000-0003-2848-2737

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,

kozhevnykov.a.v@nmu.one ORCID 0000-0002-0078-2546

Мета роботи. Розробити архітектуру обчислювального вузла та керуючий алгоритм мехатронного пристрою, які дозволяють скоротити трудовитрати на програмування і відлагодження за рахунок уніфікації методу програмування.

Методика дослідження. Аналіз рішень, рекомендацій та алгоритмів керування від виробника станції маніпулятора. Ескізне проектування систем у частині функціональних структур. Синтез алгоритму та структури даних з використанням методів ситуаційного керування та методів організації зберігання даних у пам'яті комп'ютера.

Результати дослідження. Запропоновано загальну функціональну структуру обчислювального вузла мехатронного пристрою, обґрунтовано її властивості та переваги, запропоновано універсальний підхід до написання алгоритму основного керуючого блоку станції маніпулятора. Синтезовано мову ситуаційного керування для розробки структури даних у формі, що дозволяє гнучко змінювати технологічні задачі станції маніпулятора. Представлено алгоритм основного керуючого блоку програми станції маніпулятора, який реалізує вибірку керуючих впливів з масиву за вхідними інформаційними ознаками і є універсальним.

Наукова новизна. Побудовано маргінально індексний масив продукцій вихідних впливів, який дозволяє замість алгоритму керування за графом використати простий алгоритм вибору з масиву без перевитрат оперативної пам'яті, які виникають у такому рішенні за умови використання інформаційних векторів вихідних впливів.

Практичні результати. Запропоновано метод задання дій маніпулятора, який дозволяє відмовитись від програмування його обчислювального вузла на користь задання структур даних безпосередньо програмістом або засобами автоматичних систем проектування чи налагодження. Метод дозволяє відокремити обчислювальний вузол від мехатронного пристрою і використовувати окремо або замінювати обчислювальні вузли під час експлуатації без перепрограмування.

Ключові слова: Маніпулятор, обчислювальний вузол, контролер, функціональна структура, станція маніпулятора FESTO, ситуаційне керування, маргінальне індексування, графсет, керуючий вплив, семантичний зв'язок.

Вступ. Об'єктами досліджень, з точки зору мехатроніки, є крани-маніпулятори, маніпулятори ліній збирання, сортування, бурильні установки та інші. Особливості впровадження та експлуатації мехатронних пристроїв можуть бути пов'язані з необхідністю частого внесення змін в обчислювальні вузли мехатронних пристроїв або необхідністю їх фізичної заміни. Не завжди просто, а іноді й неможливо організувати робоче місце програміста безпосередньо біля мехатронного пристрою. З іншого боку, віддалене програмування і налагодження такого пристрою чи лінії також складна задача, що потребує порівняно більше часу, підготовчих операцій та наявності, як мінімум, одного кваліфікованого асистента зі спеціалізованим обладнанням на об'єкті. Тому актуальна задача розробки архітектури керуючих обчислювальних ву-

злів мехатронних пристроїв спрямованої на зменшення трудовитрат на програмування і відлагодження під час їх впровадження і експлуатації.

Мета досліджень. Виходячи з аналізу існуючих підходів до створення промислових систем управління та методів організації доступу до даних розробити архітектуру обчислювального вузла та керуючий алгоритм мехатронного пристрою, які дозволяють скоротити трудовитрати на програмування і відлагодження за рахунок уніфікації методу програмування.

Основний матеріал досліджень. В умовах виробництва в якості обчислювальних вузлів, у тому числі й мехатронних пристроїв, використовують промислові контролери, або, як їх ще називають комп'ютери. На апаратному рівні комп'ютерної архітектури комп'ютери є уніфікованими пристроями, що складаються з центрального процесорного модуля, який також включає у свій склад оперативну та постійну пам'ять та модулів розширення. Модулі розширення можуть приймати або видавати дискретні чи аналогові сигнали, організовувати зв'язок з іншими вузлами промислової мережі, використовуючи відповідні протоколи. Окремо виконується блок живлення комп'ютера, як правило +24В. Центральні процесорні вузли також можуть мати інтегровані входи і виходи сигналів, інтерфейси промислових мереж, блоки живлення. Комп'ютери мають свої операційні системи, що включають засоби зв'язку, діагностики обладнання, інтерпретації програм [1]. Тому з точки зору програмування, впровадження і експлуатації мехатронних систем інтерес для дослідження представляє більш високий рівень архітектури – рівень прикладних програм [2].

Розглянемо підхід до написання програм для промислових контролерів, що пропонується визнаною фірмою FESTO в рамках курсу підготовки фахівців з мехатроніки та для змагань «Wordskills» з мехатроніки. Використаємо дані одного з лабораторних маніпуляторів FESTO[3], призначеного для переміщення деталей різного матеріалу і кольору в кілька кінцевих точок. Станція маніпулятора разом з комп'ютером Simatic S7-1214C являє собою мехатронний пристрій. Перелік використаних фізичних входів і виходів комп'ютеру узгоджено зі схемою підключення [2] та наведено в таблиці 1. Сюди ж, для зручності подання матеріалу, додано і деякі внутрішні змінні.

Таблиця 1.

Перелік входних і вихідних сигналів маніпулятора

Позначення сигналу	Назва сигналу	Напрямок відносно контролера	Призначення
1	2	3	4
X ₀	Заготовка на приймальному лотку c	Вхід	Виявити заготовку і запустити алгоритм обслуговування
X ₁	Каретка на місці захоплення	Вхід	Дозволити захоплення деталі
X ₂	Каретка на місці сортування	Вхід	Дозволити вивантаження чорної деталі
X ₃	Каретка на місці вивантаження	Вхід	Дозволити вивантаження деталі
X ₄	Захоплювальний пристрій опущений	Вхід	Дозволити розкрити чи закрити захоплювальний пристрій в залежності від положення каретки
X ₅	Захоплювальний пристрій піднятий	Вхід	Дозволити почати рух каретки в одному з напрямів чи розпочати відлік часу перед роботою з черговою деталлю
X ₆	Колір заготовки не чорний	Вхід	Дозволити вивантаження у місці сортування. Датчик розміщено у захваті маніпулятора
X ₇	Кнопка «start» на інтерфейсі управління	Вхід	Виставити ознаку «start», тобто «станція працює в автоматичному режимі»
X _{7'}	Кнопка «stop» на інтерфейсі управління	Вхід	Скинути ознаку «start».
X ₈	Кнопка «reset» на інтерфейсі управління	Вхід	Виставити каретку у початкову позицію (на місце захоплення)
Y ₀	Рух каретки у напрямі місця завантаження	Вихід	Включення електроприводу руху у прямому напрямку.
Y ₁	Рух каретки у напрямі місця вивантаження	Вихід	Включення електроприводу руху у зворотньому напрямку.
Y ₂	Опускання захоплювального пристрою	Вихід	Включення одноходового пневмоциліндру опускання
Y ₃	Розкриття захоплювального пристрою	Вихід	Включення одноходового пневмоциліндру розкриття
Y ₄	Індикатор «reset»	Вихід	Включення лампочки на інтерфейсі управління
Y ₅	Індикатор «start»	Вихід	—//—

Закінчення таблиці 1			
1	2	3	4
Y ₆	Індикатор роботи в автоматичному режимі	Вихід	—//—
Y ₇	Сигнал «Станція зайнята»	Вихід	Сигнал для зовнішнього пристрою завантаження деталі на станцію.
Z ₀	Затримка часу перед роботою з черговою деталлю пройшла	Внутрішня	Дозвіл роботи з черговою деталлю. Введено, щоб дати час не виведення органу пристрою завантаження з робочої зони станції
Z ₂	Ознака «start», тобто «станція працює в автоматичному режимі»	Внутрішня	Програмний тригер, що використовується замість кнопок «start» і «stop»
Z ₃	Ознака «появу заготовки на вході зафіксовано»	Внутрішня	Програмний тригер, що має використовуватись в запропонованому рішенні, оскільки захват маніпулятора не має відповідного датчика
Z ₄	Ознака «станція готова до роботи»	Внутрішня	Програмний тригер, що означає готовність станції до запуску в автоматичному режимі

За рекомендаціями FESTO, та оргкомітету змагань, керування станцією, предсталею на рисунку 1, може бути реалізовано за графсетом, показаним на рисунках 2 і 3 [3, 4].

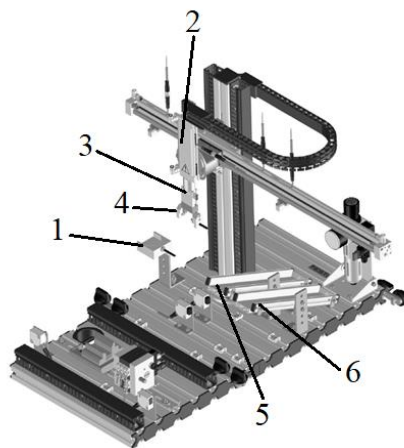


Рис. 1 Станція маніпулятору FESTO:

1 – місце захоплення (завантаження); 2 – каретка з електроприводом; 3 – шток пневмоциліндра піднімання і опускання захоплювального пристрою; 4 – пневматичний захоплювальний пристрій; 5 – місце сортування (вивантаження чорної деталі); 6 – місце вивантаження (не чорних деталей)

В якості рішення для змагань, так ий проект програми цілком придатний. Але, з точки зору розробки і експлуатації програмного забезпечення рішення не структуроване. В одному алгоритмі тут об'єднані кілька задач – обслуговування таймеру, виконання графу управління, нормування і масштабування сигналів. Остання задача настільки тісно пов'язана з графом, що за умови використання дискретних сигналів дії з нормування у графі виявити не просто. Тим не менше, звернімо увагу, що, в залежності від технічних характеристик застосованих датчиків, сигнали можуть передаватись як логічним 0, так і як логічним 1. Граф управління, представлений на рисунках 2 і 3 жорстко орієнтований на значення входів. А значить, зміна характеристики вхідного сигналу, наприклад, через заміну датчика, призведе до необхідності переписування, зміни структури графу та переналадження програми. Те ж саме можна спостерігати у випадку зміни затримки часу в алгоритмі чи зміни кількості вхідних інформаційних ознак. Таким чином, рішення, запропоноване в [3, 4], для виробництва непридатне.

Скористаємося іншими, відомими методами проектування систем [5]. Визначимо функціональну структуру програми керування маніпулятором. Пропонована структура показана на рисунку 4. Алгоритми керування маніпулятором, враховуючи вимоги до стадійності проектування [5], повинні бути створені для тих блоків функціональної структури на рис. 4, які цього потребують. Переваги підходу очевидні. У випадку зміни типу сигналу дискретного датчика, або способу надання керуючого впливу на виконавчий орган, задача переписування і відлагодження програми локалізується в окремих функціональних блоках нормалізації та масштабування без втручання в керуючий алгоритм. Це значно спрощує і внесення змін у програму, і процес налагодження.

Винесення таймерів технологічних затримок часу з керуючого алгоритма також дозволяє їх коригувати без втручання в основний алгоритм. Більше того, прирівнювання груп таймерів до звичайних вхід-

них з обов'язковим пропусканням пов'язаних з ними інформаційних ознак через блоки нормування і масштабування (див. рис. 4) дозволяє вільно модифікувати алгоритми контролю часу та навіть, за необхідності, відмовитися від них на користь зовнішніх апаратних засобів контролю часу. Така необхідність виникає, коли продуктивності компролера не вистачає для дотримання необхідної точності відліку часу.

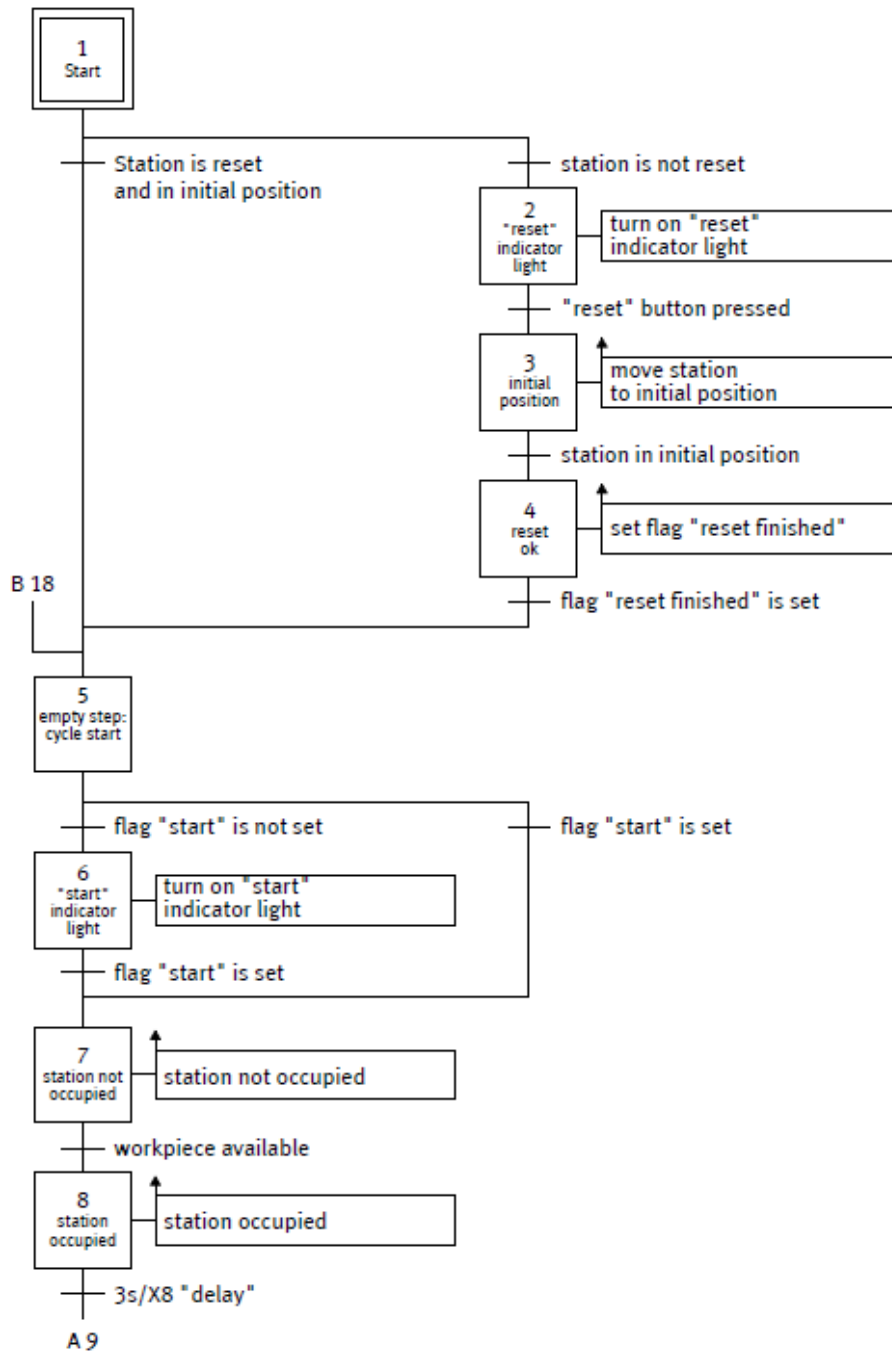


Рисунок 2 – Графсет програми роботи маніпулятора згідно DIN EN 60848 (IEC 60848)

Щодо інтерфейсу пульта управління. Зазвичай він присутній. Але з точки зору програми управління, як показано на рисунках 2 і 3, не має значення: надходять сигнали від датчиків, кнопок чи панелі НМІ. Відповідно, і керуючі впливи однаково надходять на виконавчі органи чи на індикатори візуалізації.

Звернімо увагу на групу блоків нормування і масштабування вхідних сигналів. У наведеному прикладі маніпулятора все просто. Якщо доводиться замінити дискретний датчик з нормально розімкнутим контактом на нормально замкнутий, то програміст просто має виконати інверсію відповідного входу. Інша річ, коли мова йде про маніпулятор, наприклад, бурильної машини для буровибухових робіт. Тут мова піде про обробку сигналів положення від енкодерів, причому для деякої непостійної кількості шпурів

різної глибини, що визначається паспортом буровибухових робіт. Задача складніша, оскільки пов'язана з розрахунками переміщення кінематичних ланок.

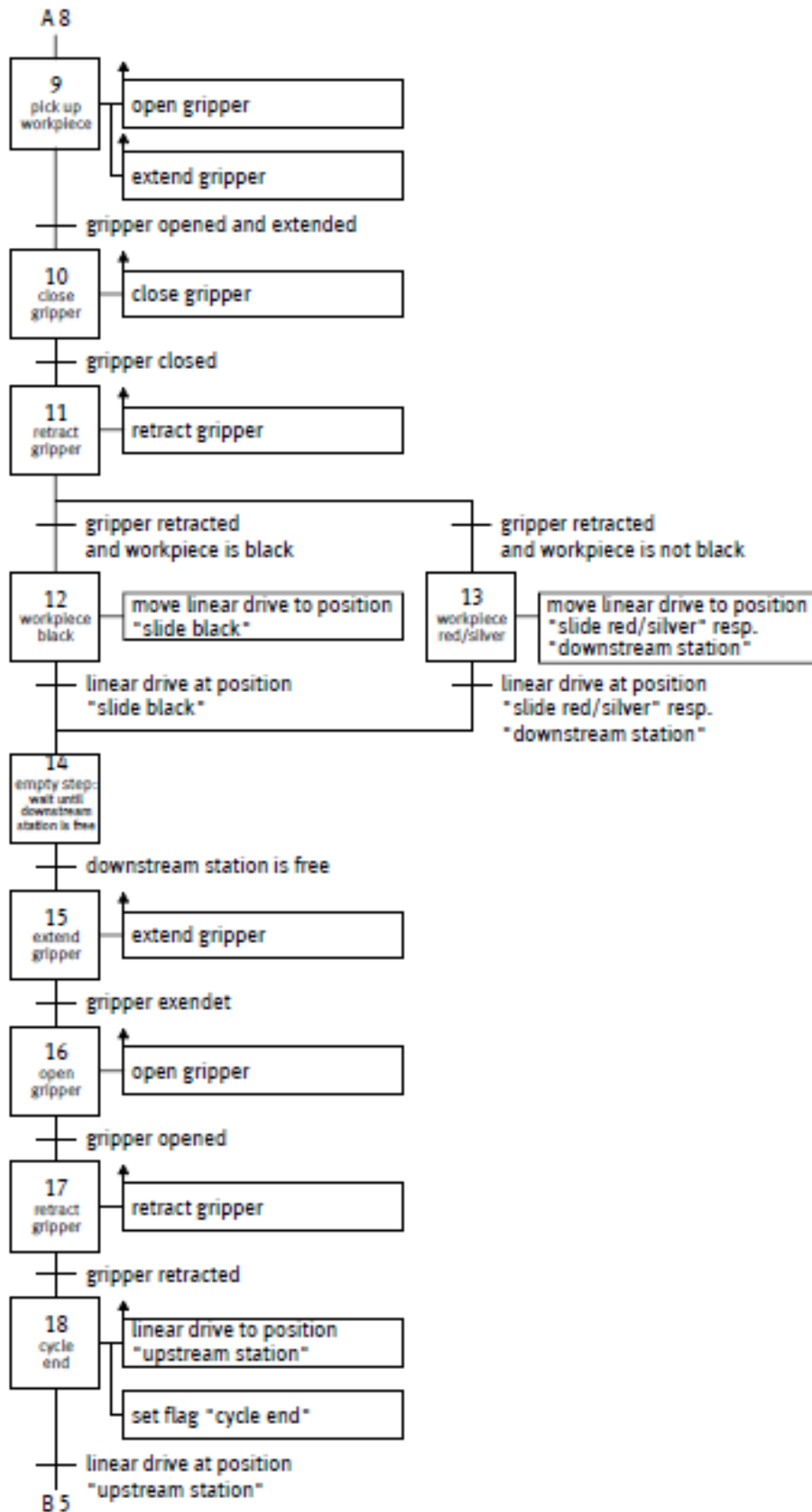


Рисунок 3 – Графсет програми роботи маніпулятора згідно DIN EN 60848 (IEC 60848). Продовження

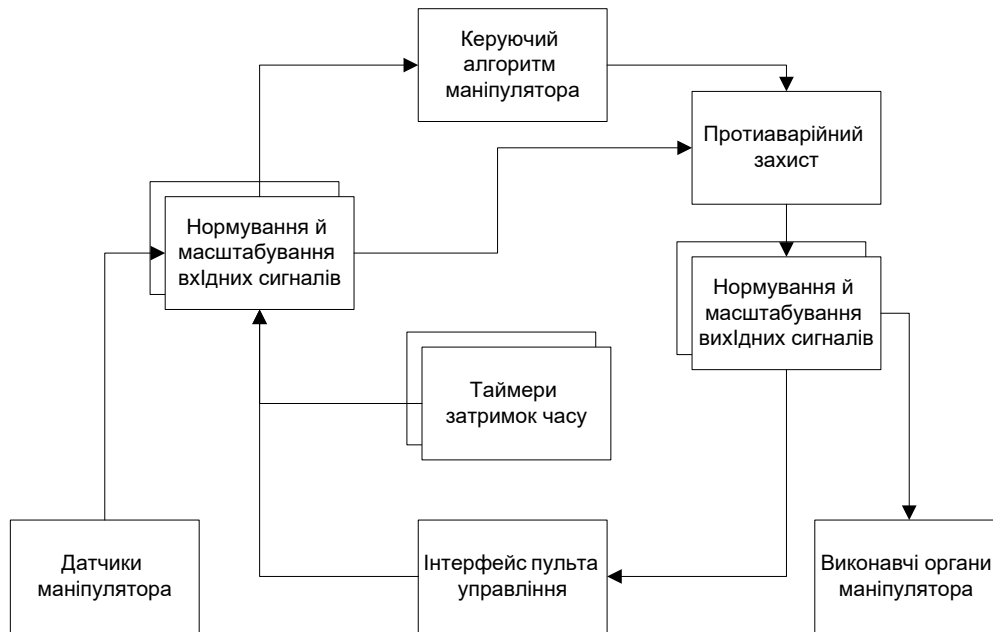


Рис. 4 Функціональна структура системи керування маніпулятором

Але і розрахунки для буріння локалізуються в рамках блоку нормування й масштабування. Власне, для керуючого алгоритму важливий лише факт досягнення маніпулятором заданого положення незалежно від способу отримання відповідної інформаційної ознаки. Проблема полягає в іншому. Якщо для лабораторного маніпулятора на 3 положення, показаного на рисунку 1, керуючий алгоритм описаний графсетом на 18 блоків, то у випадку з бурильною машиною, де кількість шпурів непостійна і складає близько 20..30, довжина алгоритму виростає на порядок.

Для вирішення проблеми зміни кількості інформаційних ознак на вході та виході функціонального блоку керуючого алгоритму можливо відійти від принципу написання керуючого алгоритму під конкретний пристрій на користь універсального алгоритму, що працює з групами інформаційних ознак.

Розглянемо входи маніпулятора згідно таблиці 1. Їх 9: інформаційних ознак, які надаються входами 8 та 1 внутрішня ознака затримки часу.

Можна представити ці 9 вхідних інформаційних ознак у вигляді звичайного двійкового числа виду $Z_0Z_1Z_2Z_3X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_8$. Число можна використати як координату у одновимірному масиві груп вихідних керуючих впливів, яких буде 8, тобто вистачить змінної типу BYTE. Група керуючих впливів буде являти собою число, наприклад, вигляду $Y_0Y_1Y_2Y_3Y_4Y_5Y_6Y_7$.

Іншими словами, якщо поставити у відповідність 11-розрядному ключеві пошуку готову вихідну комбінацію керуючих впливів, то замість складного графу керування отримаємо просту вибірку готового впливу на групи входів та паралелізм у видачі керуючих впливів. Робота програміста у такому рішенні зводиться до заповнення масиву вихідних впливів.

Але, у чистому вигляді показаний підхід насправді не спрощує роботу з програмування, оскільки довжина масиву вихідних впливів складе $2^{11}=2048$ комбінацій, причому більшість його елементів або будуть повторюватись, або не знадобляться, оскільки є технічні заборони і апаратно неможливі комбінації. Наприклад, каретка маніпулятора не зможе одночасно знаходитись у кількох місцях. Між тим, програмістові доведеться передбачити всі 2048 комбінацій. А якщо, наприклад, кран-маніпулятор складу обслуговує 30 комірок, то йому може знадобитися вже до 40 вхідних інформаційних ознак. Передбачити й внести у інформаційний вектор $2^{40}=1\,099\,511\,627\,776$ вихідних комбінацій неможливо, а оперативна пам'ять порядку терабайт у контролерах не застосовується.

Використаємо інший підхід. Розпишемо всі можливі комбінації вихідних сигналів $Y_0Y_1Y_2Y_3Y_4Y_5Y_6Y_7$ у таблиці 2.

Комбінації вихідних впливів, наведені у таблиці 2 для станції маніпулятору FESTO є достатніми. Їх можна зібрати у індексований одновимірний масив $Q[0..n]$, де $n=8$. Масив для розміщення у пам'яті контролера може використовувати тривіальний метод інформаційного вектора. Що стосується згаданого для порівняння крану-маніпулятору, то в цьому випадку кількість впливів також обмежена: лінійні рухи каретки; опускання й піднімання захвату; захват і відпускання вантажу. Щоправда, точок завантаження/вивантаження може близько 30, але на повну комбінацію вихідних впливів цей факт не впливає, оскільки чергова точка обирається шляхом впливів на обмежену кількість приводів.

Таблиця 2.

Допустимі комбінації вихідних впливів		
Індекс n	Комбінація $Y_0Y_1Y_2Y_3Y_4Y_5Y_6Y_7$	Опис впливу
0	0000 1000	Маніпулятор не готовий працювати. Захват підняти і закрити. Каретку зупинити. Подати сигнал-запрошення натиснути «reset».
1	1001 0000	Маніпулятор не готовий працювати. Захват підняти і закрити. Каретку рухати у бік точки завантаження.
2	0001 0100	Маніпулятор готовий працювати. Захват підняти і відкрити. Каретку зупинити. Подати сигнал-запрошення натиснути «start».
3	0001 0010	Маніпулятор працює в автоматичному режимі. Захват підняти і відкрити. Каретку зупинити. Індикатор роботи в автоматичному режимі включити
4	0011 0010	Маніпулятор працює в автоматичному режимі. Захват відкрити і опустити. Каретку зупинити. Індикатор роботи в автоматичному режимі включити
5	0000 0010	Маніпулятор працює в автоматичному режимі. Захват закрити і підняти. Каретку зупинити. Індикатор роботи в автоматичному режимі включити
6	0100 0010	Маніпулятор працює в автоматичному режимі. Захват закрити і підняти. Каретку рухати у бік точки вивантаження. Індикатор роботи в автоматичному режимі включити
7	0010 0010	Маніпулятор працює в автоматичному режимі. Захват закрити і опустити. Каретку зупинити. Індикатор роботи в автоматичному режимі включити
8	1001 0010	Маніпулятор працює в автоматичному режимі. Захват підняти і відкрити. Каретку рухати у бік завантаження. Індикатор роботи в автоматичному режимі включити

Тепер повернімося до ідеї використання комбінації вхідних інформаційних ознак в якості координат елемента масиву вихідних впливів. Її можливо реалізувати, якщо перейти від методу представлення масиву у вигляді інформаційного вектора до методу маргінального індексування елементів у багатовимірному базисі [2].

Щоб визначити мірність масиву з маргінальним індексуванням, скористаємося підходами, що поширені у ситуаційному керуванні[6]. Пропонуємо для описання станції маніпулятора ввести елементи мови ситуаційного керування (МСК) з поняттями, наведеними у таблиці 3.

Таблиця 3.

Поняття й імена МСК станції маніпулятора			
Позначення поняття	Опис	Інформаційні ознаки, що визначають імена у просторі поняття	Допустимі імена просторів понять у бінарній формі
a	Власний стан системи керування	Z_2Z_4	00 – станція не готова до роботи; 01 – нештатний режим; 10 – станція готова до роботи; 11 – станція працює в автоматичному режимі
b	Стан захоплювального пристрою	X_4X_5	00 – піднятий і закритий; 01 – опущений і закритий; 10 – піднятий і відкритий; 11 – опущений і відкритий
c	Положення каретки маніпулятора	$X_1X_2X_3$	000 – збереження попереднього стану; 100 – каретка на місці захоплення; 010 – каретка на місці сортування; 001 – каретка на місці вивантаження; 011, 101, 110, 111 – нештатний режим
d	Класифікація заготовки	$Z_0Z_3X_6$	000 – заготовка відсутня; 001, 010, 011, 100 – збереження попереднього стану; 110 – заготовка не чорна; 111 – заготовка чорна; 101 – нештатний режим

Таким чином, отримаємо групи інформаційних векторів $a[0..i]$, $b[0..j]$, $c[0..k]$, $d[0..l]$, де $i=j=3$, $k=l=7$. Тобто, величина максимального індексу вектору на 1 менша за його розмір. Сутність маргінального індексування у багатовимірному базисі полягає в тому, що кожен з масивів включає в себе посилання на групи масивів нижчого рівня. Тобто, масив найвищого рівня $a[0..i]$ містить $i+1$ посилань на $i+1$ масивів $b[0..j]$. В свою чергу, кожен з масивів $b[0..j]$ містить по $j+1$ посилань на $j+1$ масивів $c[0..k]$ і так далі, до рівня груп масивів $Q[0..n]$. На перший погляд, це здається ускладненням яке не принесе позитивного результату. Але багатовимірна матриця з маргінальним індексуванням застосована тут як засіб реалізації

мови ситуаційного керування, де імена нижчих рівнів понять співставлені за допомогою зв'язків приналежності з іменами понять вищих рівнів, формуючи семантичну форму $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow Q$ для звернення до обмеженого набору вихідних керуючих впливів, зібраних у векторі $Q[0..n]$. За умови, що групи інформаційних векторів $[0..i]$, $b[0..j]$, $c[0..k]$ та $d[0..l]$ містять лише посилання, на найнижчому рівні досить одного єдиного вектора $Q[0..n]$, що значно спрощує задачу заповнення даними.

Тепер поглянемо на таблицю 3. Серед допустимих імен різних просторів часто зустрічаються комбінації, що означають «збереження попереднього стану» і «нештатний режим». Що стосується стану об'єкту «збереження попереднього стану», немає сенсу його обробляти методом вибірки з матриці вихідних впливів. Якщо замінити всі коди імен «збереження попереднього стану» на недопустиме, -1, то в функціональному блоці «керуючий алгоритм маніпулятора» можна легко відмовитись від такої вибірки за допомогою блоку умовного переходу. Керуючись принципом «не нашкодь», усі індекси новостворених груп масивів $a[0..i]$, $b[0..j]$, $c[0..k]$, $d[0..l]$ необхідно за замовчуванням виставляти у -1, то тих пір, поки їх не перевизначить програміст, налагоджувальник, чи зовнішня система конфігурування.

Стани понять «нештатний режим» за аналогією можна також закодувати -1 і не обробляти, довірившись контуру протиаварійного захисту (ПАЗ). Але в умовах реальної експлуатації можуть виникати ситуації, не передбачені у ПАЗ. З цієї причини варто залишити можливість протиаварійного впливу на рівні керуючого алгоритму. Як правило, це один, чітко визначений вплив, спрямований на відключення всіх чи деяких виконавчих органів. У даному випадку це елемент $Q[0]$, хоча як нештатний вплив, він може бути представлений в окремому місці, не в масиві. Введемо ще одне недопустиме ім'я, яке оброблюється алгоритмічно, -2. У випадку її виявлення у індексних масивах, на виході подається комбінація $Q[0]$. Окрім зупинки виконавчих органів нештатний вплив, наприклад, може включати подачу сигналу аварії.

Звернімо увагу на ім'я $a[0]$ «станція не готова до роботи». Тут однозначна ситуація, коли жоден виконавчий орган не може бути задіяний, тому можна замінити його на -2, як для нештатного режиму. Змешивши, таким чином, кількість зв'язків належності, можна звернути увагу на різноманітність допустимих конструкцій МСК для об'єкта «станція маніпулятора».

В області понять a для встановлення зв'язків залишилися елементи $a[2]$ і $a[3]$. Область b залишилася без змін. В області c – $c[1]$, $c[2]$, $c[4]$. В області d – $d[0]$, $d[5]$, $d[6]$, $d[7]$.

Щоб перейти до стану готовності до роботи зі стану неготовності, станція повинна, за графсетом на рисунку 2, переміститись із піднятим і відкритим захватом у місце завантаження. Тому маємо такі мовні конструкції:

- 1) $a[2] \rightarrow b[0] \rightarrow c[1, \text{ або } 2, \text{ або } 4] \rightarrow d[0, \text{ або } 5, \text{ або } 6, \text{ або } 7] \rightarrow Q[1]$;
- 2) $a[2] \rightarrow b[0] \rightarrow c[1, \text{ або } 2, \text{ або } 4] \rightarrow d[0, \text{ або } 5, \text{ або } 6, \text{ або } 7] \rightarrow Q[2]$.

Варіантів, окрім $a[2] \rightarrow b[0]$ та $a[2] \rightarrow b[1]$ для роботи чи підготовки до роботи не існує. Інакше система знаходиться у нештатному режимі і потребує втручання з наступним перезапуском.

Насправді, незалежно від кольору заготовки на місці завантаження, від факту одночасної наявності чи відсутності деякої заготовки у захваті, від положення каретки маніпулятора, на момент натискання кнопки «reset» на панелі керування маніпулятор повинен прийняти вихідне положення, а потім подати сигнал-запрошення «start». Тому практичного сенсу реалізовувати таку поліваріативність команд мовою ситуаційного управління немає. Вихід – у ситуації неготовності станції маніпулятора до роботи у блоці нумрування і масштабування вхідних сигналів у момент натискання кнопки «reset» замінити інформаційні ознаки сигналів для понять c і d , надавши імена-індекси масивів 1 і 0 відповідно. Перекриття ознак для поняття c повинне протриматись до спрацювання датчика позиції каретки у місці завантаження. Перекриття ознак для поняття d – до переходу системи маніпулятора у стан «працює в автоматичному режимі». Тоді отримаємо:

- 1) $a[2] \rightarrow b[0] \rightarrow c[1] \rightarrow d[0] \rightarrow Q[1]$ – захват підняти і відкрити. Каретку рухати у бік точки завантаження;
- 2) $a[2] \rightarrow b[0] \rightarrow c[4] \rightarrow d[0] \rightarrow Q[2]$ – захват підняти і відкрити. Каретку зупинити. Подати сигнал-запрошення натиснути «start».

Якщо поглянути на останні мовні конструкції стає очевидним, що для їх реалізації засобами маргінального індексування достатньо використати не повну множину масивів, а лише один ланцюг із чотирьох масивів-індексаторів та одного масиву вихідних впливів, оскільки відмінність виявляється тільки у кінцевому елементі. Але, оскільки впливи Q у ситуації $a[2] \rightarrow b[0] \rightarrow c[k]$ різні, а елементи $d[0]$ однакові, знадобиться 2 окремих масиви $d[0..7]$, тобто всього буде 5 масивів. Структура цієї частини масиву вихідних впливів а також інших частин показана на рисунку 4.

Тепер розглянемо режим, заданий ім'ям $a[3]$. Йому потрібен окремий масив $b[0..3]$. Розглянемо стан $d[1]$ – «опущений і закритий». Він виникає для трьох випадків:

- 1) $a[3] \rightarrow b[1] \rightarrow c[4] \rightarrow d[6] \rightarrow Q[5]$, $a[2] \rightarrow b[1] \rightarrow c[4] \rightarrow d[7] \rightarrow Q[5]$ – каретка на місці завантаження. Подається група впливів: захват закрити і підняти; каретку зупинити;
- 2) $a[3] \rightarrow b[1] \rightarrow c[2] \rightarrow d[7] \rightarrow Q[3]$ – каретка на місці сортування. Подається група впливів: захват підняти і відкрити; каретку зупинити;

3) $a[3] \rightarrow b[1] \rightarrow c[1] \rightarrow d[6] \rightarrow Q[3]$ – каретка на місці вивантаження. Подається група впливів, аналогічна пункту 2).

Для опису ситуації $a[3] \rightarrow b[1] \rightarrow c[k]$ може знадобитися 3 різних масиви d , оскільки для різних положень каретки маніпулятора колір заготовки призводить до різних рішень. Так, для ситуації 1) колір заготовки не має значення, але її відсутність на місці подачі є нештатною ситуацією, тобто тут $d[0]=-2$. Для ситуації 2) $d[6]=-2$, оскільки це значить, що не чорна заготовка попала у лоток сортування, чого не повинно бути. Відповідно, для ситуації 3) $d[7]=-2$.

Тепер розглянемо початок руху каретки у бік вивантаження. Стан «піднятий і закритий». Під час руху змін з точки зору управління не відбувається, оскільки маємо $c[0]=-1$. Тут існує стан $b[0]$, оскільки маніпулятор несе заготовку:

1) $a[3] \rightarrow b[0] \rightarrow c[4] \rightarrow d[6] \rightarrow Q[6]$, $a[2] \rightarrow b[2] \rightarrow c[4] \rightarrow d[7] \rightarrow Q[6]$ – каретка на місці завантаження і маніпулятор підняв заготовку. Подається група впливів: захват закрити і підняти; каретку рухати у бік точки вивантаження;

2) $a[3] \rightarrow b[0] \rightarrow c[2] \rightarrow d[7] \rightarrow Q[7]$ – каретка на місці сортування, заготовка піднята. Подається група впливів: захват закрити і опустити; каретку зупинити;

3) $a[3] \rightarrow b[0] \rightarrow c[1] \rightarrow d[6] \rightarrow Q[7]$ – каретка на місці вивантаження, заготовка піднята. Подається група впливів, аналогічна пункту 2).

Аналогічно, для опису ситуації $a[2] \rightarrow b[0] \rightarrow c[k]$ може знадобитися 3 різних масиви d .

Стан «опущений і відкритий» може мати 3 ситуації:

1) $a[3] \rightarrow b[3] \rightarrow c[4] \rightarrow d[7] \rightarrow Q[5]$ – каретка на місці завантаження. Подається група впливів: захват закрити і підняти; каретку зупинити;

2) $a[3] \rightarrow b[3] \rightarrow c[2] \rightarrow d[7] \rightarrow Q[3]$ – каретка на місці сортування. Подається група впливів: захват підняти і відкрити; каретку зупинити;

3) $a[3] \rightarrow b[3] \rightarrow c[1] \rightarrow d[6] \rightarrow Q[3]$ – каретка на місці вивантаження. Подається група впливів, аналогічна пункту 2).

Як бачимо, для ситуацій $a[3] \rightarrow b[1] \rightarrow c[k]$ і $a[2] \rightarrow b[3] \rightarrow c[k]$ пункти 1), 2), 3) в частині $c \rightarrow d \rightarrow Q$ повністю співпали. Тому можна зорієнтувати елементи-вказівники масиву так, щоб використати вже існуючі гілки $c \rightarrow d \rightarrow Q$ не вводячи нових. Так отримуємо ефект скорочення витрат пам'яті за рахунок технології маргінального індексування.

Стан «піднятий і відкритий» може мати наступні ситуації:

1) $a[3] \rightarrow b[2] \rightarrow c[4] \rightarrow d[0] \rightarrow -1$ – заготовка відсутня. Зводимо цю ситуацію до необроблюваної, вказавши $d[0]=-1$;

2) $a[3] \rightarrow b[2] \rightarrow c[4] \rightarrow d[6] \rightarrow Q[4]$ – каретка на місці завантаження і з'явилась нова деталь у місці захоплення. Пройшла витримка часу за ознакою Z_0 . Колір заготовки ще не визначено. Подається група впливів: захват відкрити і опустити; каретку зупинити;

3) $a[3] \rightarrow b[2] \rightarrow c[2] \rightarrow d[7] \rightarrow Q[8]$ – каретка на місці сортування. Подається група впливів: захват підняти і відкрити; каретку рухати в бік завантаження;

4) $a[3] \rightarrow b[2] \rightarrow c[1] \rightarrow d[6] \rightarrow Q[8]$ – каретка на місці вивантаження. Подається група впливів, аналогічна пункту 3).

Пункти 2), для $a[3] \rightarrow b[2] \rightarrow c[k]$ оригінальний за ознакою виходу. Для нього необхідно ввести окремі масиви $c[0..7]$ та $d[0..7]$. А пункти 3) і 4) еквівалентні за виходами і потребують окремого, але одного масиву $d[0..7]$.

Результати розробки масиву вихідних впливів за сукупністю вхідних інформаційних ознак $a[0..i]$, $b[0..j]$, $c[0..k]$, $d[0..l]$ показано на рисунку 5. Для роботи з елементами $Q[i;j;k;l;n]$ маргінально індексованого масиву, необхідно і достатньо використовувати алгоритм, наведений на рисунку 6.

Висновки. Представлена архітектура обчислювального вузла надає переваг для написання програмного забезпечення для мехатронних пристроїв гірничовидобувної галузі порівняно з рішеннями, рекомендованими розробниками стендів з мехатроніки:

1. Розробка алгоритмів на основі представленої функціональної структури дозволяє структурувати програмне забезпечення вузла. Відділення процесів підготовки вхідної, вихідної інформації та обробки часових величин від основного керуючого алгоритму дозволяє полегшити відлагодження програм при зміні датчиків, засобів інтерфейсу, їх фізичних та інформаційних характеристик. Оскільки основний алгоритм працює з абстрактними інформаційними ознаками, він таких випадках не потребує втручання;

2. Організація роботи з групами інформаційних ознак і вихідних керуючих впливів як з цільними машинними словами обчислювальної системи дозволяє отримати паралельне обчислення і видачу керуючих впливів, що підвищує продуктивність та надійність алгоритму.

3. Використання груп вхідних інформаційних ознак у якості координат масиву готових вихідних керуючих впливів скорочує основний керуючий алгоритм до простого вибору елемента з масиву. У випадку зміни завдання мехатронного пристрою замість зміни алгоритму будуть змінюватись дані масиву керуючих впливів, що на сьогодні може бути виконано не лише програмістом безпосередньо, але й за допомогою системи підготовки даних;

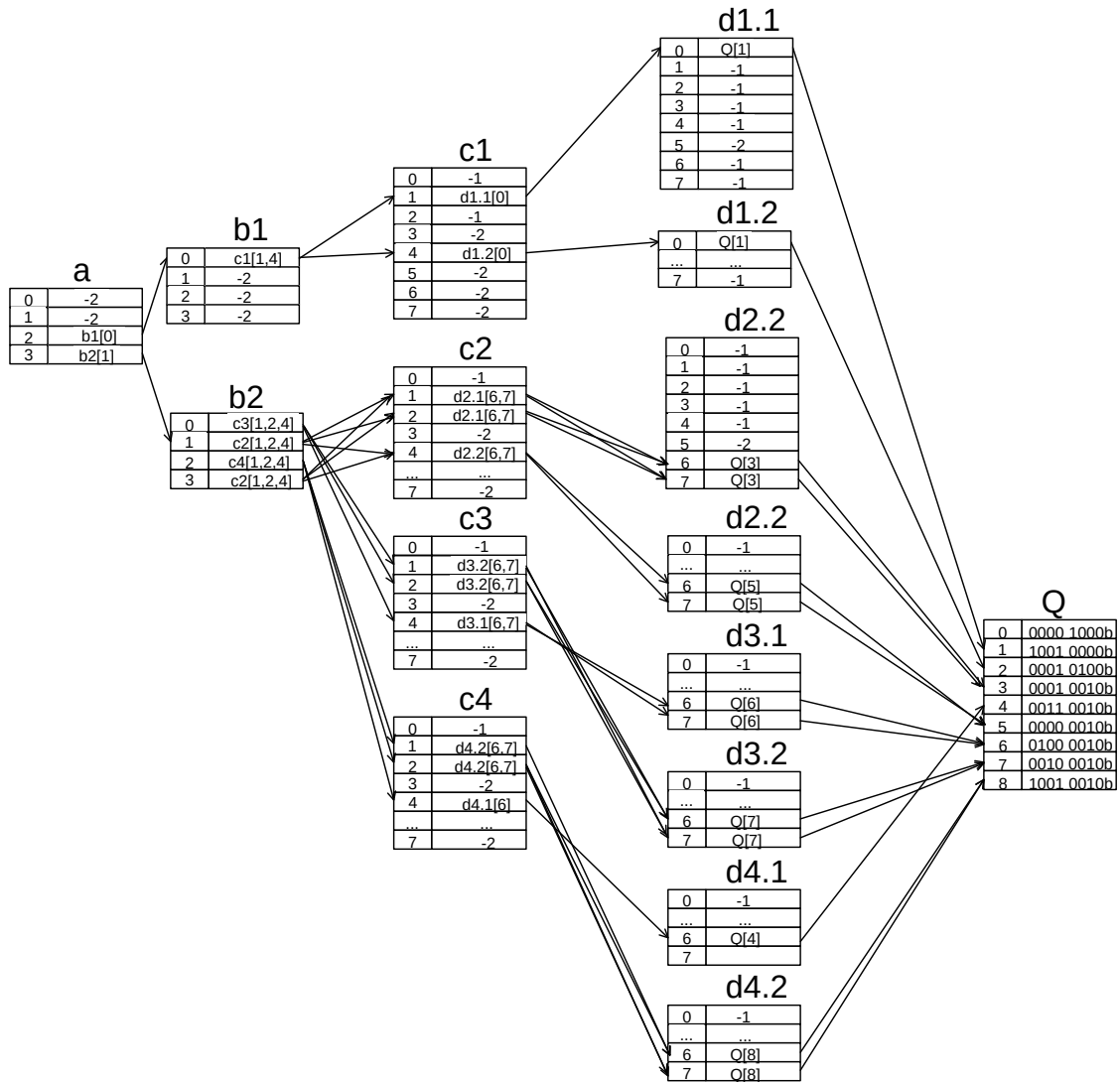


Рисунок 5 – Структура 5-вимірного маргінально індексованого масиву вихідних керуючих впливів станції маніпулятора

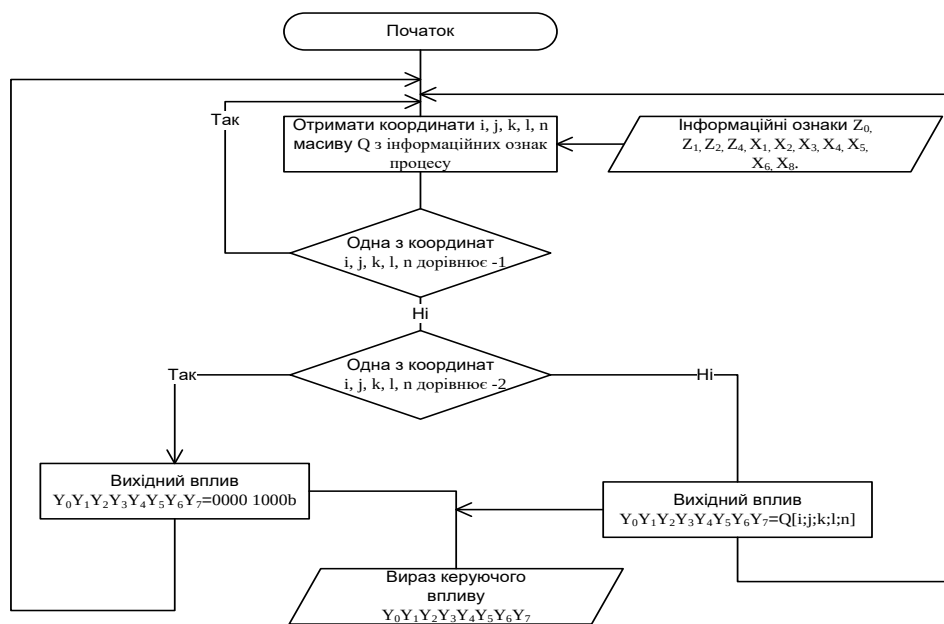


Рисунок 6 – Керуючий алгоритм маніпулятора

4. Організація масиву вихідних впливів як маргінально індексованого дозволяє економити оперативну пам'ять і значно спростити процес редагування самого масиву. Наприклад, кількість елементів кінцевого масиву Q можна збільшити без необхідності будь-яких змін масивів індексації $a[0..i]$, $b[0..j]$, $c[0..k]$, $d[0..l]$. Оскільки масиви індексації – самостійні елементи, їх також можна додавати, змінювати зв'язки, видаляти в залежності від зміни окремих операцій без шкоди іншим.

Наукова новизна. На основі виразів мови ситуаційного керування, складених з інформаційних ознак стану об'єкту керування, побудовано маргінально індексний масив продукцій вихідних впливів, який дозволяє замість алгоритму керування за графом використати простий алгоритм вибору з масиву без перевитрат оперативної пам'яті, які виникають у такому рішенні за умови використання інформаційних векторів вихідних впливів.

Практичні результати. Запропоновано метод задання дій маніпулятора, який дозволяє відмовитись від програмування його обчислювального вузла на користь задання структур даних безпосередньо програмістом або засобами автоматичних систем проектування чи налагодження. Метод дозволяє відокремити обчислювальний вузол від мехатронного пристрою і використовувати окремо або замінювати обчислювальні вузли під час експлуатації.

Подальше дослідження планується вести у напрямку розробки алгоритмів підготовки даних для основного керуючого функціонального блоку. Оскільки у реального промислового обладнання можуть бути існують не лише дискретні датчики, але й вимірювальні прилади (ваги, положення, вуглу повороту та ін.), їх дані підлягають обробці і підготовці до надання керуючому алгоритму.

Перелік посилань

1. Программируемый контроллер S7-1200. Системное руководство. – Siemens: 11/2009, A5E02669003-02. – 397 с.
2. Эндрю Таненбаум. Многоуровневая организация ЭВМ. - М.: "Мир", 1979. - 552 с.
3. Station Handhaben. Handbuch. – Festo Didactic GmbH & Co: 655633 DE/EN 06/10 R2.3. – 116 p.
4. FESTO MPS STATIONS. Технічна документація (Керівництво для користувачів). – Wordskills Ukraine 2020: Version 1.0 - 17.02.2020. – 64 p.
5. ГОСТ 34.601-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизованные системы. Автоматизованные системы. Стадии создания.
6. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. – М.: Наука. – Гл. ред. физ. мат. лит., 1986. – 288 с.

АННОТАЦИЯ.

Цель работы. Разработать архитектуру вычислительного узла и управляющий алгоритм мехатронного устройства, которые позволяют сократить трудозатраты на программирование и отладки за счет унификации метода программирования.

Методика исследования. Анализ решений, рекомендаций и алгоритмов управления от производителя станции манипулятора. Эскизное проектирование систем в части функциональных структур. Синтез алгоритма и структуры данных с использованием методов ситуационного управления и методов организации хранения данных в памяти компьютера.

Результаты исследования. Предложена общая функциональную структуру вычислительного узла мехатронного устройства, обоснованно ее свойства и преимущества, предложен универсальный подход к написанию алгоритма основного управляющего блока станции манипулятора. Синтезирован язык ситуационного управления для разработки структуры данных в форме, позволяющей гибко менять технологические задачи станции манипулятора. Представлен алгоритм основного управляющего блока программы станции манипулятора, который реализует выборку управляющих воздействий из массива по входным информационными признаками и является универсальным.

Научная новизна. Построен маргинально индексированный массив продукций выходных воздействий, который позволяет вместо алгоритма управления на основе графа использовать простой алгоритм выбора из массива без перерасхода оперативной памяти, которые возникают в таком решении при использовании информационных векторов выходных воздействий.

Практические результаты. Предложен метод задания действий манипулятора, который позволяет отказаться от программирования его вычислительного узла в пользу задания структур данных непосредственно программистом или средствами автоматических систем проектирования или отладки. Метод позволяет отделить вычислительный узел от мехатронного устройства и использовать отдельно или заменять вычислительные узлы во время эксплуатации без перепрограммирования.

Ключевые слова: Манипулятор, вычислительный узел, контроллер, функциональная структура, станция манипулятору FESTO, ситуационное управление, маргинальное индексирования, графсет, управляющее воздействие, семантическая связь.

ABSTRACT

The purpose of the work. Develop the architecture of the computing node and the control algorithm of the mechatronic device, which reduce labor costs for programming and debugging by unifying the programming method.

Research methodology. Analysis of solutions, the recommendations and control algorithms from the manufacturer of the manipulator station. Sketch design of systems in terms of functional structures. Synthesis of algorithm and data structure using situational control methods and methods of organizing data storage in computer memory.

Research results. The general functional structure of the computing unit of the mechatronic device is offered, its properties and advantages are substantiated, the universal approach to writing of algorithm of the basic control block of station of the manipulator is offered. The situational control language has been synthesized for the development of a data structure in a form that allows to flexibly change the technological tasks of the manipulator station. The algorithm of the main control unit of the manipulator station program is presented, which implements the sampling of control influences from the array according to the input information features and is universal.

Scientific novelty. A marginally indexed array of output products is constructed, which allows using a simple algorithm of selection from the array instead of graphical control without overuse of RAM, which arises in such a solution when using information vectors of output effects.

Practical results. A method for setting the actions of the manipulator is proposed, which allows to abandon the programming of its computing node in favor of setting data structures directly by the programmer or by means of automatic design or debugging systems. The method allows to separate the computing node from the mechatronic device and to use it separately or to replace the computing nodes during operation without reprogramming.

Keywords: Manipulator, computing node, comptroller, functional structure, FESTO manipulator station, situational control, marginal indexing, graphset, control effect, semantic connection.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Ткачевим В.В.

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЛОЧНОСТИ МАССИВА СКАЛЬНОЙ ПОРОДЫ И КУСКОВАТОСТИ ГОРНОЙ МАССЫ НА КАРЬЕРАХ

П.М. Щербakov¹, С.Є. Тимченко², Г.І. Торопцев³

¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
shcherbakov.p.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-1564-9016

² Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
tymchenko.s.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-6314-420x

³ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
toroptsev.h.i@nmu.one

DEVICE FOR AUTOMATIC MEASUREMENT OF THE NATURAL BLOCKING OF ROCK MASS AND LUMPING OF ROCK MASS IN PITS

P. Sherbakov¹, S. Tymchenko², G. Toropcev³

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
shcherbakov.p.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-1564-9016

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
tymchenko.s.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-6314-420x

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
toroptsev.h.i@nmu.one

Анотація. Ефективний видобуток скельного корисних копалин відкритим способом вимагає попередньої підготовки видобутої породи. Найчастіше це робиться за допомогою буропідричних робіт, що дозволяє отримувати на виході гірську масу зручною для подальшого видобутку кусковатості.

Мета даної статті представити технічну розробку пристрою автоматичного оперативного вимірювання розмірів природного блочності масиву скельних порід і шматків гірської маси, отриманої буропідричних способом.

Методика. В основу пристрою покладено явище модулювання електронного променя зчитує блоку різною освітленістю частинок і проміжків між ними. Вимірювання безпосередньо в кар'єрі досягаються тим, що в пристрої використано принцип зчитування розмірів природних отдельностей масиву скельних порід або шматків гірської маси променем передавальної телевізійної трубки і диференціювання їх електронно-імпульсної схемою.

Результати. За результатами вибірових спостережень складено статистичні розподілу досліджуваних ознак і за допомогою двопараметричної функції обчислені теоретичні частоти для тих же значень переважної функції і її змісту в даному обсязі.

Наукова новизна. Отримання необхідної інформації відбувається безпосередньо в кар'єрі. Статистичні дослідження показали достатню точність вимірювань. Зазначені характеристики ступеня дроблення скельних порід є параметрами функції, що обумовлює необхідну точність математичного моделювання гірничих процесів. Візуальне порівняння графіків емпіричного і теоретичного розподілів розмірів фракцій в кожному випадку вимірювання показало технологічну прийнятність пристрою.

Практична значимість. Оперативне отримання об'єктивної інформації про стан масиву породи до вибуху і після нього дозволить реалізувати оптимальне управління комплексом буропідричних робіт (БПР) на кар'єрах згідно, критерієм якості гірської маси.

Ключові слова. Передавальна телевізійна трубка, транзистор, природна окремість скельної породи, кусковатість гірської маси.

Введение. Добыча скального полезного ископаемого открытым способом предусматривает предварительное дробление с помощью буро-взрывных работ, т.е. подготовку горной массы требуемой кусковатости. Эффективность управления комплексом БВР существенно зависит от оперативности и досто-

верности информации о состоянии массива породы до взрыва и после его проведения. В производственных условиях, обычно, выбор параметров БВР осуществляется на основе субъективной оценки взрываемости породы и результатов предыдущих взрывов в аналогичных горно-геологических условиях. В научно-исследовательских работах наиболее распространен фотопланиметрический способ оценки гранулометрического состава горной массы, при котором необходимо сделать множество фотоснимков поверхности развала с последующими вычислениями линейных размеров кусков и их распределение в плоскости каждой фотографии [1]. Такой метод информационного обеспечения исследований трудоемкий, не всегда надежный и небезопасный.

Автоматический способ обработки фотопланов предложено в [2], при этом точность результатов значительно выше, чем при ручном анализе, однако, он требует выполнения множества фотоснимков, причем они должны быть хорошего качества.

Оперативность получения информации обеспечивает устройство измерения гранулометрического состава горной массы в процессе ее экскавации [3]. Его экспериментальный образец успешно прошел промышленные испытания, но только при оценке кусковатости горной массы.

Предложено техническое решение устройства, позволяющего оперативно измерять размеры естественных блоков взрываемого массива породы и кусковатости горной массы [4]. Его применение на карьерах позволит реализовать оптимизацию буро-взрывных работ.

Задачи исследований. Представить техническую разработку устройства оперативного измерения естественной блочности массива скальной породы и кусков горной массы, полученной буро-взрывным способом. Указать режимы его эксплуатации и привести принципиальную схему блока синхронизации, предназначенного для их исполнения. На основе выборочных наблюдений составить статистические распределения размеров естественных блоков породы и кусков горной массы. Применить двухпараметрическую функцию распределения гранулометрического состава в качестве эталона для сравнения с экспериментальными данными. Сделать вывод о возможности применения устройства при оптимизации комплекса БВР на карьерах.

Решение задачи исследований. Устройство для автоматического контроля качества дробления горной массы использует принцип считывания размеров ее кусков лучом передающей телевизионной трубки и дифференцирования их электронно-импульсной схемой. Блок-схема устройства показана на рис.1.

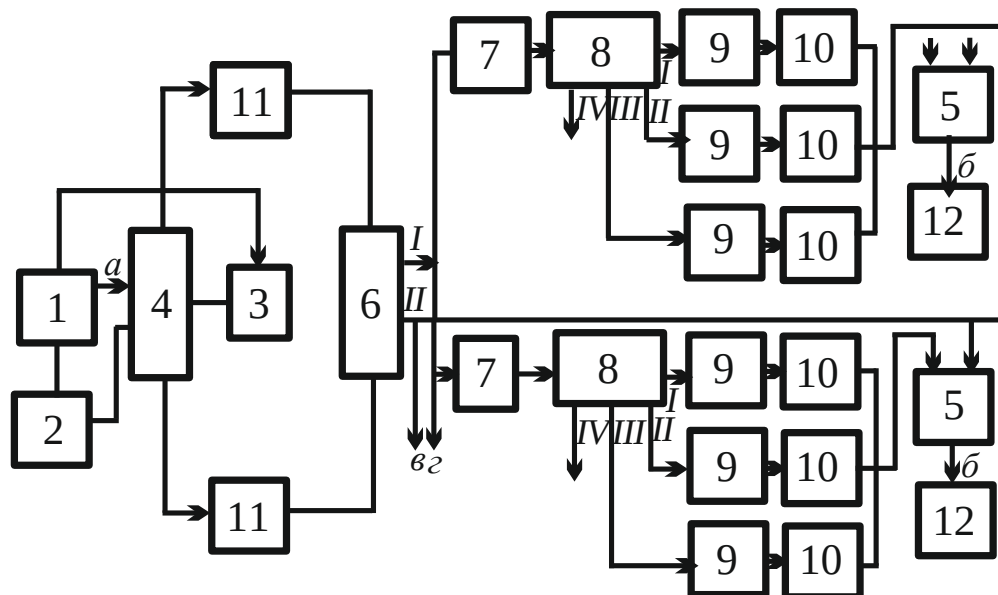


Рисунок 1 – Блок-схема устройства автоматического контроля качества дробления горной массы

Она содержит считывающий блок 1, генератор прямоугольных импульсов 2, электронные ключи 3, 4, 5, схему антисовпадений 6, генераторы 7, линии задержки 8, усилители мощности 9, ждущие мультивибраторы (формирователи) 10, пусковое устройство 11, пересчетное устройство 12.

В основу работы устройства положено явление модулирования электронного луча считывающего блока различной освещенностью кусков горной массы и промежутков между ними. В качестве считывающего блока применены передающая телевизионная трубка, узел синхронизации и развертки телевизионной установки.

Принципиальная электрическая схема устройства показана на рис. 2.

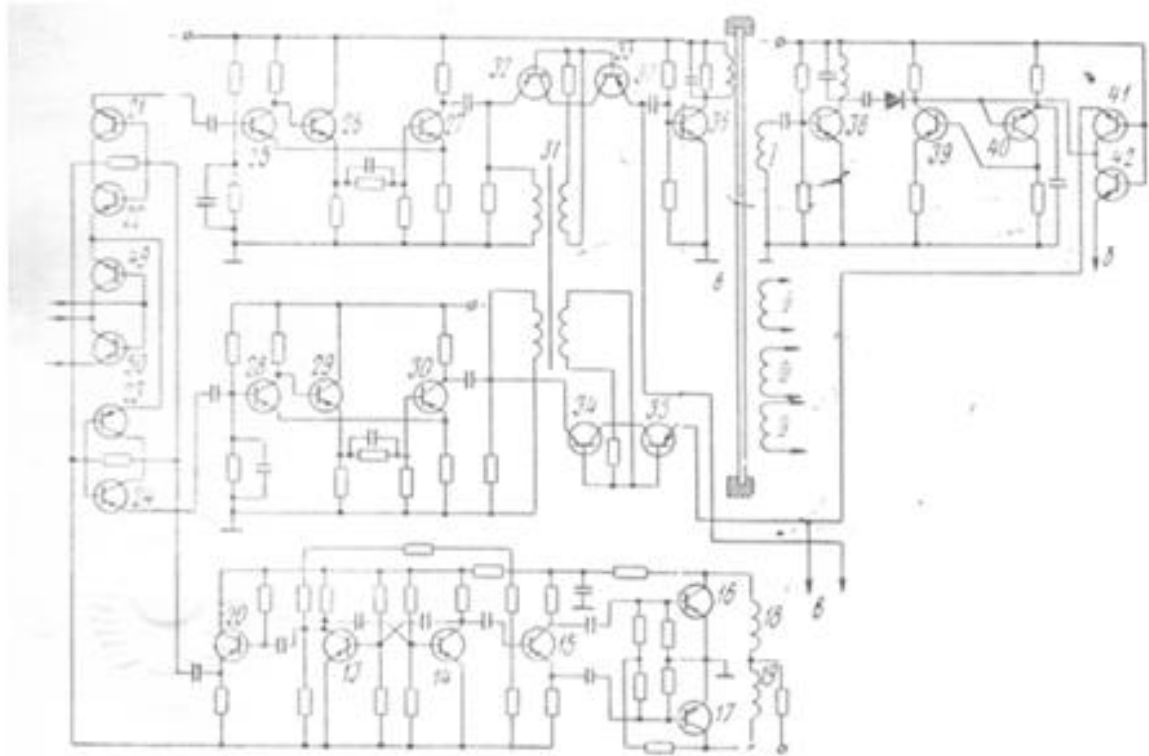


Рис. 2 Принципиальная схема устройства автоматического контроля качества дробления горной массы

Работает она следующим образом. Изображение исследуемого объекта проецируется на фотокатод передающей трубки. Электронный луч трубки моделируется генератором прямоугольных импульсов, в качестве которого использован симметричный мультивибратор, собранный на транзисторах 13, 14. Прямоугольные импульсы генератора, пройдя через фазоинверсную ступень на транзисторе 15, усиливаются двухтактным усилителем мощности, собранным на транзисторах 16, 17. Его нагрузкой являются дополнительные отклоняющие катушки 18, 19 передающей трубки. Благодаря отклонению электронного луча трубки прямоугольными импульсами изображение исследуемого объекта прочерчивается двумя параллельными пунктирными линиями. В зависимости от яркости считываемого участка изменяется величина напряжения на нагрузке передающей трубки.

Генератор прямоугольных импульсов через эмиттерный повторитель на транзисторе 20 управляет электронными ключами, собранными на транзисторах 21, 22, 23, 24. С помощью электронных ключей информация от верхней и нижней пунктирных строк каждого прочерчивания направляется по независимому каналу для дальнейшей обработки. Так как освещенность плоскости кусков значительно выше, чем освещенность промежутков между ними, то при прохождении верхней пунктирной линии по промежутку между кусками, а нижней по плоскости куска, спусковое устройство, транзисторы 25 – 27, формирует импульс, который соответствует первому (начальному) прочерчиванию всего куска. Когда нижняя пунктирная линия проходит по промежутку между кусками, а верхняя по плоскости куска, спусковое устройство, транзисторы 28 – 30, формирует импульс, который соответствует последнему прочерчиванию электронными лучами отдельного куска породы. Импульсы, соответствующие первому и последнему прочерчиванию каждого куска, разнесены во времени пропорционально линейному размеру куска. Порог срабатывания спусковых устройств выбирается так, чтобы исключить влияние неравномерностей освещенности поверхности кусков на достоверность результатов.

Импульсы, сформированные спусковыми устройствами, поступают в схему антисовпадений, состоящую из трансформатора 31 и электронных ключей на транзисторах 32, 33 и 34, 35. Схема антисовпадений исключает появление сигнала на обоих выходах одновременно при прочерчивании электронным лучом передающей трубки участков с одинаковой освещенностью. Импульс, соответствующий первому прочерчиванию куска, через электронный ключ (32,33) в каждом канале поступает на вход генератора с контуром ударного возбуждения, собранного на транзисторе 36.

Контур генератора состоит из конденсатора 37 и индуктивности, выполненной в виде входной обмотки магнитострикционной линии задержки 8. (рис.1). Генератор выдает несколько высокочастотных колебаний, которые распространяются в линии задержки. Магнитострикционная линия задержки имеет несколько выходных обмоток, расположенных таким образом, что импульс первого прочерчивания куска появляется на выходе I спустя время, пропорциональное минимальному размеру куска данного канала счета. Продолжая распространяться в линии задержки, импульс появляется на ее последующих выходах II, III, IV, соответственно через промежутки времени, соответствующие прочерчиванию одной строки.

С выхода каждой обмотки линии задержки сигнал поступает на соответствующий усилитель 9 (рис.1), при этом для первого канала счета усилитель собран на транзисторе 38. Этот сигнал поступает и на формирователь – ждущий мультивибратор 10 (рис.1), собранный на транзисторах 39, 40. Мультивибратор формирует прямоугольный импульс и подает его на электронный ключ 5 (рис.1), собранный на транзисторах 41, 42. На ключ через транзисторы 34, 35 поступает импульс, соответствующий последнему прочерчиванию этого же куска.

Импульс последнего прочерчивания каждого куска поступает одновременно на электронные ключи всех каналов счета. В том канале счета, где происходит совпадение во времени импульсов первого и последнего прочерчивания отдельного куска, выдается импульс на пересчетное устройство 12 (рис.1), в котором сумма кусков (данного канала) увеличивается на единицу. Пересчетное устройство представляет собой быстродействующий счетчик импульсов с пересчетными ячейками. Количество каналов счета выбирают в зависимости от необходимого качества фракционного анализа.

Устройство может работать, как в режиме непрерывного считывания, так и в ждущем режиме. Это достигается путем применения блока синхронизации, рис. 3.

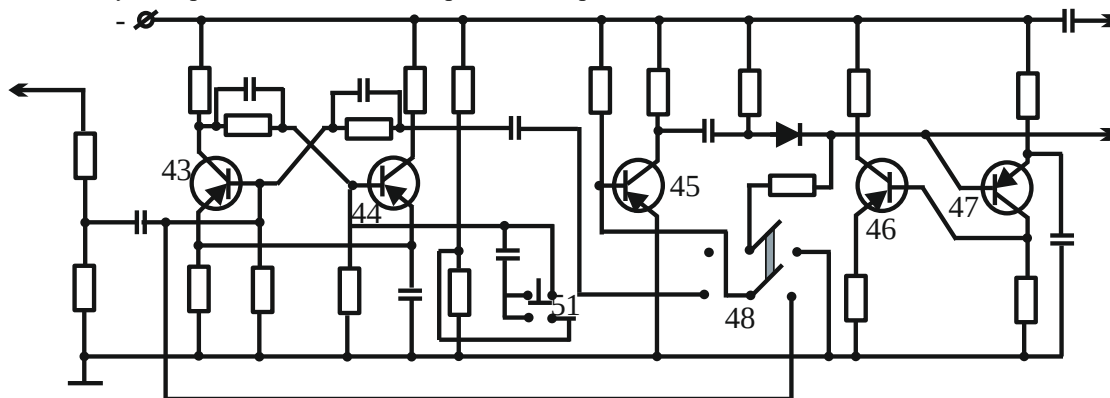


Рис. 3 Принципиальная схема блока синхронизации

Этот блок состоит из триггера на транзисторах 43, 44, усилителя на транзисторе 45 и ждущем мультивибраторе на транзисторах 46, 47.

В ждущем режиме переключатель 48 устанавливают в левое крайнее положение. Триггер опрокидывается кадровым гасящим импульсом развертывающего устройства передающей трубки и опрокидывает ждущий мультивибратор. Мультивибратор выдает прямоугольный импульс, длительностью, равной длительности одного кадра, и опрокидывает электронный ключ на транзисторах 49, 50 (рис.2). Для повторного считывания необходимо нажать кнопку 51 (рис.3). В режиме непрерывного считывания переключатель 48 (рис.3) ставят в крайнее правое положение, при этом кадровый гасящий импульс через усилитель 45 поступает на ждущий мультивибратор, который открывает электронный ключ на транзисторах 49, 50 при каждом кадре считывания. Представленное устройство позволяет считывать только видимые куски горной массы, поэтому результаты их измерений будут иметь некоторые погрешности.

Выполнены статистические исследования результатов измерений естественной блочности гранитов, добывающихся для производства щебня, а также гранулометрического состава горной массы, полученной при их дроблении взрывом. Для этого воспользуемся следующей двухпараметрической функцией [5]:

$$f(x) = e\Delta\left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{\gamma} e^{-\left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{\gamma}}, \quad (1)$$

где x_{max} , Δ - соответственно, размер и содержание преобладающей фракции в развале горной массы, т.е. мода и модальное значение функции;

γ - нормирующий множитель, значение которого находится из условия

$$I = e\Delta \int_0^{\infty} \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{\gamma} e^{-\left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{\gamma}} dx = 1 \quad (2)$$

Согласно [2] имеем

$$I = \frac{e\Delta x_{max}}{\gamma} \Gamma\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right),$$

где $\Gamma\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)$ - гамма функция Эйлера.

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx.$$

Следует отметить, что параметры функции (1) обеспечивают необходимую точность математического моделирования гранулометрического состава горной массы, кроме того они технологичны, т.к. в первом приближении характеризуют качество дробления горных пород взрывом.

Статистическое распределение размеров естественных отдельностей в выборке объемом $n = 2300$, а также теоретические частоты, вычисленные по функции (1) для тех же значений преобладающей отдельности и ее содержания, приведены в табл.1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных и теоретических исследований распределения размеров естественных отдельностей гранита

Интервалы размеров, м $x_i; x_{i+1}$	0; 0.6	0.6; 1.2	1.2; 1.8	1.8; 2.4	2.4; 3.0	3.0; 3.6	3.6; 4.2	4.2; 4.8	4.8; 5.4
Средние значения $\bar{x}_i$	0.3	0.9	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9	4.5	5.1
Варианты n_i	83	470	552	497	360	193	110	28	7
Относительные частоты W_i	0.06	0.34	0.4	0.36	0.26	0.14	0.08	0.021	0.003
Значения $f(x)$, $x_{max} = 1.5$ $\Delta = 0.4$; $\gamma = 1.47$	0.09	0.32	0.4	.35	0.24	0.14	0.07	0.04	0.01

Графики, построенные по этим данным показаны на рис.4.

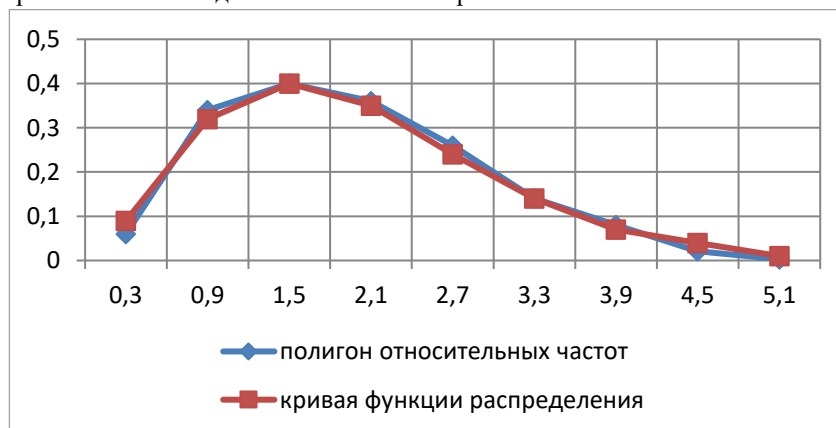


Рисунок 4 – Графики статистического исследования размеров естественных отдельностей гранитов

Аналогично выполнены экспериментальные и теоретические оценки кусковатости горной массы, полученной с помощью буро-взрывных работ. При этом объем выборки составил $n = 3850$. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистическое распределение кусков горной массы и теоретические частоты этого признака

Интервалы размеров, м $x_i; x_{i+1}$	0; 0,4	0,4; 0,8	0,8; 1,2	1,2; 1,6	1,6; 2,0	2,0; 2,4	2,4; 2,8	2,8; 3,2	3,2; 3,6	3,6; 4,0
Средние значения $\bar{x}_i$	0,2	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8
Варианты n_i	432	970	785	693	431	262	123	77	46	31
Относительные частоты W_i	0,28	0,63	0,51	0,45	0,28	0,17	0,08	0,05	0,03	0,02
Значения $f(x)$, $x_{max} = 0,6$ $\Delta = 0,03$; $\gamma = 1,0$	0,4	0,63	0,54	0,38	0,24	0,15	0,09	0,06	0,03	0,02

Графики, построенные по этим данным показаны на рис.5.

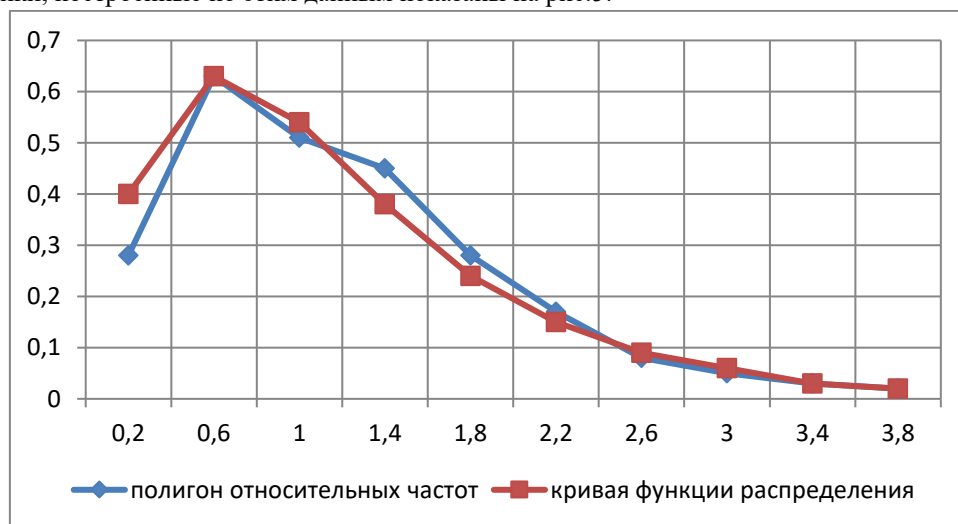


Рисунок 5 – Графики статистического исследования кусковатости горной массы

Визуальные сравнения рис. 4 и 5 показывают, что результаты экспериментальных измерений и математического моделирования более значимо различаются при исследовании гранулометрического состава горной массы. Это объясняется тем, что в ее объеме одни куски могут перекрывать другие, а мелкие фракции проваливаются под крупные. Однако, указанные погрешности не оказывают существенного влияния на обоснование и выбор параметров БВР в производственных условиях.

В целом, разработанное устройство позволяет оперативно получить объективную информацию о состоянии массива до взрыва и после него, необходимую для оптимизации комплекса БВР по критерию качества горной массы.

Выводы.

1. Представлено автоматическое устройство измерения размеров естественных отдельностей, составляющих массив разрабатываемых скальных пород, а также кусков, находящихся в развале горной массы.
2. В основу работы устройства положено явление модулирования электронного луча считывающего блока различной освещенностью частиц и промежутков между ними.

3. Получение необходимой информации непосредственно в карьере достигается тем, что в устройстве использован принцип считывания размеров естественных отдельностей или кусков горной массы лучом передающей телевизионной трубки и дифференцирования их электронно-импульсной схемой.
4. В результате статистических исследований данных, полученных экспериментально и математическим моделированием, установлено, что точность измерений устройством соответствует принятой в горном деле.
5. Предложенное устройство в перспективе будет использовано для получения необходимой информации при оптимальном управлении комплексом БВР на карьерах.

Литература

1. Вилкул Ю.Г., Перегудов В.В.. Влияние гранулометрического состава взорванной горной массы на технико-экономические показатели работы карьеров. Криворожский технический университет. 2011. Выпуск № 2.
2. Шустерман С.А. Автоматический анализ гранулометрического состава взорванной горной массы по фотограм. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007, С. 52 - 58
3. Р.С. Крысин, П.Н. Щербаков, В.М. Ткаченко Устройство для определения гранулометрического состава горной массы / А.С. №541928, Е 02F3/00, G 01 №15/00
4. Р.С. Крысин, П.Н. Щербаков, В.М. Ткаченко Устройство для автоматического определения гранулометрического состава горной массы / А.С. №409117, G 01 n 15/00
5. Sherbakov, P., Klymenko, D., & Tymchenko, S. (2017). Statistical research of shovel excavator performance during loading rock mass of different crushing quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 49-54.

АННОТАЦИЯ

Аннотация. Эффективная добыча скального полезного ископаемого открытым способом требует предварительной подготовки добываемой породы. Чаще всего это делается с помощью буровзрывных работ, что позволяет получать на выходе горную массу удобной для дальнейшей добычи кусковатости.

Цель данной статьи представить техническую разработку устройства автоматического оперативного измерения размеров естественной блочности массива скальных пород и кусков горной массы, полученной буровзрывным способом.

Методика. В основу устройства положено явление модулирования электронного луча считывающего блока различной освещенностью частиц и промежутков между ними. Измерения непосредственно в карьере достигаются тем, что в устройстве использован принцип считывания размеров естественных отдельностей массива скальных пород или кусков горной массы лучом передающей телевизионной трубки и дифференцирования их электронно-импульсной схемой.

Результаты. По результатам выборочных наблюдений составлены статистические распределения исследуемых признаков и с помощью двухпараметрической функции вычислены теоретические частоты для тех же значений преобладающей функции и ее содержания в данном объеме.

Научная новизна. Получение необходимой информации происходит непосредственно в карьере. Статистические исследования показали достаточную точность измерений. Указанные характеристики степени дробления скальных пород являются параметрами функции, что обуславливает требуемую точность математического моделирования горных процессов. Визуальное сравнение графиков эмпирического и теоретического распределений размеров фракций в каждом случае измерения показало технологическую приемлемость устройства.

Практическая значимость. Оперативное получение объективной информации о состоянии массива породы до взрыва и после него позволит реализовать оптимальное управление комплексом буровзрывных работ (БВР) на карьерах согласно, критерию качества горной массы.

Ключевые слова. *Передающая телевизионная трубка, транзистор, естественная отдельность скальной породы, кусковатость горной массы.*

ABSTRACT

Abstract. Efficient open pit mining of rocky minerals requires preliminary preparation of the extracted rock. Most often this is done with the help of drilling and blasting operations, which makes it possible to obtain a rock mass at the exit that is convenient for further extraction of lumpiness.

The purpose of this article is to present the technical development of a device for automatic on-line measurement of the size of the natural blockiness of a rock mass and pieces of rock mass obtained by drilling and blasting.

Methodology. The device is based on the phenomenon of modulation of the electronic beam of the reading unit with different illumination of particles and the gaps between them. Measurements directly in the quarry are achieved by the fact that the device uses the principle of reading the dimensions of natural units of a rock mass or pieces of rock mass by a beam of a transmitting television tube and differentiating them by an electronic pulse circuit.

Results. Based on the results of sample observations, statistical distributions of the studied characteristics were compiled and, using a two-parameter function, theoretical frequencies were calculated for the same values of the dominant function and its content in a given volume.

Scientific novelty. Obtaining the necessary information takes place directly in the quarry. Statistical studies have shown sufficient measurement accuracy. The specified characteristics of the degree of crushing of rocks are the parameters of the function, which determines the required accuracy of mathematical modeling of mining processes. A visual comparison of the graphs of the empirical and theoretical distributions of the sizes of fractions in each case of measurement showed the technological acceptability of the device.

Practical significance. Prompt receipt of objective information about the state of the rock mass before the explosion and after it will make it possible to implement the optimal control of the complex of drilling and blasting operations (blast-blasting) in open pits according to the criterion of the quality of the rock mass.

Keywords. Transmitting TV tube, transistor, natural rock separation, rock mass lumpiness.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Слесаревим В.В.

ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ НУЛІВ ФУНКЦІЙ КОМПЛЕКСНОЇ ЗМІННОЇ

А.В. Кожевніков¹, С.М. Ткаченко²¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
kozhevnykov.a.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-0078-2546² Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
tkachenko.s.m@nmu.one ORCID 0000-0003-1156-3151

NUMERICAL METHOD DETERMINATION OF ZEROS FOR FUNCTIONS OF A COMPLEX VARIABLE

A. Kozhevnykov¹, S. Tkachenko²¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
kozhevnykov.a.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-0078-2546² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
tkachenko.s.m@nmu.one ORCID 0000-0003-1156-3151

Анотація. Метою роботи є розробка чисельного методу, який дозволяє для довільних функцій комплексної змінної знаходити множини їх нулів у визначених областях пошуку незалежно від характеру та форми останніх. При дослідженнях використовувалися методи теорії функцій комплексної змінної та чисельні методи Монте-Карло. У результаті роботи запропонований ітераційний чисельний алгоритм, який досягає поставленої мети і є розвитком відомого стохастичного методу “сліпого пошуку”. Розглянуті можливості використання алгоритму для областей пошуку різноманітних форм. Отримані аналітичні співвідношення для розрахунку похибок визначення нулів з використанням вказаного алгоритму та визначення кількості ітерацій, які необхідні для локалізації з наданою ймовірністю наближення нуля в заданій околиці його істинного значення. Розроблена програмна реалізація запропонованого алгоритму. При її тестуванні використані функції комплексної змінної різних класів, які мали аналітичні розв’язання відносно значень нулів: поліноміальна, тригонометрична та дробово-раціональна. Остання представляє собою передавальну функцію системи автоматичного регулювання з ПД-контроллером та інерційно-форсуємим ланцюгом. Досліджена залежність середньої кількості ітерацій алгоритму від кількості знайдених коренів. Надані рекомендації щодо застосування алгоритму для великих областей пошуку. Наукова новизна роботи полягає у отриманні аналітичних співвідношень для розрахунку похибок визначення нулів з використанням стохастичного алгоритму їх пошуку та визначення кількості ітерацій такого алгоритму, які необхідні для локалізації з наданою ймовірністю наближення нуля в заданій околиці його істинного значення. Практичним значенням результатів роботи є розробка чисельного алгоритму та створення на його основі програми, яка для довільних функцій комплексної змінної дозволяє знаходити множини їх нулів у визначених областях пошуку незалежно від характеру та форми останніх. Вказаний програмний інструмент може бути використаний для задач аналізу динамічних систем у різних галузях науки і техніки методами, які оперують з функціями комплексної змінної.

Ключові слова: функція комплексної змінної, похибка чисельного методу, псевдовипадкові числа, ітераційні чисельні методи, методи Монте-Карло.

Вступ. Задача визначення нулів функції дійсної змінної $y = f(x)$ (величин аргументів, при яких функція приймає нульове значення, або іншими словами коренів рівняння $f(x) = 0$) є класичною і має низку добре розвинених аналітичних та чисельних методів розв’язання. Переважна більшість чисельних методів розв’язання алгебраїчних рівнянь є ітераційними, хоча відомі і прямі чисельні методи [1, 2]. Втім аналогічна задача для функцій комплексної змінної досліджена тільки для окремих класів функцій, зокрема поліноміальних [3]. З іншого боку, при розв’язанні низки завдань аналізу динамічних систем у різних галузях науки і техніки, зокрема: електротехніці, електроніці, теорії автоматичного управління і теплофізиці, використовуються інтегральні перетворення Фур’є, Лапласа, Z-перетворення, які оперують з функціями комплексної змінної [4]. Зокрема, для систем автоматичного управління розташування нулів та полюсів (нулів знаменника) передавальної функції суттєво впливає на часові параметри перехідних процесів системи, її стійкість та якість регулювання.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Слід зазначити, що задача визначення нулів функції комплексної змінної є спорідненою до задач математичної оптимізації, які мають на меті визначення екстремумів функцій багатьох незалежних змінних за наявності обмежень на їх значення.

До основних груп чисельних ітераційних методів розв'язання таких задач відносяться [5]:

- безградієнтні, які для пошуку розв'язку використовують тільки власно значення досліджуваної функції;
- градієнтні, які також вимагають знання похідної (часткових похідних) функції.

Окремою підгрупою безградієнтних методів є стохастичні методи [6], які в процесі пошуку координат точок початкового наближення, чергової ітерації чи напрямку руху в просторі рішень використовують послідовності псевдовипадкових чисел.

Кожний метод повинен визначати:

- координати точки початкового наближення в просторі рішень;
- координати точки наступної ітерації;
- критерій припинення ітерацій.

При виборі методу розв'язання задачі в кожному випадку повинні враховуватися такі чинники:

- особливості досліджуваної функції (належність до певного класу, якому притаманні певні властивості, наявність особливих точок, “оврагів”, імовірна локалізація нулів та їх передбачувана кількість);
- особливості області пошуку (зв'язність, опуклість);
- аналітична чи чисельна форма задання досліджуваної функції.

Суттєвим фактором впливу є також наявні обчислювальні ресурси, але його розгляд виходить за межі даної теми.

Формулювання мети і завдань досліджень. Метою роботи є розробка чисельного методу, який дозволяє для довільних функцій комплексної змінної знаходити множини їх нулів у визначених областях пошуку незалежно від характеру та форми останніх.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані і розглянуті такі завдання досліджень: запропонований ітераційний чисельний алгоритм, який є розвитком відомого стохастичного методу “сліпого пошуку”, надані рекомендації щодо використання алгоритму для областей пошуку різноманітних форм, отримані аналітичні співвідношення для розрахунку похибок визначення нулів з використанням вказаного алгоритму та визначення кількості його ітерацій, які необхідні для локалізації з наданою ймовірністю наближення нуля в заданій околиці його істинного значення, розроблена програмна реалізація запропонованого алгоритму, з використанням якої досліджені особливості пошуку нулів функцій комплексної змінної різних класів: поліноміальної, тригонометричної та дробово-раціональної передавальної функції системи автоматичного регулювання з ПД-контроллером та інерційно-форсуючим ланцюгом, проведено порівняння результатів роботи алгоритму зі значеннями нулів зазначених функцій, що були отримані аналітичними методами.

Методика досліджень. При дослідженнях використовувалися методи теорії функцій комплексної змінної та чисельні методи Монте-Карло.

Викладення основного матеріалу досліджень. Оскільки основною вимогою для методу, що розроблявся, вважалася його універсальність, то як прототип був вибраний метод “сліпого пошуку” [5]. Цей метод відноситься до стохастичних, є найменш чутливим до вищезазначених особливостей функцій і областей пошуку нулів та передбачає рівноймовірне розподілення точок наближень рішення в області пошуку і вибір найкращого з них.

На рис. 1 наведена схема запропонованого алгоритму визначення нулів функції комплексної змінної. На схемі прийняті такі позначення змінних: K , KM – поточна та максимальна кількість знайдених коренів рівняння $f(z)=0$ (нулів функції $f(z)$), N , NM – поточна та максимальна кількість ітерацій (кількість згенерованих точок у просторі рішень), z_t , z_t0 – поточне та найкраще знайдене наближення поточного кореня рівняння, $f_t = f(z_t)$, $f_t0 = f(z_t0)$ – значення функції $f(z)$ для поточного та найкращого знайденого наближення поточного кореня рівняння, z_k – остаточне знайдене наближення k -ого кореня рівняння, $f_k = f(z_k)$ – значення функції $f(z)$ для остаточного знайденого наближення k -ого кореня рівняння, Δ – найбільше припустиме абсолютне значення функції $f(z)$ для остаточного знайденого наближення кожного кореня рівняння, r , $r0$ – мінімальна відстань між відповідно поточним та найкращим знайденим наближенням поточного кореня рівняння та раніше знайденими наближеннями коренів, R – мінімальна відстань, на якій може бути розташоване початкове наближення нового шуканого кореня від раніше знайдених наближень коренів. Для запобігання повторного знаходження одного і того ж кореня, величину R доцільно вибирати принаймні на порядок більшою, ніж максимально припустима відстань δ між остаточним знайденим наближенням кореня та його істинним значенням.

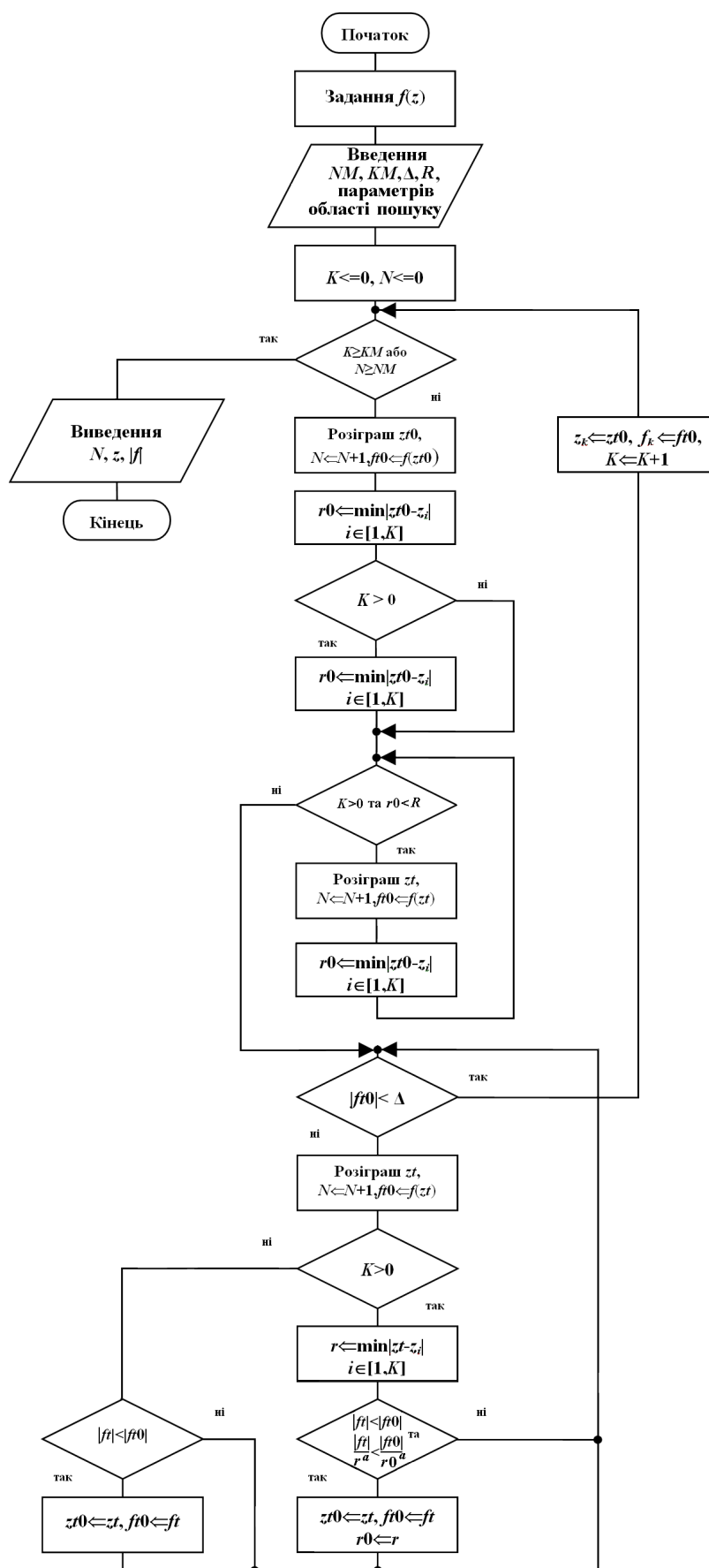


Рисунок 1 – Графічна схема алгоритму визначення нулів функції комплексної змінної

Якщо пошук коренів здійснюється у прямокутній області з межами: $\text{Re}(z)_{\min}$, $\text{Re}(z)_{\max}$, $\text{Im}(z)_{\min}$, $\text{Im}(z)_{\max}$, для розіграшу координат точок початкового наближення та наступної ітерації може бути використана відома формула [6]

$$z_t = (\text{Re}(z)_{\max} - \text{Re}(z)_{\min}) \cdot \xi_1 + j \cdot (\text{Im}(z)_{\max} - \text{Im}(z)_{\min}) \cdot \xi_2, \quad (1)$$

де ξ_1 , ξ_2 – незалежні псевдовипадкові числа, які рівномірно розташовані на сегменті $[0,1]$. У разі коли пошук здійснюється у круговій області радіусом ρ з центром в точці z_0 , використовується співвідношення

$$z_t = z_0 + \sqrt{\xi_1} \cdot \rho \cdot [\cos(2 \cdot \pi \cdot \xi_2) + j \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \xi_2)] \quad (2)$$

Коли ж виникає необхідність пошуку на області більш складної форми, то може бути використаний метод відбору [6]. При його застосуванні розіграш координат точок відбувається в прямокутній чи круговій області, в яку вписано область пошуку. Дали здійснюється перевірка належності отриманої точки до області пошуку. У разі належності точка приймається, у супротивному випадку – відкидається і робиться наступна спроба розіграшу.

Алгоритм містить два вкладених цикли. Зовнішній цикл відбувається за кількістю знайдених коренів та здійснених ітерацій. Умовами його завершення є $K \geq KM$ або $N \geq NM$, тобто кількість здійснених ітерацій або знайдених коренів рівняння досягає визначених максимальних значень. Внутрішній цикл відбувається в межах пошуку окремого кореня. Умовою його завершення є $|ft| < \Delta$, тобто абсолютне значення функції $f(z)$ для найкращого знайденого наближення поточного кореня рівняння стає менше визначеного найбільш припустимого. Критерієм вибору кращого наближення на кожному кроці ітерацій за відсутності раніше знайдених коренів є $|ft| < |ft_0|$, тобто абсолютне значення функції $f(z)$ для поточного наближення є меншим, ніж відповідна величина для найкращого знайденого наближення поточного кореня рівняння. При наявності раніше знайдених коренів, критерій доповнюється умовою $\frac{|ft|}{r^a} < \frac{|ft_0|}{r_0^a}$, в якій штрафний множник $\frac{1}{r^a}$ запобігає потраплянню найкращого знайденого наближення поточного кореня рівняння в околиці вже знайдених коренів і, як наслідок, повторного знаходження одного і того ж кореня. Тут $a > 0$ – коефіцієнт, який визначає ступень жорсткості штрафного обмеження. Чим він більший тим більш суворим є обмеження щодо потрапляння наступної ітерації в околиці вже знайдених коренів. Його збільшення призводить до зменшення ймовірності повторного знаходження кореня, але збільшує загальну кількість ітерацій, необхідних для визначення нового кореня. У всіх результатах, які подалі висвітлені у статті, приймалося, що $a = 1$ за виключенням останнього прикладу, де використовувалося значення $a = 2$.

Запропонований алгоритм програмно реалізований у середовищі математичних розрахунків MathCAD 14. Перший приклад тестування алгоритму виконувався для поліноміальної функції $f_1(z) = z^7 + 0,5 \cdot z^6 - z^5 - z^4 + 0,5 \cdot z^3 + z^2 + z + 1$. Рівняння $f_1(z) = 0$ має сім коренів: -1 , $1,10 \pm 0,478j$, $-0,831 \pm 0,674j$, $-0,022 \pm 0,777j$. Пошук коренів здійснювався у прямокутній області з межами: $\text{Re}(z)_{\min} = -1,5$, $\text{Re}(z)_{\max} = 1,5$, $\text{Im}(z)_{\min} = -1$, $\text{Im}(z)_{\max} = 1$ для величини абсолютної похибки $\Delta = 0,1$. На рис. 2 наведена залежність середньої кількості ітерацій алгоритму від кількості знайдених коренів.

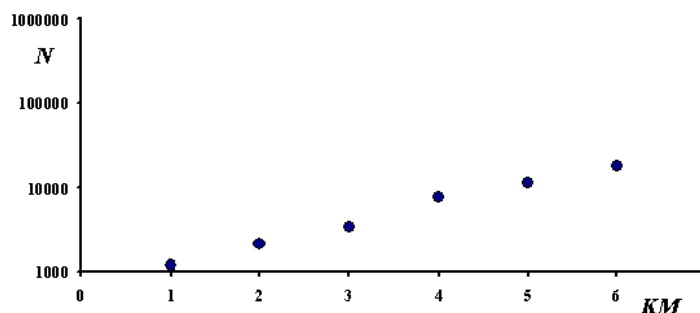


Рисунок 2 – Залежність середньої кількості ітерацій алгоритму від кількості знайдених коренів

Слід зазначити, що кількість ітерацій, необхідних для отримання заданої кількості коренів для запропонованого алгоритму є випадковою величиною і визначається послідовністю псевдовипадкових чисел у кожній реалізації алгоритму (кожному іспиті). Тому на рис.2 розглянута залежність середньої кількості ітерацій за десятьма іспитами для кожної кількості знайдених коренів. Її прискорене зростання навіть у логарифмічному масштабі пояснюється тим, що збільшення кількості знайдених коренів, потребує додаткових операцій з перевірки потрапляння наступної ітерації в їх околиці.

Далі розглядається задача знаходження необхідної кількості ітерацій алгоритму N , коли умовою завершення ітерацій при пошуку кореня рівняння $f(z) = 0$ (нулів функції $f(z)$) є не досягнення функцією напередвизначеного мінімального значення $|f(z_0)| < \Delta$, а потрапляння наближення кореню z_0 у δ -околицю його істинного значення z : $|z_0 - z| < \delta$. Зв'язок між величинами Δ та δ може бути отриманий з розкладення функції $f(z)$ в ряд Тейлора в околиці точки z_0

$$f(z_0) = f(z) + f'(z) \cdot (z_0 - z) + O(\Delta z_i^2), \quad (3)$$

звідки випливає, що

$$\Delta \approx |f'(z)| \cdot \delta. \quad (4)$$

Для розробленого алгоритму, при пошуку нулів для функцій з широкою варіацією значень в області пошуку і таких, що задані аналітично, або значення похідної яких можуть обчислені чисельно, умовою завершення внутрішнього циклу замість $|f(z_0)| < \Delta$ доцільно вибирати умову

$$\frac{|f(z_0)|}{|f'(z_0)|} < \delta. \quad (5)$$

Визначимо кількість ітерацій N , яку необхідно здійснити за запропонованим алгоритмом для того, щоб із заданою ймовірністю p отримати наближення першого кореню рівняння $f(z) = 0$, яке потрапляє у δ -околицю його істинного значення. При цьому використаний підхід, який викладено в монографії [5]. Ймовірність потрапляння наближення першого кореня у δ -околицю його істинного значення на комплексній площині

$$p_0 = \frac{\pi \cdot \delta^2 \cdot KM}{S}, \quad (6)$$

де S – площа області пошуку, KM – кількість коренів в області пошуку. У разі пошуку в прямокутній області, яка орієнтована вздовж координатних осей, $S = a \cdot b$, де a та b – розміри області вздовж дійсної та уявної осей.

Ймовірність потрапляння хоча б одного з N наближень першого кореню у δ -околицю його істинного значення на комплексній площині становить

$$p = 1 - (1 - p_0)^N = 1 - \left(1 - \frac{\pi \cdot \delta^2 \cdot KM}{S}\right)^N. \quad (7)$$

Звідки остаточно маємо

$$N = \frac{\ln(1 - p)}{\ln\left(1 - \frac{\pi \cdot \delta^2 \cdot KM}{S}\right)} \approx -\frac{S}{\pi \cdot \delta^2 \cdot KM} \ln(1 - p). \quad (8)$$

З метою перевірки узгодженості роботи запропонованого алгоритму та співвідношень (7), (8) для рівняння $f_1(z) = 0$, пошук кореня здійснювався у прямокутній області з межами: $\text{Re}(z)_{\min} = -1,5$, $\text{Re}(z)_{\max} = 0,5$, $\text{Im}(z)_{\min} = -0,5$, $\text{Im}(z)_{\max} = 0,5$. для величини абсолютної похибки

$\delta = 0,01$. На рис. 3 зображена залежність середньої кількості ітерацій алгоритму (за ста іспитами) від імовірності p (за формулою (8)) та відносної частоти ω (за алгоритмом) потрапляння наближення кореня у δ -околицю його істинного значення. З рисунка випливає добра узгодженість результатів аналітичного та чисельного розрахунків.

У другому прикладі пошук нулів здійснювався для тригонометричної функції $f_2(z) = \sin(z) - a = \sin(\operatorname{Re}(z)) \cdot \cosh(\operatorname{Im}(z)) + j \cdot \cos(\operatorname{Re}(z)) \cdot \sinh(\operatorname{Im}(z)) - \operatorname{Re}(a) - j \cdot \operatorname{Im}(a)$. Корені рівняння $f_2(z) = 0$ визначалися із системи рівнянь відносно двох дійсних змінних $\operatorname{Re}(z)$ та $\operatorname{Im}(z)$

$$\begin{cases} \sin(\operatorname{Re}(z)) \cdot \cosh(\operatorname{Im}(z)) = \operatorname{Re}(a); \\ \cos(\operatorname{Re}(z)) \cdot \sinh(\operatorname{Im}(z)) = \operatorname{Im}(a). \end{cases} \quad (9)$$

Для дійсних значень $a > 1$ система має розв'язок у вигляді періодичної пари комплексно спряжених коренів: $z_{1k} = \frac{\pi}{2} \pm 2 \cdot \pi \cdot k - j \cdot \operatorname{arccosh}(a)$, $z_{2k} = \frac{\pi}{2} \pm 2 \cdot \pi \cdot k + j \cdot \operatorname{arccosh}(a)$, $k \in N$. У прикладі для $a = 2$ пошук коренів здійснювався у прямокутній області: $\operatorname{Re}(z)_{\min} = -2$, $\operatorname{Re}(z)_{\max} = 2$, $\operatorname{Im}(z)_{\min} = -2$, $\operatorname{Im}(z)_{\max} = 2$. Карта ізоліній функції $|f_2(z)|$ для цієї області наведена на рис. 4, з якої випливає наявність двох нулів: $1,57 \pm 1,32j$.

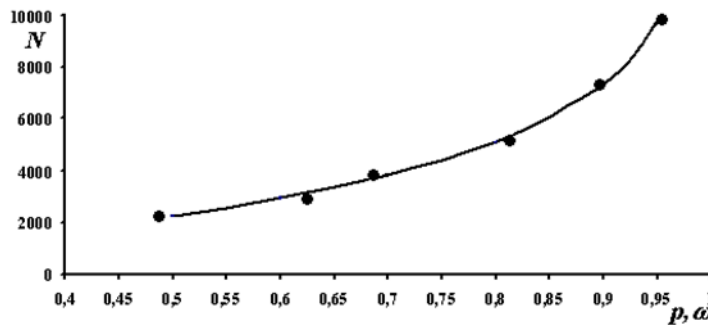


Рисунок 3 – Залежність середньої кількості ітерацій алгоритму від імовірності (відносної частоти) потрапляння наближення кореня у δ -околицю його істинного значення, де суцільна лінія розрахунок за формулою (8), крапки – за алгоритмом

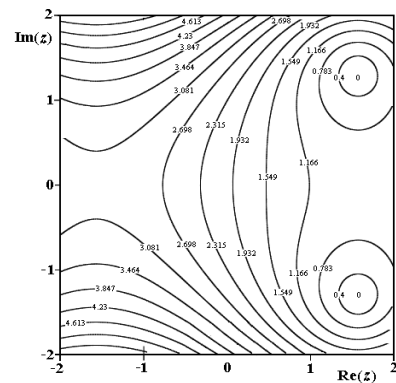


Рисунок 4 – Карта ізоліній тригонометричної функції

кількість ітерацій для знаходження вказаних нулів для величини абсолютної похибки $\Delta = 0,1$ в середньому склала 2900.

Ще одним прикладом тестування алгоритму був пошук полюсів передавальної функції системи автоматичного регулювання нестійкого об'єкта третього порядку з ПД-контролером та інерційно-форсуючим ланцюгом [7]. Структурна схема системи представлена на рис. 5.

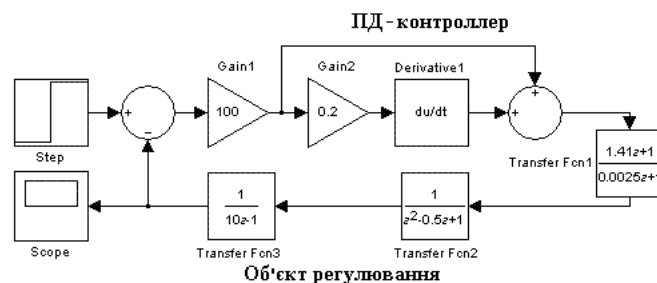


Рисунок 5 – Структурна схема системи автоматичного регулювання з ПД-контролером та інерційно-форсуючим колом

Зі схеми видно, що її передавальна функція в замкненому стані має вигляд

$$f_3(z) = \frac{\frac{100 \cdot (0,2 \cdot z + 1) \cdot \frac{1,41 \cdot z + 1}{0,0025 \cdot z + 1}}{(z^2 - 0,5 \cdot z + 1) \cdot (10 \cdot z - 1)}}{1 + \frac{100 \cdot (0,2 \cdot z + 1) \cdot \frac{1,41 \cdot z + 1}{0,0025 \cdot z + 1}}{(z^2 - 0,5 \cdot z + 1) \cdot (10 \cdot z - 1)}}. \quad (10)$$

Функція $f_3(z)$ є дробово-раціональною та має три нулі: $-292,2$, $-5,097$, $-0,708$. Для їх пошуку за допомогою запропонованого алгоритму, з урахуванням властивостей поліноміальних функцій, може бути використана як власно функція $f_3(z)$, так і функція $P(z) = z^3 + 298 \cdot z^2 + 1700 \cdot z + 1055$, яка є її числеником $f_3(z) = \frac{P(z)}{Q(z)}$. Враховуючи велику відстань між нулями та, відповідно велику область їх пошуку і значну варіацію значень функції в цій області, доцільно використовувати такий підхід. З початку, на широкій області пошуку, наприклад $\text{Re}(z)_{\min} = -500$, $\text{Re}(z)_{\max} = 0$, $\text{Im}(z)_{\min} = -5$, $\text{Im}(z)_{\max} = 5$, для великої похибки $\Delta = 10000$ визначаються підобласті компактного розташування нулів або їх кластерів. Для наведеного прикладу таких підобластей, в яких містяться всі отримані оцінювальні значення коренів, виявляється дві: $\text{Re}(z)_{\min} = -292$, $\text{Re}(z)_{\max} = -292,5$, $\text{Im}(z)_{\min} = -0,1$, $\text{Im}(z)_{\max} = 0,1$, та $\text{Re}(z)_{\min} = -10$, $\text{Re}(z)_{\max} = 0$, $\text{Im}(z)_{\min} = -3$, $\text{Im}(z)_{\max} = 3$. На другому етапі, окремо в кожній з цих підобластей, при малих значеннях похибок, вже визначаються власно приблизні значення нулів. При $\Delta = 10$ для першої підобласті кількість ітерацій в середньому дорівнювала $1,6 \cdot 10^6$, а для другої – $4,0 \cdot 10^5$. При цьому величина похибки була не більш ніж $\delta = 0,01$. Аналогічно можуть бути знайдені і полюси функції $f_3(z)$, як нулі функції $Q(z)$.

Висновки. Таким чином, в роботі:

1. Запропонований ітераційний чисельний алгоритм, який дозволяє для довільних функцій комплексної змінної знаходити множини їх нулів у визначених областях пошуку незалежно від характеру та форми останніх, і є розвитком відомого стохастичного методу “сліпого пошуку”. Отримані аналітичні вирази для розрахунку похибок при визначенні нулів з використанням вказаного алгоритму та визначення кількості його ітерацій, які необхідні для локалізації з наданою ймовірністю наближення нуля в заданій околиці його істинного значення.

2. Розроблена програмна реалізація запропонованого алгоритму, за допомогою якої досліджені особливості пошуку нулів функцій комплексної змінної різних класів: поліноміальної, тригонометричної та дробово-раціональної передавальної функції системи автоматичного регулювання з ПД-контроллером та інерційно-форсуючим ланцюгом.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні аналітичних співвідношень для розрахунку похибок визначення нулів з використанням стохастичного алгоритму їх пошуку, а також кількості ітерацій такого алгоритму, які необхідні для локалізації з наданою ймовірністю наближення нуля в заданій околиці його істинного значення.

Практичним значенням результатів роботи є розробка чисельного алгоритму та створення його програмної реалізації, яка для довільних функцій комплексної змінної дозволяє знаходити множини їх нулів у визначених областях пошуку незалежно від характеру та форми останніх. Даний програмний інструмент може бути використаний при розв’язанні низки задач аналізу динамічних систем у різних галузях науки і техніки методами, які оперують з функціями комплексної змінної.

Список літератури

1. Коряшкіна Л. С. Чисельні методи [Текст] / Л. С. Коряшкіна, М.М. Одновол // Дніпропетровськ: НГУ, 2007, 220 с.
2. Сегеда М. С. Математичне моделювання в електроенергетиці [Текст] / М. С. Сегеда // Львів: “Львівська політехніка”, 2002, 300 с.
3. Осипов В.М. Определение нулей и полюсов передаточных функций минимально-фазового типа методом моментных последовательностей [Текст] / В.М. Осипов // Известия ТПИ – Томск: ТПИ, 1975. – т. 192 – С. 184 –192.
4. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и z-преобразования [Текст] / Г. Дёч // М.: “Наука”, 1973, 288 с.
5. Бояринов А. И. Методы оптимизации в химической технологии [Текст] / А. И. Бояринов, В.В Кафаров // М.: “Химия”, 1975, 576 с.

6. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев // М.: "Наука", 1973, 312 с.
7. Федосов Б. Т. О стабилизации линейных неустойчивых объектов охватом их обратной связью: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: https://klinachevny.ru/fedosov/bt_1315_Stab_NeUst.htm.

АННОТАЦИЯ

Целью работы является разработка численного метода, который позволяет для произвольных функций комплексной переменной находить множества их нулей в заданных областях поиска независимо от характера и формы последних. При исследованиях использовались методы теории функций комплексного переменного и численные методы Монте-Карло. В результате работы предложен итерационный численный алгоритм, который достигает поставленной цели и является развитием известного стохастического метода "слепого поиска". Рассмотрены возможности использования алгоритма для областей поиска различных форм. Полученные аналитические соотношения для расчета погрешностей определения нулей с использованием указанного алгоритма и определения количества итераций, необходимых для локализации с определённой вероятностью приближения нуля в заданной окрестности его истинного значения. Разработана программная реализация предложенного алгоритма. При её тестировании использованы функции комплексной переменной различных классов, имеющие аналитическое разрешение относительно значений нулей: полиномиальная, тригонометрическая и дробно-рациональная. Последняя представляла собой передаточную функцию системы автоматического регулирования с ПД-контроллером и инерционно-форсирующим звеном. Исследована зависимость среднего количества итераций алгоритма от количества найденных корней. Даны рекомендации по применению алгоритма для больших областей поиска. Научная новизна работы заключается в получении аналитических соотношений для расчета погрешностей определения нулей с использованием стохастического алгоритма их поиска и определения количества итераций такого алгоритма, которые необходимы для локализации с определённой вероятностью приближения нуля в заданной окрестности его истинного значения. Практическим значением результатов работы является разработка численного алгоритма и создание его программной реализации, которая для произвольных функций комплексной переменной позволяет находить множества их нулей в определенных областях поиска независимо от характера и формы последних. Указанный программный инструмент может быть использован при решении ряда задач анализа динамических систем в различных отраслях науки и техники методами, которые оперируют с функциями комплексной переменной.

Ключевые слова: функция комплексной переменной, погрешность численного метода, псевдослучайные числа, итерационные численные методы, методы Монте-Карло.

ABSTRACT

The purpose of the work is to develop a numerical method that allows for arbitrary functions of a complex variable to find the sets of their zeros in given search areas, regardless of the character and shape of the latter. The research used the methods of the theory of functions of a complex variable and numerical Monte Carlo methods. As a result of the work, an iterative numerical algorithm is proposed that achieves the set goal and is a development of the well-known stochastic "blind search" method. The possibilities of using the algorithm for search areas of various forms has been considered. The obtained analytical relations for calculating the errors in determining the zeros using the specified algorithm and determining the number of iterations necessary for localization with a certain probability of approaching zero in a given neighborhood of its true value. A software implementation of the proposed algorithm has been developed. When testing it, has been used functions of a complex variable of various classes that have an analytical resolution with respect to the values of zeros: polynomial, trigonometric and fractional rational. The latter was the transfer function of an automatic control system with a PD-controller and an inertial-boosting link. The dependence of the average number of iterations of the algorithm on the number of found roots has been investigated. Recommendations on the application of the algorithm for large search areas are given. The scientific novelty of the work lies in obtaining analytical relationships for calculating the errors in determining zeros using a stochastic algorithm for finding them and determining the number of iterations of such an algorithm that are necessary for localization with a certain probability of approaching zero in a given neighborhood of its true value. The practical significance of the results of the work is the development of a numerical algorithm and the creation of its software implementation, which for arbitrary functions of a complex variable allows you to find sets of their zeros in certain search areas, regardless of the character and form of the latter. The specified software tool can be used to solve a number of problems in the analysis of dynamic systems in various branches of science and technology by methods that operate with functions of a complex variable.

Keywords: function of a complex variable, numerical method error, pseudo-random numbers, iterative numerical methods, Monte Carlo methods.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Ткачевим В.В.

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.336

СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНТАКТНИХ ВСТАВОК СТРУМОПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

А.М. Муха¹, Д.В. Устименко², Р.В. Краснов³, О.Ю. Балійчук⁴, О.Я. Куриленко⁵

¹ Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна
andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

² Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна
ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

³ Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна
krasnov_rv@i.ua, ORCID 0000-0003-0284-754X

⁴ Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна
lejikbaliychuk@gmail.com, ORCID 0000-0003-0119-1446

⁵ Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна
elena.kyrilenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

STATISTICAL MODEL FOR PREDICTING THE WEAR RESISTANCE OF CONTACT INSERTS OF CURRENT RECEIVERS OF RAILWAY STORAGE

A. Mukha¹, D. Ustymenko², R. Krasnov³, O. Baliichuk⁴, O. Kurylenko⁵

¹ Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine
andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

² Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine
ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

³ Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine
krasnov_rv@i.ua, ORCID 0000-0003-0284-754X

⁴ Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine
lejikbaliychuk@gmail.com, ORCID 0000-0003-0119-1446

⁵ Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine
elena.kyrilenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

Мета. Створення статистичної моделі для прогнозування зносостійкості вставок струмоприймачів електрорухомого складу залізниць.

Методика дослідження полягає в обробці ймовірісно-статистичними методами результатів експериментальних даних по визначенню висоти контактних вставок струмоприймача в умовах стендових випробувань.

Результати дослідження. Виконана статистична обробка експериментальних даних та отримані аналітичні вирази, які описують залежність величини зносу контактних вставок від кількості проходів (обертів контактного кільця випробувальної установки).

Наукова новизна. Отримані аналітичні вирази для визначення висоти контактних вставок струмоприймачів з матеріалу «Романіт-УВЛШ» дозволяють прогнозувати величину зносу вставки в заданому діапазоні для будь-якого значення кількості проходів струмоприймача випробувальної установки.

Практичне значення. Результати досліджень можуть використовуватись для прогнозування пробігу контактних вставок струмоприймача, що виготовлені з матеріалу «Романіт-УВЛШ».

Ключові слова: вставка струмоприймача, контактний провід, висота вставки, апроксимація, Романіт-УВЛШ.

Вступ.

Електрорухомий склад залізниць є відносно потужним споживачем електричної енергії, яка надходить до бортових систем через сильнострумовий ковзний контакт. Цей контакт складається з двох частин: контактного проводу та контактних вставок струмоприймача. У цій парі більшу вартість має контактний провід, тому його потрібно максимально захищати від зносу. Контактна вставка струмоприймача – це витратний матеріал, який має відносно малу вартість та легкодоступний при зміні. Висока зносостійкість контактних вставок, як правило, призводить до більш інтенсивного зносу контактного проводу, а відповідно до зростання вартості утримання контактної мережі. Однією з актуальних задач по підвищенню ефективності експлуатації контактної мережі є задача встановлення балансу між зносостійкістю контактних вставок та контактного проводу.

Визначення рівня зносостійкості контактних вставок здійснюється, як правило, в два етапи: прогнозування на стадії експериментальних досліджень (стендові випробування) та уточнення отриманих результатів під час експлуатаційних випробувань. У даній статті розглянуто перший етап – стендові випробування, а саме, імітування роботи контактної пари на спеціалізованому стенді [1]. Опис подібних випробувань наведено в роботах [2 – 4]. На базі отриманих результатів ресурсних стендових випробувань аналізується тенденція зміни висоти контактного проводу та контактних вставок. Головною умовою успішності проведення випробувань є дотримання нормативного значення зносу контактного проводу на рівні 40 мкм на 10 тис. проходів [5]. Динаміка зміни висоти контактних вставок фіксується, аналізується засобами апарата математичної статистики з подальшим створенням моделі, що дозволить прогнозувати зносостійкість контактних вставок струмоприймача електрорухомого складу. Створення такої моделі дозволить на базовому рівні встановити ресурс роботи контактних вставок. Як дослідні використовувалися вставки з матеріалу «Романіт-УВЛШ».

Аналіз існуючих досягнень та публікацій.

Вирішення проблеми з ефективною експлуатацією контактної мережі та електрорухомого складу ставить вимоги до подальшого зменшення зносу контактного проводу і випадків його руйнування, підвищення ресурсу роботи полозів струмоприймачів, зменшенню втрат електроенергії при струмозніманні.

Контактний провід є одним з основних елементів контактної мережі, від стану якого залежить безаварійна робота електрифікованих залізниць. Його безпосередня взаємодія з елементами полозів струмоприймачів призводить до зносу, ерозійних пошкоджень, дії високих температур та механічних навантажень. На контактний провід діють напруги розтягнення, він нагрівається транзитними струмами і струмами в процесі струмознімання. Все це призводить до достатньо великої кількості його пошкоджень [6 – 8]. В парі з контактним проводом працюють різного роду струмознімальні елементи, технологія виготовлення та матеріал яких безпосередньо впливають на величину зносу елементів ковзного силового контакту.

До важливих експлуатаційних характеристик контактних пар пристроїв струмознімання, що визначають їх надійність і економічність, відносять коефіцієнт тертя та інтенсивність зносу (зносостійкість). Величина зносу як контактного проводу, так і контактних вставок струмоприймача вище критичних значень є неприпустимим [2, 9].

Питанню прогнозування величини зносу контактного проводу та контактних вставок струмоприймача присвячує достатньо багато уваги, що тільки доводить актуальність проблеми. Створенням прогнозних моделей, вивченням еволюції ковзного силового контакту займаються вчені провідних університетів світу [10 – 13].

Мета досліджень.

Метою досліджень є створення статистичної моделі для прогнозування зносостійкості вставок струмоприймачів електрорухомого складу залізниць.

Основна частина.

Вихідними даними для проведення досліджень є реальні результати стендових ресурсних випробувань контактних вставок струмоприймачів електрорухомого складу з матеріалу «Романіт-УВЛШ».

Загальний вигляд стенду для проведення випробувань наведений на рис. 1.



Рисунок 1 – Стенд для випробування контактного проводу та вставок струмоприймачів електрорухомого складу

Заміри висот контактного проводу (у чотирьох контрольних точках) та вставки виконувалися на початку випробувань та періодично під час випробувань.

Загальний стан поверхонь контактної проводу та вставок перед початком випробувань представлено на рис. 2 та 3., а після 50 тис. проходів – на рис. 4 та 5.



Рисунок 2 – Стан поверхні контактної проводу перед початком випробувань



Рисунок 3 – Стан поверхні контактних вставок перед початком випробувань



Рисунок 4 – Стан поверхні контактної проводу після 50 тис. проходів



Рисунок 5 – Стан поверхні контактних вставок після 50 тис. проходів

Відповідно стан поверхонь контактної проводу та контактних вставок після проведення випробувань розглянуто на рис. 6 та 7.

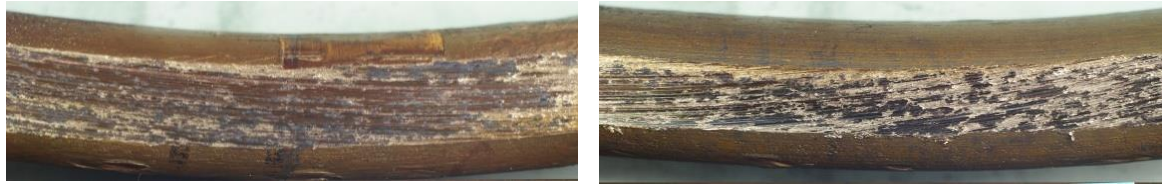


Рисунок 6 – Стан поверхні контактної провідки після проведення випробувань



Рисунок 7 – Стан поверхні вставки після проведення випробувань

Заміри висоти контактних вставок здійснювались у кожній точці три рази. Результати замірів висоти під час проведення випробувань наведені у таблиці.

Як бачимо висота контактних вставок є випадковою величиною. У зв'язку з цим обробка даних щодо висоти контактних вставок має проводитися ймовірісно-статистичними методами.

Результати замірів висоти вставки з матеріалу «Романіт-УВЛШ» під час випробувань

Номер вставки		Товщина накладки, мм			
		А	В	С	Середнє
НОВА	1 (ліва)	9,73	9,82	9,88	9,81
	2 (права)	9,05	8,94	8,95	8,98
50 тисяч проходів	1 (ліва)	9,70	9,74	9,85	9,76
	2 (права)	8,93	8,91	8,92	8,92
500 тисяч проходів	1 (ліва)	9,57	9,30	9,67	9,51
	2 (права)	8,85	8,17	8,42	8,48

Графіки середнього значення висоти лівої та правої вставки розглянуті на рис. 8 та 9. Для отримання аналітичного запису експериментальних даних виконаємо апроксимацію, використовуючи поліном у вигляді $h(x) = H + B_1x + B_2x^2$. Графічно результати апроксимації також наведені на рис. 8 та 9.

Отримані аналітичні вирази для визначення висоти вставок струмоприймачів з матеріалу «Романіт-УВЛШ» дозволяють прогнозувати величини зносу вставки в заданому інтервалі, для будь-якої кількості проходів струмоприймача випробувальної установки.

Для створення прогнозуальної моделі використовуємо апроксимовані залежності (рис. 8 та 9). Представимо усереднені значень зносу накладок в досліджуваному діапазоні з відповідною апроксимацією отриманого діапазону точок на рис.10.

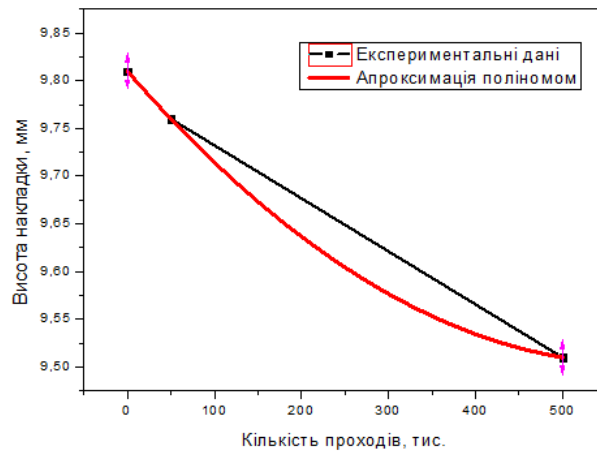


Рисунок 8 – Графіки середньої висоти лівої вставки та її апроксимація поліномом

$$h(x) = 9,81 - 0,00104 \cdot x + 8,89 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$$

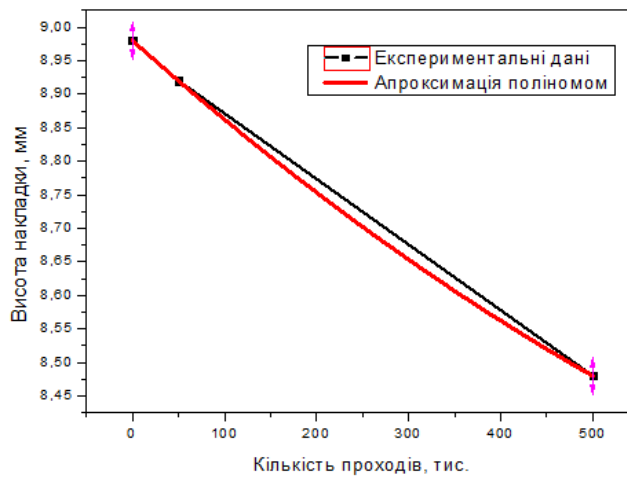


Рисунок 9 – Графіки середньої висоти правої вставки та її апроксимація поліномом

$$h(x) = 8,98 - 0,00122 \cdot x + 4,45 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$$

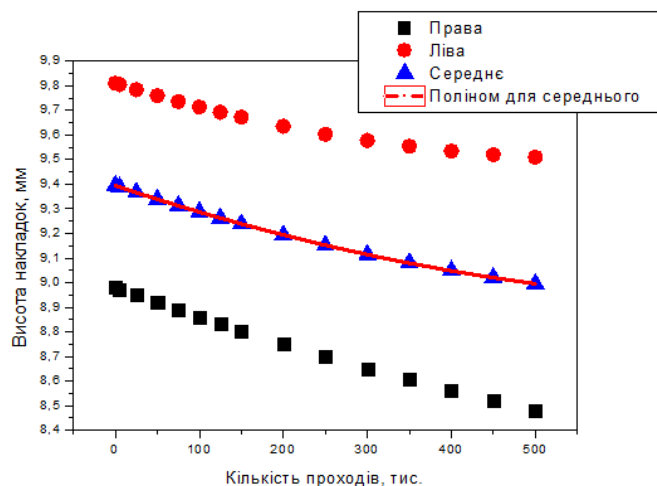


Рисунок 10 – Графіки зносу вставок та їх апроксимація поліномом

$$h(x) = 9,39 - 0,00114 \cdot x + 6,83 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$$

Отриманий аналітичний вираз $h(x) = 9,39 - 0,00114 \cdot x + 6,83 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$ є моделлю, процесу зносу вставки з матеріалу «Романіт-УВЛШ».

Висновки

1. На базі реальних експериментальних даних отримані аналітичні значення зносу вставок струмоприймачів, що виготовлені з матеріалу «Романіт-УВЛШ».
2. Отримана статистична прогноуюча модель для описування процесу зносу вставок базується на усередненому значенні зносу досліджуваних на стенді вставок.
3. Аналітичні вирази, що отримані для визначення висоти вставок струмоприймачів виготовлених з матеріалу «Романіт-УВЛШ», дозволяють прогнозувати величину зносу вставки в заданому діапазоні, для будь-якої кількості проходів струмоприймача випробувальної установки.

Перелік посилань

1. Устименко, Д. В. Установка для экспериментального исследования износа ковзного контакта «контактный провод – накладка» [текст] / Д. В. Устименко // Электромагнитная сумесність та безпека на залізничному транспорті. – 2018. – №14, с.29-32.
2. Сидоров О.А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токоосъема с жестким токопроводом: Монография [Текст] / О.А. Сидоров, С.А. Ступаков.-М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2012. – 174 с.
3. Муха, А. М. Контактні вставки полозів струмоприймачів електрорухомого складу з покращеними показниками [текст] / А.М. Муха, Д.В. Устименко, О.Ю. Балійчук [та ін.] // Залізничний транспорт України. – 2018. №2. – С. 33-39.
4. Ustymenko D. V. Nanostructures in the formation of the properties of high-current sliding electrical contacts on the electric rolling stock [text]: 2019 IEEE 39th International Conference / D. V. Ustymenko, A. M. Mukha, O. Y. Balichuk, O. Ya. Kurylenko, S. Romanov, T. Sebiev // ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO), Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. – P. 233-236. 978-1-7281-2064-5/19/\$31.00 ©2019 IEEE
5. ГОСТ 32680 Токоосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические условия.
6. Сергієнко, М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М. І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. – №4. – С. 24-28.
7. Лашко, А. Д. Енергозбереження на залізничному транспорті України / А. Д. Лашко, М. І. Сергієнко // Залізничний транспорт України. – 2001. – №4. – С. 7-11.
8. Малышко, И. В. Основные направления энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины / И. В. Малышко // Локомотив-информ. – 2007. – №1. – С. 12-14.
9. Antonov, A. Resource evaluation of friction pair «contact wire – contact strip» / A. Antonov, V. Sychenko // Archives of transport. – 2017. – Vol. 44, Issue 4, P. 7-14.
10. Gregoria, S. An approach to geometric optimisation of railway catenaries. Vehicle System Dynamics / S. Gregoria, M. Tura, E. Nadala, F.J. Fuenmayora, 2017. – P. 1-25. doi:10.1080/00423114.2017.1407434
11. Wang, H. Analysis of the evolvement of contact wire wear irregularity in railway catenary based on historical data / H. Wang, A. Núñez, Z. Liu, Y. Song, F. Duan, and R. // Dollevoet Vehicle System Dynamics, Volume 56, Issue 8, 2018, Pages: 1207-1232. DOI: 10.1080/00423114.2017.1408919
12. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system / G. Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao [et al.] // Journal of Modern Transportation. – June 2016. – Vol. 24. – Iss. 2. – P. 132–138. doi: 10.1007/s40534-016-0099-1.
13. Горобец, В.Л. Методология комплексной оценки эксплуатационных качеств накладок токоприемников электроподвижного состава / В.Л. Горобец, Н.А. Бабяк, А.Я. Ярмач, А.М. Бондарев // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2015. – №1(218), С. 297-302.

АННОТАЦИЯ

Цель. Создание статистической модели для прогнозирования износостойкости вставок токоприемников электроподвижного состава железных дорог.

Методика исследований заключается в обработке вероятностно-статистическими методами результатов экспериментальных данных по определению высоты контактных вставок токоприемника в условиях стендовых испытаний.

Результаты исследования. Выполнена статистическая обработка экспериментальных данных, и полученные аналитические выражения, описывающие зависимость величины износа контактных вставок от количества проходивших (обороты контактного кольца испытательной установки).

Научная новизна. Полученные аналитические выражения для определения высоты контактных вставок токоприемников из материала «Романит-УВЛШ» позволяют прогнозировать величину износа вставки в заданном диапазоне, для любого значения количества проходивших токоприемника испытательной установки.

Практическое значение. Результаты исследований могут использоваться для прогнозирования пробега контактных вставок токоприемника, изготовленные из материала «Романит-УВЛШ».

Ключевые слова: вставка токоприемника, контактный провод, высота вставки, аппроксимация, Романит-УВЛШ.

ABSTRACT

Purpose. Creation of a statistical model for predicting the wear resistance of pantograph inserts for electric rolling stock of railways.

The methodology consists in processing the results of experimental data on determining the height of the contact inserts of the pantograph under the conditions of bench tests by probabilistic and statistical methods.

Findings. Statistical processing of the experimental data was carried out, and the obtained analytical expressions describing the dependence of the wear of the contact inserts on the number of passes (revolutions of the slip ring of the test setup).

The originality. The obtained analytical expressions for determining the height of the contact inserts of pantographs made of Romanit-UVLSh material allow predicting the amount of wear of the insert in a given range, for any value of the number of passes of the pantograph of the test setup.

Practical implication. The research results can be used to predict the mileage of the pantograph contact inserts made of Romanit-UVLSh material.

Keywords *pantograph insert, contact wire, insert height, approximation, Romanit-UVLSH.*

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, професором Івановим О.Б.

МОДЕЛЬ ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА У MATLAB

*В.В. Стьопкін¹, О.В. Юдін¹, М.В. Котляр¹, О.О. Паламарчук¹
А.Ю. Жеребцов², В.Б. Сприса³, П.В. Руснак³,
Є.С. Шкаран⁴, І.В. Назаренко⁴*

¹ Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,
vasilstopkin@gmail.com, ORCID 0000-0001-5727-8343

² Головний інженер ТОВ "Акта-сервіс"

³ Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,

⁴ Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,

MODEL OF DIRECT CONTROL OF THE TORQUE OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR IN MATLAB

*V. Stopkin¹, канд. техн. наук, A. Yudin², M. Kotliar³, O. Palamarchuk⁴
A. Zherebtsov², V. Sprisa³, P. Rusnak³, Ye. Shkaran⁴, I. Nazarenko⁴*

¹ National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
vasilstopkin@gmail.com, ORCID 0000-0001-5727-8343

² Chief engineer of Akta-service LLC

³ Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,

⁴ National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,

Анотація.

У статті розглядається актуальність, принцип функціонування та причини виникнення систем прямого керування моментом (DTC) асинхронного двигуна. Авторами виконано дослідження математичної моделі прямого керування моментом асинхронного двигуна у MATLAB, виявлені основні недоліки. Основною задачею, від вирішення якої залежить робота системи прямого керування моментом є ідентифікація потокозчеплення статора. Це вирішується інтегруванням, що призводить до накопичення помилок. Джерелом появи помилок є неточність визначення активного опору статора та його зміни в процесі роботи асинхронного двигуна. У системі DTC присутній недолік, пов'язаний з появою незначних пульсацій моменту та коливань швидкості ротора при малих навантаженнях.

Ключові слова.

Асинхронний електропривод, система прямого керування, інвертор, частота комутації, контролер швидкості, спостерігач

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними дослідженнями

На теперішній час при розгляданні різних варіантів автоматизованих електроприводів одним з найбільш перспективних є частотно-регульований електропривод асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором. Новим напрямом в галузі розробки високоякісних систем керування асинхронними приводами є системи з прямим керуванням моментом (DTC – direct torque control). Такі системи в реалізації є простішими за класичні системи векторного керування, де необхідне пряме та зворотне перетворення координат електропривода, застосування регуляторів складових струму статора, формування при керуванні за напругою сигналів компенсації внутрішніх перехресних зворотних зв'язків об'єкта. Крім того що системи векторного керування асинхронними двигунами забезпечують гарні показники регулювання, їх функціонування у значній мірі залежить від параметрів двигуна та від точності визначення швидкості обертання ротора. Зміна параметрів двигуна викликає проблему переналадження (адаптації) системи керування.

Фірмою АВВ був запатентований метод прямого керування моментом (DTC). Промислова реалізація методу DTC стала можливою в середині 90-х із появою високоточної швидкодіючої мікропроцесорної техніки запропонованої фірмою АВВ (АВВ, 2003). Так у 1995 році фірма АВВ запропонувала перетворювачі частоти ACS600 з новою системою прямого керування моментом (DTC).

Системи DTC є актуальними для електроприводів, де головним є формування моменту а не стабілізація швидкості. На теперішній час пряме керування моментом є сучасним способом керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом з такими перевагами: відсутність необхідності у зворотному зв'язку за швидкістю та положенням двигуна; висока статична та динамічна точність швидкості; оптимальне перемикання транзисторів для кожного циклу керування та відповідність привода вимогам керованого навантаження (Rupert Gouws, 2014; Azhan Ab Rahman, 2010; MathWorks. Help Center, 2018; H.F. Abdul Wahab, et al., 2008). Система DTC може розглядатися як альтернатива скалярному або векторному керуванню. Важливим у системі DTC є ідентифікація параметрів асинхронного двигуна (Pivnyak G.G, et al., 2006).

Теорія DTC заснована на принципах векторного керування. Відмінність її від векторних систем полягає у відсутності контурів регулювання проекцій струму статора, які визначають електромагнітний момент та потік. Принцип керування полягає у визначенні на кожному кроці оптимального стану інвертора напруги, такого, що викликає зміну моменту та потоку статора у необхідну сторону для зведення до нуля помилки між заданими та дійсними значеннями регульованих величин. Необхідність широтно-імпульсного модулятора як окремої ланки відпадає, а використовується гістерезисне керування. Зміна стану інвертора відбувається при перевищенні модуля помилки за моментом або потоком граничного значення. Звісно чим нижча частота комутації транзисторів тим гірше якість керування.

Результати дослідження

Принцип реалізації керування DTC розглядається на прикладі нерухомої системи координат (рис.1). Електромагнітний момент асинхронного двигуна знаходиться через векторний добуток потік-козцеплень статора та ротора.

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{\Pi} \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \psi_s \cdot \psi_r \cdot \sin \gamma, \quad (1)$$

де L_s – індуктивність статора; L_r – індуктивність ротора; γ – кут між векторами потоків статора та ротора.

Модуль потоку статора підтримується на постійному рівні. Модуль потоку ротора змінюється повільніше за модуль потоку статора за рахунок великої постійної часу ротора. Регулювання моменту здійснюється шляхом впливу на кут між цими двома векторами. Можливість такого регулювання витікає з формули:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = U_s - I_s \cdot R_s \approx U_s, \quad (2)$$

де U_s – напруга статора; I_s – струм статора; R_s – активний опір статора.

Формула (2) спрощується при нехтуванні падінням напруги у статорній обмотці двигуна. Це є припустимим, так як розглядається тільки напрям зміни вектора ψ_s який має такий самий напрям як і вектор напруги статора U_s .

Відповідність секторів та векторів напруги нерухомої системи координат наведено на рис.1.

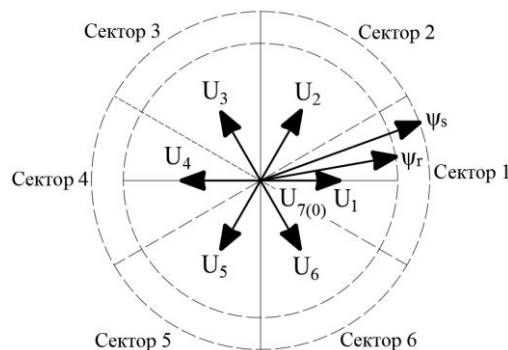


Рисунок 1 – Відповідність секторів та векторів напруг у нерухомій системі координат

Вибір оптимального вектору здійснюється наступним чином. Площина розбивається на шість рівних секторів. Розглядається один з них. Якщо вектор статора знаходиться у секторі 1 і необхідно збільшити момент, то слід застосовувати один із випереджуючих векторів U_2 або U_3 . Ці два вектори збільшують кут γ і, як слідство збільшиться момент. Перший вектор застосовується при збільшенні модулю потоку статора, а другий при його зменшенні. Для зменшення моменту застосовується один з нульових векторів U_0 або U_7 .

Нульовий вектор напруги викликає зупинку вектора потоку статора. При цьому потік ротора продовжує обертатися, наздоганяючи потік статора, що призводить до зменшення моменту. При малих частотах обертання двигуна потік ротора рухається повільно, і в цьому випадку не вдається швидко зменшити момент за допомогою нульового вектора напруги. В таких випадках використовується відстаючий вектора напруги U_5 або U_6 .

Ефективність способу керування DTC в роботі продемонстрована на математичній моделі з використанням програми MATLAB.

Модель електропривода AC4-DTC Induction 200 HP Motor Drive наведена на рис.2.

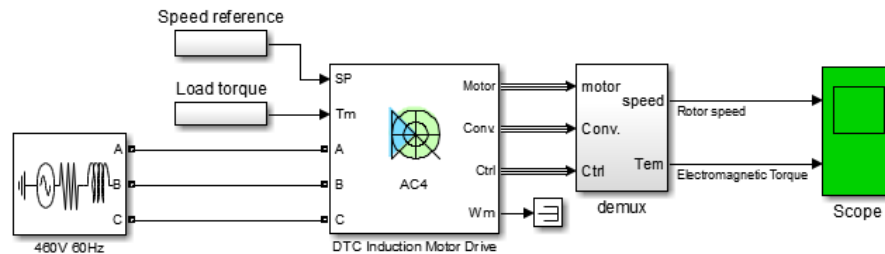


Рисунок 2 – Модель електропривода AC4-DTC Induction 200 HP Motor Drive

Модель на рис. 2 складається з таких модулів: джерело живлення з параметрами 460В, 60Гц; завдання швидкості Speed reference; завдання моменту Load torque; система керування DTC Induction Motor Drive; вилучення компонентів вхідного сигналу demux; осцилограф Scope.

Модель системи керування DTC Induction Motor Drive наведена на рис.3.

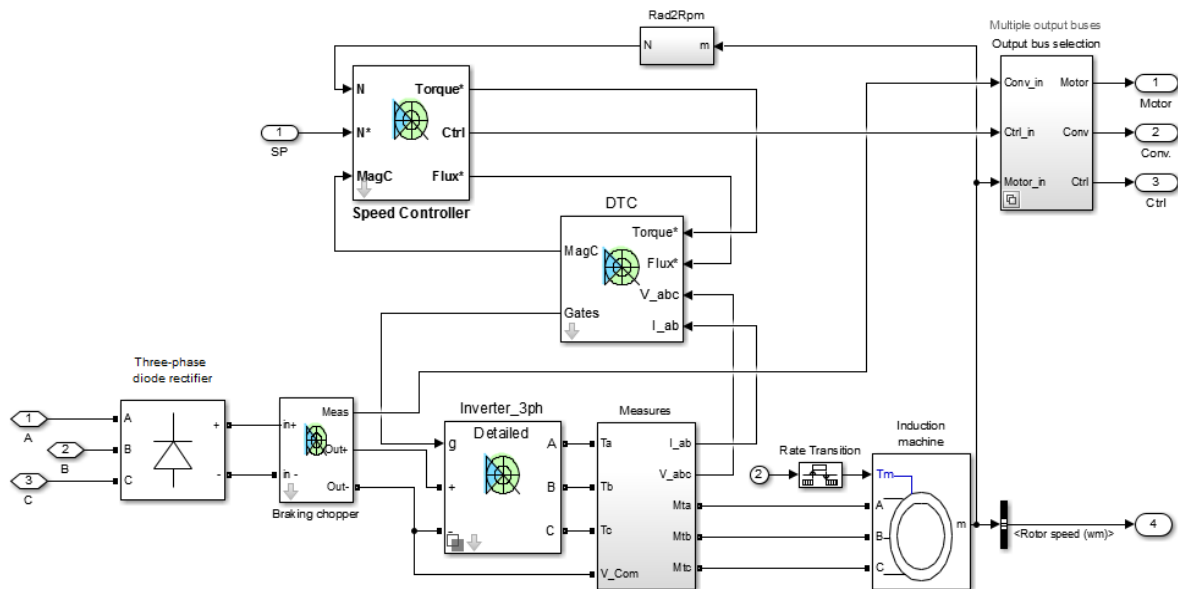
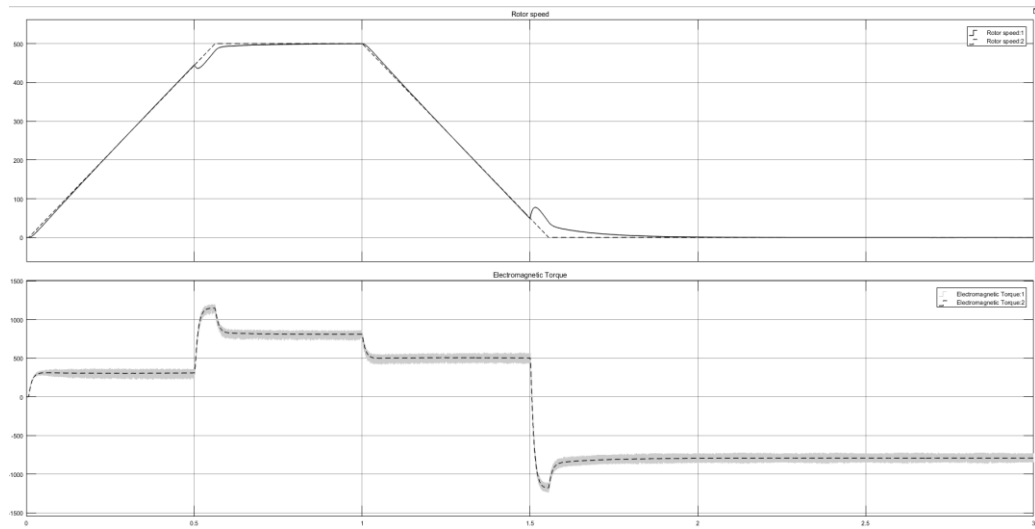


Рисунок 3 – Модель системи керування DTC Induction Motor Drive

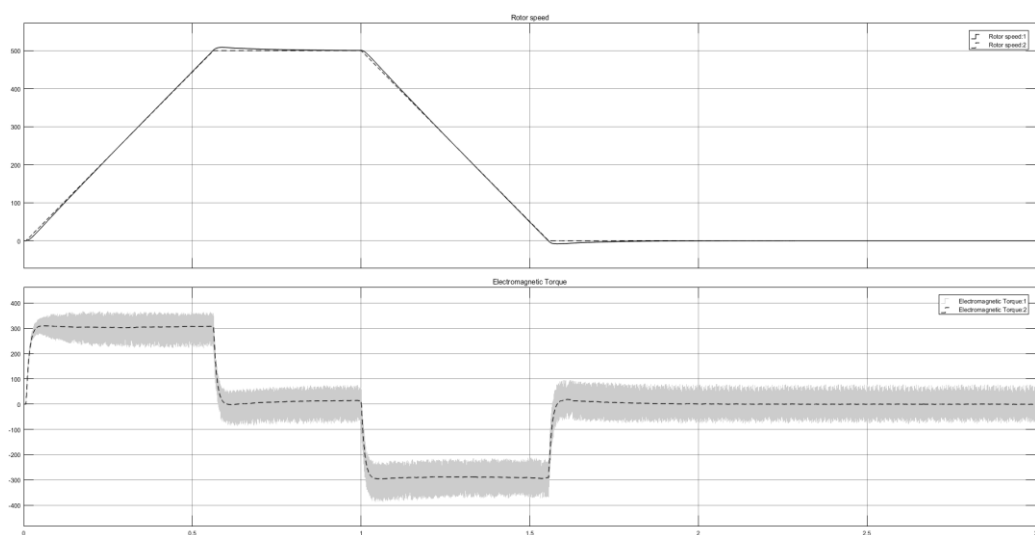
До складу моделі прямого керування моментом DTC входять такі модулі: трифазний діодний випрямляч Three-phase diode rectifier; гальмівний переривач Braking chopper; трифазний інвертор Inverter_3ph; вимірювальний блок Measures; асинхронний двигун Induction machine; контур прямого керування моментом DTC; контур швидкості з регулятором Speed Controller. Система DTC використовує трифазний інверторний міст до складу якого входять шість комутуючих пристроїв, здійснюючих 8 видів перемикачів стану із отриманням різниці у 60° між просторовими векторами і нульовими (два) векторами напруги.

Графіки перехідних процесів відпрацювання завдань за швидкістю та моментом при навантаженому двигуні та без навантаження наведені на рис.4,а,б відповідно. На графіках перехідних процесів присутні коливання моменту в наслідок чого може знижуватися точність регулювання моменту. Відпрацювання за швидкістю здійснюється із незначним пере регулюванням практично без статичної помилки. Помилка за регулюванням моменту в такій системі буде присутньою та є пропорційною до інтервалу дискретності

системи. Коливання моменту будуть зменшуватися при зменшенні дискретності. Зростає необхідний запас автономного інвертора напруги за частотою. Період дискретності у спроектованій системі не може бути зміненим, тому покращення показників якості здійснюється за рахунок зменшення ширини гістерезису в регуляторі моменту (див. рис.3 блок DTC до складу якого входить гістерезисний регулятор).



а)



б)

Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів відпрацювання завдань за швидкістю та моментом при навантаженому двигуні (а) та без навантаження (б)

Висновки

Досліджена модель систем прямого керування моментом (DTC) асинхронного двигуна на прикладі математичної моделі у MATLAB. Основною перевагою є простота реалізації та універсальність для усіх типів асинхронних двигунів. Основним недоліком є коливальність моменту, що знижує точність його регулювання. Усунути недолік можна шляхом розробки алгоритмів вибору стану ключів інвертора. Система DTC може виступати альтернативою векторному або скалярному керуванню для електроприводів де головним є формування моменту а не стабілізація швидкості.

Список джерел посилань

1. ABB. DTC (2015). A motor control technique for all seasons. Retrieved from <https://new.abb.com/drives/dtc>.
2. Rupert Gouws (2014). Efficiency analysis of an induction motor with direct torque and flux control at a hot rolling mill. Paper presented at the Industrial & Commercial Use of Energy Conference (ICUE), 3,111–115.

3. Azhan Ab Rahman (2010). Simulation on Simulink AC4 Model (200hp DTC Induction Motor Drive) using Fuzzy Logic Controller. International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE 2010), 553–557.
4. MathWorks. Help Center (2018). AC4 - DTC Induction 200 HP Motor Drive. MathWorks. Help Center. Retrieved from <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/ac4-dtc-induction-200-hp-motor-drive.html>.
5. H.F. Abdul Wahab and H. Sanusi (2008). Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine. American Journal of Applied Sciences, 5, 1083–1090.
6. Pivnyak G.G and Volkov A.V. (2006). Suchasni chastotno-rehulovani asynkhronni elektropryvody z shyrotno-impulsnoiu moduliatsiieiu. Monohrafiia [Modern frequency-regulated asynchronous electric drives with pulse-width modulation. Monograph], Dnipro, NMU, 470.

АННОТАЦИЯ.

В статье рассматривается актуальность, принцип функционирования и причины возникновения систем прямого управления моментом (DTC) асинхронного двигателя. Авторами выполнено исследование математической модели прямого управления моментом асинхронного двигателя в MATLAB, выявлены основные недостатки. Основной задачей, от решения которой зависит работа системы прямого управления моментом, является идентификация потокосцепления статора. Это решается интегрированием, что приводит к накоплению ошибок. Источником появления ошибок является неточность определения активного сопротивления статора и его изменения в процессе работы асинхронного двигателя. В системе DTC присутствует недостаток, связанный с появлением незначительных пульсаций момента и колебаний скорости ротора при малых нагрузках.

Ключевые слова Асинхронный электропривод, система прямого управления, инвертор, частота коммутации, контроллер скорости, наблюдатель

ABSTRACT

The article discusses the relevance, the principle of operation and the reasons for the emergence of direct torque control (DTC) systems of an induction motor. The authors carried out a study of the mathematical model of direct torque control of an induction motor in MATLAB, and identified the main disadvantages. The main task, on the solution of which the operation of the direct torque control system depends, is the identification of the stator flux linkage. This is solved by integration, which leads to the accumulation of errors. The source of errors is the inaccuracy of determining the active resistance of the stator and its change during the operation of the induction motor. There is a disadvantage in the DTC system associated with the appearance of minor torque ripples and rotor speed fluctuations at low loads.

Keywords. Asynchronous electric drive, direct control system, inverter, switching frequency, speed controller, observer

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доцентом Ципленковим Д.В.

ТРАНСПОРТ ТА ГІРНИЧА МЕХАНІКА

УДК 622.673:539.4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ОБОЛОНКИ КОМПОЗИТНОГО ТЯГОВОГО ОРГАНА ВІД ДІЇ ДОТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Д.Л. Колосов¹, С.В. Онищенко², О.І. Білоус³, Г.І. Танцупа⁴

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
evolyuta@gmail.com, ORCID 0000-0003-0585-5908

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
mkr32568@gmail.com, ORCID 0000-0002-5709-7021

³ Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна,
bilouselena66@gmail.com, ORCID 0000-0001-6398-8843

⁴ Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна,
gannaivan71@gmail.com, ORCID 0000-0002-8672-1153

INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE OF COMPOSITE TRACTIVE ELEMENT SHELL UNDER ACTION OF TANGENT LOADS

D. Kolosov¹, S. Onyshchenko², O. Bilous³, H. Tantsura⁴

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
evolyuta@gmail.com, ORCID 0000-0003-0585-5908

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
mkr32568@gmail.com, ORCID 0000-0002-5709-7021

³ Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine,
bilouselena66@gmail.com, ORCID 0000-0001-6398-8843

⁴ Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine,
gannaivan71@gmail.com, ORCID 0000-0002-8672-1153

Мета. Встановлення залежностей показників напружено-деформованого стану оболонки композитного тягового органа – плоского гумотросового каната від дії дотичного навантаження.

Методика дослідження полягає у побудові математичної моделі та визначенні методами лінійної теорії пружності напруженого стану еластичного матеріалу оболонки композитного тягового органа від дії дотичного навантаження.

Результати дослідження. Розроблено й досліджено математичну модель напружено-деформованого стану гумової оболонки композитного тягового органа під дією дотичних навантажень, що виникають при його взаємодії з поверхнею привідного барабана. Отримано залежності переміщень та напружень у гумовій оболонці, зумовлених дотичним навантаженням, від товщини тягового органа та кроку укладення тросів. Отримано залежності жорсткості зразка за умови рівності одиниці модуля зсуву гуми та коефіцієнта концентрації дотичних напружень від товщини тягового органа та кроку укладення тросів у ньому.

Наукова новизна. Встановлено аналітичні залежності для визначення характеру розподілу дотичних напружень в еластичній оболонці гумотросового каната, включно і під час передачі тягового зусилля від барабана підйомної машини.

Практичне значення. На основі встановлених показників напружено-деформованого стану оболонки композитного тягового органа обґрунтовано раціональні конструктивні параметри підйомного гумотросового каната за умови мінімізації коефіцієнта концентрації дотичних напружень у гумовій оболонці. Розроблено рекомендації щодо визначення товщини робочої та неробочої частини гумової оболонки плоских композитних тягових органів та кроку укладення тросів у них.

Ключові слова: підйомна машина, гумотросовий канат, напружено-деформований стан, дотичне навантаження, жорсткість гумової оболонки, конструктивні параметри.

Вступ. Плоскі композитні тягові органи – гумотросові канати мають ряд переваг над традиційними круглими [1-3]. Зокрема, можливість забезпечення значної тягової спроможності каната малої товщини дозволяє значно зменшити діаметр привідного барабана, спростити конструкцію привода [3]. Можливо навіть застосування безредукторних приводів у підйомних установках, наприклад, ліфтах. Мала товщина каната може бути забезпечена шляхом застосування в їхній конструкції тросів малих діаметрів. Зменшення

діаметра привідного барабана підйомної машини призводить до зменшення дуги, за якою канату передається тягове зусилля. Відповідно зростають вимоги до точності визначення дотичних напружень у гумовій оболонці гумотросового каната підйомної машини та вибору його конструкції. Відзначеним питанням присвячена робота.

Стан питання та постановка задачі дослідження. Передача тягового зусилля від барабана тяговим елементам гумотросового каната – тросам відбувається за рахунок напружень зсуву, що виникають в гумовій оболонці каната під час її взаємодії з поверхнею барабана. Питанням визначення напруженого стану оболонки гумотросового каната присвячено багато робіт [4-11]. Однак у цих роботах не досліджувалося питання розподілу дотичних напружень, включно і по поверхні троса за умов передачі дотичного навантаження. Тому *актуальною науково-технічною задачею* є обґрунтування раціональних конструктивних параметрів підйомного гумотросового каната на основі встановлення показників напружено-деформованого стану оболонки композитного тягового органа від дії дотичного навантаження.

Основний зміст роботи. Канат утворений системою паралельних тросів, розташованих з постійним кроком. Виріжмо з каната частину гумової оболонки. Прийемо, що її сторона, яка взаємодіє з барабаном, нерухомо закріплена. Циліндричній поверхні, що взаємодіє з тросом, надамо одиничне переміщення, троси розташовані в площині симетрії каната (рис. 1).

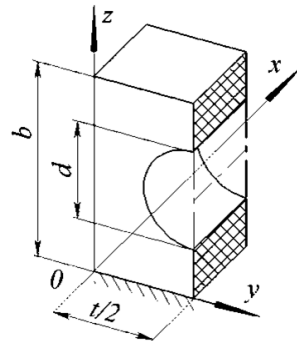


Рисунок 1 – Схема частини оболонки каната

Для наведеної схеми, з урахуванням одиничного переміщення, маємо наступні граничні умови

$$z = 0 \quad u_x = u_y = u_z = 0, \quad (1)$$

$$z = b \quad Z_z = X_z = Z_x = 0, \quad (2)$$

$$y = \frac{t}{2}, \quad 0 \leq z \leq \frac{b-d}{2} \wedge \frac{b-d}{2} + d \leq z \leq b \quad Y_x = X_y = Y_y = 0, \quad (3)$$

$$(z - b/2)^2 + (y - t/2)^2 = (d/2)^2 \quad u_x = 1, u_y = u_z = 0, \\ y = 0 \quad Y_x = X_y = Y_y = 0. \quad (4)$$

Характер навантаження гумового елемента відповідає зсувному. Задача є плоскою задачею теорії пружності. Переміщення в напрямку осі x задовольняють умові

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = 0. \quad (5)$$

Рішення рівняння (5) будемо шукати у формі

$$u = \sum_{m=1}^M A_m \frac{\text{ch}(q_m y)}{\text{sh}(q_m t/2)} \sin\left(q_m z + \frac{\pi}{2}\right) + T x + u_0, \quad (6)$$

де A_m – стала інтегрування, $q_m = \frac{\pi m}{b}$, T – рівномірно розподілене дотичне навантаження, u_0 – переміщення зразка як жорсткого тіла.

Прийнята форма рішення задовольняє усім граничним умовам, за винятком виразу (3). Виконання останньої умови забезпечимо, визначивши невідомі сталі із системи алгебраїчних рівнянь, прийнявши

значення величини M . Порядок системи рівнянь дорівнює кількості точок, що знаходяться на поверхні гумового зразка при поділі його за товщиною b на M частин

$$A = \beta^{-1} \gamma, \quad (7)$$

де

$$\beta_{i,j} = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\operatorname{ch} \left[q_m \left(\frac{t}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{b}{2} - \frac{i+t_p}{M} b \right)^2} \right) M \right]}{\operatorname{sh} \left(q_m \frac{tM}{2b} \right) q_m} + \left(\frac{i+t_p}{M} \right)^2 T \sin \left(q_m \left(i+t_p \right) + \frac{\pi}{2} \right); \quad (8)$$

$\gamma_j = 1$, t_p – номер точки, що відповідає точці, розташованій на поверхні гумового зразка, яка взаємодіє з тросом, та для якої координата $y = \frac{t}{2}$.

Вираз для переміщень гумового зразка (6) та закон Гука дозволяють визначити дотичні напруження

$$x_z = G \sum_{m=1}^M A_m \frac{\operatorname{ch}(q_m y)}{\operatorname{sh}(q_m t/2)} \cos \left(q_m z + \frac{\pi}{2} \right) q_m + T, \quad (9)$$

$$y_z = G \sum_{m=1}^M A_m \frac{\operatorname{sh}(q_m y) q_m}{\operatorname{sh}(q_m t/2)} \sin \left(q_m z + \frac{\pi}{2} \right), \quad (10)$$

де G – модуль зсуву гуми.

Модуль зсуву гуми умовно прийняли рівним одиниці. На рис. 2-4 наведені переміщення та напруження зразка, зображеного на рис. 1. Переміщення частини поверхні, що відповідає перерізу троса, показане рівним одиниці – прийнятим при визначенні невідомих сталих у виразі (5). Дотичні напруження для тієї самої частини умовно показані рівними нулю, оскільки переріз троса ми вважаємо недеформованим.

Наведений рис. 2 свідчить про виконання граничних умов деформування зразка. У перерізі $z = 0$ відсутні переміщення. Переміщення точок контуру троса дорівнюють одиниці.

Відповідно до рис. 3 відносні зсуви по поверхнях $y = 0$ та $y = t/2$ дорівнюють нулю, що відповідає умовам симетрії, та які були використані під час вибору форми зразка гумового прошарку.

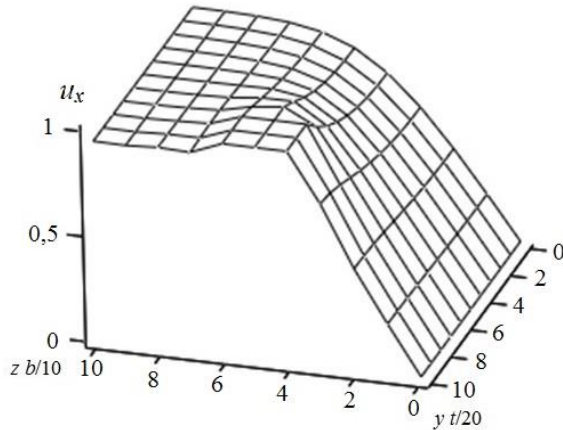


Рисунок 2 – Форма перерізу половини гумового прошарку, розташованого поміж тросами, набутий ним внаслідок деформування

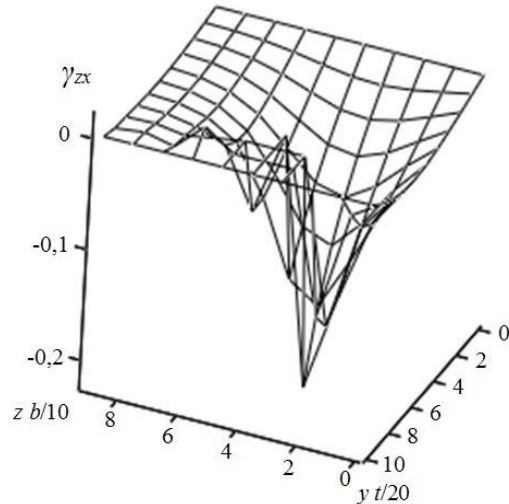


Рисунок 3 – Розподіл відносних зсувів γ_{zx} перерізу половини гумового прошарку, розташованого поміж тросами, зумовлених дотичним навантаженням

Зображений на рис. 4 розподіл відносних зсувів γ_{zy} перерізу половини гумового прошарку демонструє зменшення дотичного зусилля, що передається гумою в перерізі розташування троса. Кругла форма троса, яка зумовлює зміну відстаней від поверхні троса до поверхні $z = 0$, призводить до нерівномірного розподілу відносних зсувів і, відповідно, дотичних напружень в гумовому прошарку.

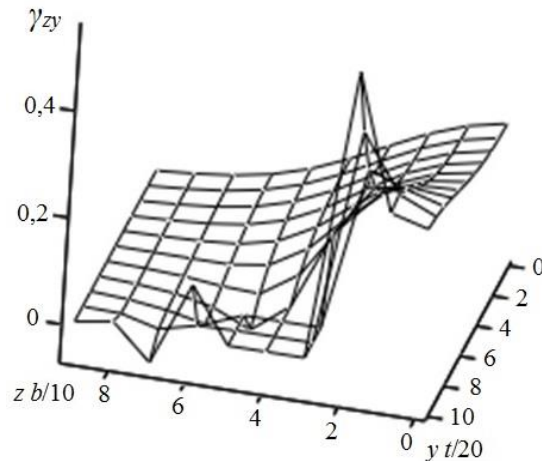


Рисунок 4 – Розподіл відносних зсувів γ_{zy} перерізу половини гумового прошарку, розташованого поміж тросами, зумовлених дотичним навантаженням

З використанням отриманих залежностей визначали жорсткість на зсув частини каната шириною, що становить половину кроку укладення тросів. На рис. 5 зображено залежність жорсткості зразка J_0 за умови, що модуль зсуву гуми дорівнює одиниці. Графік побудовано у координатах, що дорівнюють відношенню перевищень товщини каната та кроку укладення тросів над діаметром тросів до їх діаметрів.

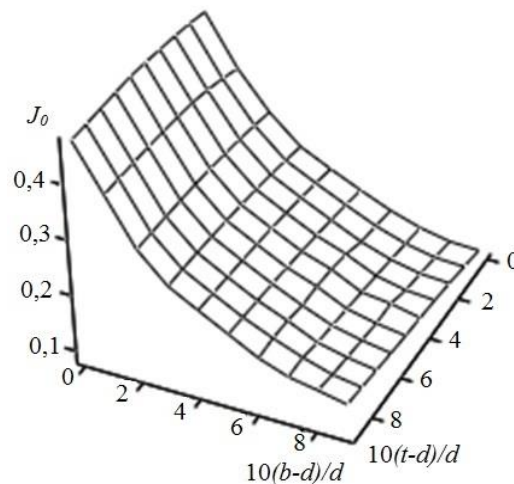


Рисунок 5 – Залежність відносної жорсткості каната J_0 від його товщини та кроку укладення тросів

Отримана графічна залежність (рис. 5) показує, що геометричні параметри каната впливають на його жорсткість. Більший нелінійний вплив спричиняє товщина каната. Зменшення товщини каната веде до зростання жорсткості. Вказане відповідає механізму взаємодії барабана з тросами через гумову оболонку. За умови, коли діаметр тросів дорівнює товщині каната, жорсткість їхнього зв'язку безмежно велика. Крок укладення тросів практично лінійно впливає на жорсткість каната на зсув. Зменшення кроку їх розташування в канаті веде до зменшення жорсткості. Вказане також відповідає механізму передачі зусилля від барабана тросам, за якого зменшення ширини ділянки передачі сил без зміни ортогонального розміру, веде до зростання жорсткості зразка.

Складна форма гумового елемента, що передає зусилля від барабана тросам, впливає на розподіл напружень у ньому. Розподіл напружень у гумовій оболонці каната, особливо в умовах малих дуг контакту барабана та каната, впливає на міцність оболонки каната. Нами було продемонстровано, що максимум дотичних напружень реалізується в точках матеріалу, максимально наближених до поверхні барабана та тих, що взаємодіють з тросами каната. Визначимо відношення напружень в цих точках до середніх напружень зсуву по поверхні взаємодії каната з барабаном. Відношення максимальних напружень до середніх, як правило, називають коефіцієнтом концентрації напружень. Результати розрахунків коефіцієнта концентрації напружень від кроку укладення тросів та товщини каната $b = 1,2d$. На рис. 6 зображено залежність коефіцієнта концентрації напружень від товщини каната за кроку укладення тросів каната $t = 1,2d$.

Відповідно до побудованого графіка (рис. 6), коефіцієнт концентрації напружень лінійно зростає зі збільшенням кроку укладення тросів.

З наведеного рис. 7 видно, що коефіцієнт концентрації напружень зі зростанням товщини каната зменшується. Відзначимо, що якісно зміни коефіцієнта концентрації напружень відбуваються аналогічно змінам жорсткості каната від його геометричних параметрів.

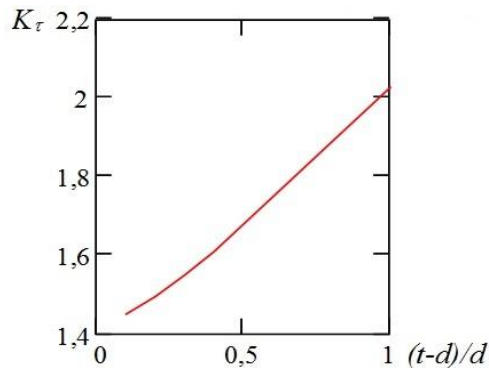


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта концентрації напружень від кроку укладення тросів за товщини каната $b = 1,2d$

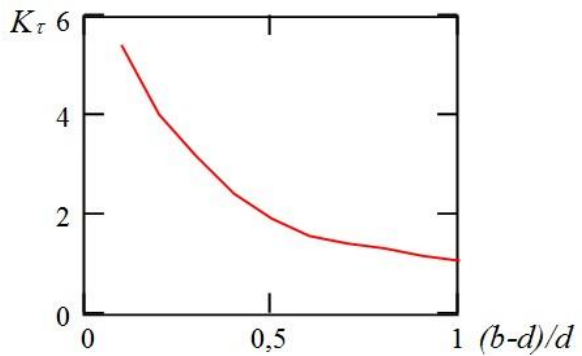


Рис. 7 – Залежність коефіцієнта концентрації напружень від товщини каната за кроку укладення тросів каната $t = 1,2d$

Маса каната будь-якої конструкції впливає на технічні параметри машини. Для зменшення впливу маси гумотросового каната доцільно зменшувати товщину гумових обкладинок каната та крок укладення тросів у ньому. Зменшення товщини каната із симетричним розташуванням тросів призводить до суттєвого зростання коефіцієнта концентрації напружень (рис. 7). Зменшення кроку укладення тросів супроводжується зменшенням коефіцієнтів концентрації напружень. Вказане дозволяє зменшувати масу каната шляхом зменшення кроку укладення тросів та зменшення товщини неробочої обкладинки (протилежної до барабана).

На рис. 8 зображено деформування гумового зразка, у якого зовнішня обкладинка відсутня, а товщина каната становить 1,2 діаметра троса.

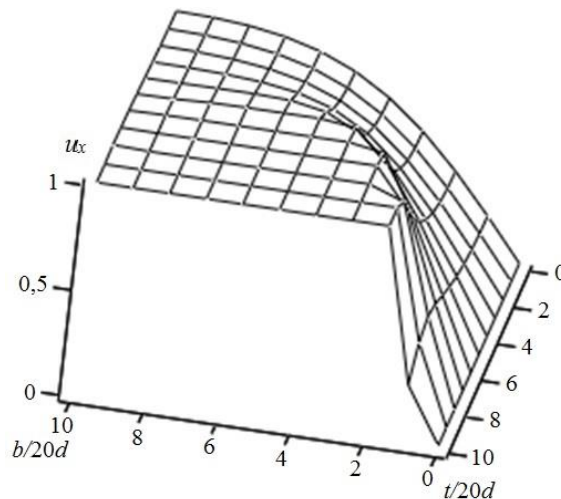


Рис. 8 – Форма нормального перерізу половини гумового прошарку, розташованого поміж тросами, набутого ним в результаті деформування

Набутий гумовим прошарком форма вказує, що гума в перерізі, розташованому ближче до поверхні каната без обкладинки, практично не змінюється, як і у випадку симетричного розташування тросів в канаті. Вказане свідчить про незначний вплив гуми неробочої обкладинки каната на передачу тросам каната тягового зусилля, і відповідно про можливість практичного використання та ефективності такого технічного рішення.

Нами було проаналізовано вплив відсутності зовнішньої обкладинки на характер розподілу дотичних напружень за поверхнею взаємодії гуми з тросами. Для цього встановили залежність коефіцієнта концентрації напружень в гумовій оболонці від кроку укладення тросів за товщини гумової обкладинки, що дорівнює 1,1 діаметра троса. Результати наведені на рис. 9.

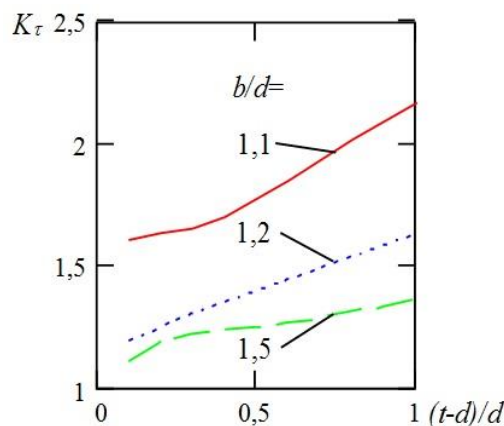


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта концентрації дотичних напружень K_τ від кроку укладення тросів t без неробочої обкладинки за різних відношень товщини каната b та діаметра тросів d в ньому

Порівняємо графіки (рис. 6) та (рис. 9). За різних значень відношення товщини каната та діаметра троса коефіцієнти концентрації напружень зростають. Більше зростають вказані коефіцієнти за менших відносних товщин обкладинок. На наведеному на графіку інтервалі коефіцієнти концентрації напружень для $d/b = 1,1$ перевищують відповідні коефіцієнти для випадку $d/b = 1,2$ у середньому на 23 %, а для випадку $d/b = 1,5$ – на 31 %. Вказане дозволяє пропонувати для підйомних машин приймати товщину робочої обкладинки каната не меншою за 0,2 діаметра троса та крок укладення тросів у ньому не меншим за 1,2 діаметра троса.

Неробоча обкладинка виконує захисні протикорозійні функції. Виготовити канат з кроком меншим за одну цілу та дві десяті діаметра троса технологічно складно. Тому можна рекомендувати приймати товщину робочої обкладинки каната не меншою за дві десяті діаметра троса та крок укладення тросів в ньому не меншим за одну цілу та дві десяті діаметра троса. Товщину неробочої обкладинки слід приймати мінімальною за умовами технології виготовлення каната та більшою за нуль для забезпечення захисту тросів від впливу агресивних шахтних вод і захисту від механічної взаємодії з іншими об'єктами.

Висновки. У роботі виконано обґрунтування раціональних конструктивних параметрів підйомного гумотросового каната на основі встановлених показників напружено-деформованого стану оболонки композитного тягового органа від дії дотичного навантаження. Доведено, що в плоских гумотросових канатах підйомних машин слід приймати товщину робочої обкладинки не меншою за дві десяті діаметра троса та крок укладення тросів в них не меншим за одну цілу та дві десяті діаметра троса. Товщину неробочої обкладинки приймати мінімальною з умов технології виготовлення каната та більшою за нуль. Коефіцієнти концентрації дотичних напружень при цьому не перевищать 1,5.

Список літератури

1. Колосов, Л.В. (1987). Научные основы разработки и применения резинотросовых канатов подъемных установок глубоких рудников. Дис. докт. наук: 05.05.06, 01.02.06. ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск.
2. Ропай, В.А. (2016). *Шахтные уравновешивающие канаты: монография*. Днепропетровск: НГУ.
3. Колосов, Д.Л. (2015). Развитие теории шахтных подъемных установок с головными гумотросовыми канатами: Дис. докт. техн. наук: 05.05.06., НГУ, Днепропетровськ.
4. Заболотный, К.С., Панченко, Е.В., & Жупиев, А.Л. (2011). *Теория многослойной намотки резинотросового каната: монография*. Днепропетровск: НГУ.
5. Carbogno, A., Żołnierz, M., Kawka, A., & Dyrda, J. (2015). *Badania współczynnika tarcia liny wyrównawczej płaskiej stalowo-gumowej: Monografia*. Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie. Łódź, Polska.
6. Ropaj, W.A. (2017). Parametry sztywności lin wyciągowych w zależności od siły rozciągającej. Trwałosc Elementow i Wezlow Konstrukcyjnych Maszyn Gorniczych TEMAG 2017, XXV Miedzynarodowa konferencja naukowo-techniczna. Ustron, pp. 155–162.
7. Zabolotnyi, K.S., Panchenko, O.V., Zhupiiiev, O.L., & Polushyna, M.V. (2018). Influence of parameters of a rubber-rope cable on the torsional stiffness of the body of the winding. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. (5), 54–63. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/11.
8. Kolosov, D., Bilous, O., Tantsura, H., & Onyshchenko, S. (2018). Stress-strain state of a flat tractive-bearing element of a lifting and transporting machine at operational changes of its parameters. *Solid State Phenomena*. (277), 188–201. DOI: doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.188
9. Belmas, I.V., Kolosov, D.L., Kolosov, A.L., & Onyshchenko, S.V. (2018). Stress-strain state of rubber-cable tractive element of tubular shape. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. (2), 60–69. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/5
10. Бельмас, І.В., & Колосов, Д.Л. (2017). Напружено-деформований стан плоского каната зумовлений поривами тягових елементів та конструкцією барабана підйомної машини. *Збірник наукових праць Національного гірничого*

університету, (50), 163-170.

11. Блохин, С.Е., Колосов, Д.Л., Матысина, Н.В., & Шидо, Н.Н. (2013). Напряженно-деформированное состояние плоского резинотросового тягового органа в прицепном устройстве. *Горн. информ.-аналит. бюл.*, (3), 256–261.

АННОТАЦИЯ

Цель. Установление зависимостей показателей напряженно-деформированного состояния оболочки композитного тягового органа – плоского резинотросового каната от действия касательной нагрузки.

Методика исследования заключается в построении математической модели и определении методами линейной теории упругости напряженного состояния эластичного материала оболочки композитного тягового органа от действия касательной нагрузки.

Результаты исследования. Разработана и исследована математическая модель напряженно-деформированного состояния резиновой оболочки композитного тягового органа под действием касательных нагрузок, возникающих при его взаимодействии с поверхностью приводного барабана. Получены зависимости перемещений и напряжений в резиновой оболочке, обусловленных касательной нагрузкой, от толщины тягового органа и шага укладки тросов. Получены зависимости жесткости образца при условии равенства единице модуля сдвига резины и коэффициента концентрации касательных напряжений от толщины тягового органа и шага укладки тросов в нем.

Научная новизна. Установлены аналитические зависимости для определения характера распределения касательных напряжений в эластичной оболочке резинотросового каната, включительно и при передаче тягового усилия от барабана подъемной машины.

Практическое значение. На основании установленных показателей напряженно-деформированного состояния оболочки композитного тягового органа, обоснованы рациональные конструктивные параметры подъемного резинотросового каната из условия минимизации коэффициента концентрации касательных напряжений в резиновой оболочке. Разработаны рекомендации по определению толщины рабочей и нерабочей части резиновой оболочки плоских композитных тяговых органов и шага укладки тросов в них.

Ключевые слова: подъемная машина, резинотросовый канат, напряженно-деформированное состояние, касательная нагрузка, жесткость резиновой оболочки, конструктивные параметры.

ABSTRACT

Purpose. Establishment of dependencies of indicators of a stress-strain state of a shell of composite tractive element – flat rubber-cable rope under the action of tangent loads.

Methodology of research is in a construction of a mathematical model and determining a stress-strain state of a shell of composite tractive element under the action of tangent loads using the methods of linear theory of elasticity.

Findings. A mathematical model of a stress-strain state of a rubber shell of composite tractive element under the action of tangent loads that occur during interaction with a surface of a driving drum is developed and investigated. Dependencies of displacements and stresses in a rubber shell caused by tangent loads on tractive element thickness and cable placement spacing are obtained. Dependencies of sample rigidity when rubber shear modulus is equal to one unit are established. Dependencies of concentration coefficient of tangent stresses on tractive element thickness and cable placement spacing are obtained.

Scientific novelty. Analytical dependencies are established to determine a character of distribution of tangent stresses in an elastic shell of rubber-cable rope, including the cases during a transfer of tractive force from a hoisting machine drum.

Practical significance. Rational design parameters of a hoisting rubber-cable rope are justified on a basis of established indicators of a stress-strain state of a shell of composite tractive element, while fulfilling a condition of minimization of a concentration coefficient of tangent stresses in a rubber shell. Recommendations for determining a thickness of operating and non-operating parts of a rubber shell of flat composite tractive elements and a cable placement spacing in them are developed.

Keywords: hoisting machine, rubber-cable rope, stress-strain state, tangent load, rubber shell rigidity, design parameters.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, професором Самусею В.І.

ГІДРАВЛІЧНИЙ УДАР У ГОЛОВНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВКАХ ШАХТ З НЕВЕЛИКОЮ ВИСОТОЮ ВОДОПІДЙОМУ

М.В. Холоменюк

Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

kholomeniuk.m.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-8347-8151

WATER HAMMER IN THE MAIN DRAINAGE INSTALLATIONS OF MINES WITH A LOW LIFT

M.V. Kholomeniuk

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

kholomeniuk.m.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-8347-8151

Анотація. Відповідно до вимоги Правил безпеки засобами для запобігання або гасіння гідравлічних ударів повинні облаштовуватися водовідливні установки шахт при висоті подачі води понад 400 м. У той же час тиск у нагнітальних трубопроводах при перехідних процесах може досягати небезпечного рівня й при суттєво меншій висоті водопідйому, особливо це стосується багатководних шахт де часто використовується паралельна робота кількох насосів на спільний трубопровід. **Мета роботи** полягає в обґрунтуванні необхідності перевірки міцності нагнітальних водовідливних трубопроводів багатководних шахт при гідравлічних ударах, які можуть виникати при раптових несанкціонованих відключеннях насосів, незалежно від висоти водопідйому.

В роботі використана графо-аналітична **методика дослідження** перебігу гідравлічного удару в головній водовідливній установці шахти, висота підйому води в якій складає 269 м.

Результатом дослідження є встановлення того, що виходячи з обладнання, яке використовується, потрібна подача установки може бути забезпечена при паралельній роботі двох насосів, але без кавітації вони зможуть працювати при висоті всмоктування меншій, ніж 2,7 м. У той же час при одночасній роботі трьох насосів на спільний трубопровід їхня допустима геометрична висота всмоктування перевищує 5,0 м, що забезпечує високу надійність роботи установки. При зазначеній схемі використання насосів швидкість потоку в напірному трубопроводі зростає до 5,36 м/с, що може спричинити неприємне зростання напору в разі раптового відключення насосів. Встановлено, що незважаючи на те, що в установці ударне зростання напору виникає лише в третій фазі гідравлічного удару, величина його становить 96 м, тобто напір в установці при раптовому відключенні насосів зростає на 27 % у порівнянні з робочим.

Практичне значення результатів роботи полягає в обґрунтуванні того, що встановлення потреби в захисті водовідливної установки від негативного впливу гідравлічного удару неможна робити виходячи лише з висоти подачі води.

Ключові слова: головний водовідлив шахти, гідравлічний удар, потреба в заходах щодо запобігання або гасіння гідравлічних ударів.

ВСТУП. Відомо, що ударне зростання напору в шахтних водовідливних установках, викликане несанкціонованим раптовим відключенням насосів, зростає при збільшенні глибини шахти і саме цим пояснюється поява в діючих Правилах безпеки у вугільних шахтах вимоги щодо облаштування головних водовідливів засобами для запобігання або гасіння гідравлічних ударів при висоті подачі води понад 400 м. У той же час досвід свідчить, що небезпечний рівень тиску в нагнітальному трубопроводі може виникати й при значно меншій глибині шахти. Показовою в цьому відношенні є головна водовідливна установка шахти «Дніпровська».

Насосна камера установки знаходиться в приствольному дворі горизонту 265 м. Зараз максимальний годинний приплив води становить $Q_{\max} = 430 \text{ м}^3/\text{год}$ і, відповідно, розрахункова подача установки дорівнює $Q_r = 516 \text{ м}^3/\text{год}$. В насосній камері встановлено шість робочих насосів типу ЦНСШ 300–360, які приводяться в дію асинхронними електродвигунами ВАО4–560S–4 потужністю 500 кВт.

Вода відкачується по трьом нагнітальним трубопроводам $D_u = 250 \text{ мм}$, що прокладені по допоміжному стволі. Загальна довжина однієї нитки трубопроводу складає $L_{ng} = 400 \text{ м}$. Всмоктувальні трубопроводи змонтовані з труб $D_u = 300 \text{ мм}$ і розрахунковою довжиною $L_{vs} = 20 \text{ м}$.

Гідравлічний опір зовнішньої мережі установки з однієї нитки нагнітального трубопроводу $R = 0,908 \cdot 10^{-4} \text{ год}^2/\text{м}^5$. Рівняння характеристики зовнішньої мережі

$$H_m = 269 + 0,908 \cdot 10^{-4} Q^2, \text{ м.}$$

Графічний аналіз роботи установки наведено на рис. 1.

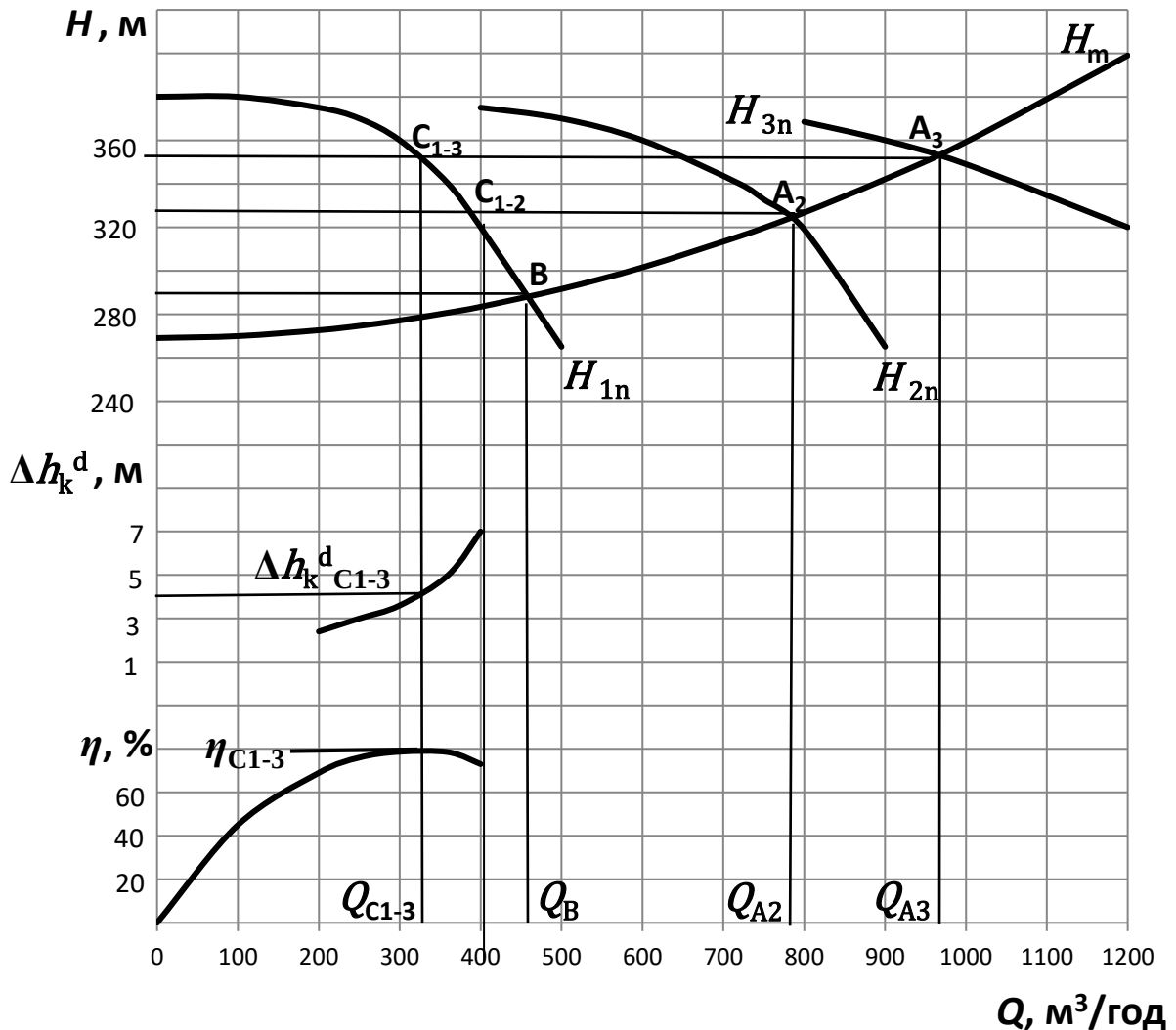


Рисунок 1 – Графічний аналіз роботи головної водовідливної установки

З нього видно, що в даних умовах неможна включати один насос на один напірний трубопровід, через те, що робоча точка установки (точка *B*) в цьому разі буде знаходитися далеко за правою межею робочої зони насоса. Для нормалізації роботи насосів треба зменшити їх подачу. Зробити це в даних умовах раціонально шляхом паралельного підключення кількох насосів до існуючої зовнішньої мережі.

При паралельній роботі двох насосів (робоча точка агрегату A_2) забезпечується потрібна подача установки, але допустима геометрична висота всмоктування насосів (робоча точка кожного насоса C_{1-2}) становитиме лише 2,7 м, що недостатньо для нормальної експлуатації насосів.

При паралельній роботі трьох насосів (робоча точка агрегату A_3) подача установки становитиме $Q_{A3} = 970 \text{ м}^3/\text{год}$, при цьому кожен насос буде працювати з подачею $Q_{C_{1-3}} = 323 \text{ м}^3/\text{год}$ при допустимій геометричній висоті всмоктування насосів 5,4 м, отже в цьому разі надійно буде забезпечена робота насосів без кавітації.

У разі одночасної паралельної роботи трьох насосів швидкість потоку в нагнітальному трубопроводі становить

$$v_3 = \frac{4Q_{A3}}{3600\pi d_{ng}^2} = \frac{4 \cdot 970}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,253^2} = 5,36 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При такій великій швидкості виникає небезпека значного ударного зростання напору в трубопроводі у випадку несанкціонованого раптового вимкнення привідних двигунів. Гідравлічні удари в напірному трубопроводі будуть виникати при буди-яких переключеннях насосів у системі. Однак величина їх при вимкненні одного або двох насосів не буде становити загрози зважаючи на те, що в цих випадках швидкість потоку в трубопроводі не спадає до нуля. У разі ж одночасної раптової зупинки усіх трьох насосів гальмування потоку буде повним, що спричинить появу в трубопроводі гідравлічного удару максимального значення. Встановимо його величину за методикою, що викладена в [1]. При розрахунку будемо визначати параметри потоку в двох перерізах нагнітального трубопроводу: у початковому перерізі 1-1, який приймаємо на вході в трубопровід безпосередньо після зворотного клапана, що встановлений на виході з насоса; у кінцевому перерізі 2-2, який приймаємо на виході з трубопроводу.

Вихідні дані для розрахунку ударного підвищення напору

Параметри робочого режиму насосного агрегату в стабільному режимі (робоча точка установки – точка A_3 на рис. 1):

подача $Q_{A3} = 970 \text{ м}^3/\text{год}$; напір $H_{A3} = 354 \text{ м}$; ККД $\eta_{C1-3} = 80 \%$;

номінальна частота обертання вала $n_n = 1485 \text{ об/хв}$.

Напір насоса при нульовій подачі та номінальній частоті обертання вала $H_0 = 380 \text{ м}$.

Геометричні та пружні дані нагнітального трубопроводу:

внутрішній діаметр $d_{ng} = 253 \text{ мм}$; товщина стінки $\delta_{ng} = 10 \text{ мм}$; загальна довжина $L_{ng} = 400 \text{ м}$;

модуль пружності матеріалу стінки труби (модуль пружності сталі), у розрахунках задаємо $E_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

Об'ємний модуль пружності води, у розрахунках задаємо $E_v = 2 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Густина відкачуваної води $\rho = 1010 \text{ кг/м}^3$.

Гідравлічний опір нагнітального трубопроводу $R = 0,908 \cdot 10^{-4} \text{ год}^2/\text{м}^5$.

Момент інерції ротора привідного двигуна $I_d = 11,0 \text{ кг/м}^2$.

Попередні розрахунки

Швидкість поширювання ударної хвилі зміни напору в нагнітальному трубопроводі

$$c = \sqrt{\frac{E_v}{\rho \left(1 + \frac{E_v}{E_s} \cdot \frac{d_{ng}}{\delta_{ng}}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^9}{1010 \left(1 + \frac{2 \cdot 10^9}{2 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{253}{10}\right)}} = 1257 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Тривалість фази гідравлічного удару

$$T = \frac{2L_{ng}}{c} = \frac{2 \cdot 400}{1257} = 0,636 \text{ с}.$$

Площа живого перерізу нагнітального трубопроводу

$$F = \frac{\pi d_{ng}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,253^2}{4} = 0,05 \text{ м}^2.$$

Кутовий коефіцієнт хвильової характеристики нагнітального трубопроводу

$$k_k = \frac{c}{3600gF} = \frac{1257}{3600 \cdot 9,81 \cdot 0,05} = 0,712 \text{ год/м}^2.$$

Сумарний момент інерції насосного агрегату

$$\sum I = 1,15I_d = 1,15 \cdot 11 = 12,65 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.$$

Момент, що створює привідний двигун на валу насоса в робочому режимі

$$M_r = \frac{\rho g Q_{C1-3} H_{C1-3}}{120\pi n_n \eta_{C1-3}} = \frac{1010 \cdot 9,81 \cdot 323 \cdot 354}{120 \cdot 3,14 \cdot 1485 \cdot 0,8} = 2530 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де $Q_{C_{1-3}} = 323 \text{ м}^3/\text{год}$ – подача одного насоса в складі агрегату; $H_{C_{1-3}} = 354 \text{ м}$ – напір одного насоса.

Визначення ударного підвищення напору після раптового вимкнення привідних двигунів
Рівняння характеристики зовнішньої мережі водовідливної установки для від'ємних витрат

$$H_m = H_{\text{geo}} - RQ^2 = 269 - 0,908 \cdot 10^{-4} Q^2.$$

Рівняння хвильових характеристик нагнітального трубопроводу для вхідного 1 – 1 та вихідного 2 – 2 перерізів, відповідно

$$\begin{aligned} H_{k\ 1-1} - H_{0\ 1-1} &= k_k(Q_{k\ 1-1} - Q_{0\ 1-1}), \\ H_{k\ 2-2} - H_{0\ 2-2} &= -k_k(Q_{k\ 2-2} - Q_{0\ 2-2}), \end{aligned}$$

де H_k і H_0 – кінцевий і початковий напори у відповідних перерізах, м;

Q_k і Q_0 – кінцева та початкова витрати в цих перерізах, $\text{м}^3/\text{год}$.

Розрахунковий теоретично можливий мінімальний напір у перерізі 1 – 1 в кінці першої фази гідрравлічного удару. У цьому разі

$$H_{0\ 1-1} = H_{A3}; \quad Q_{0\ 1-1} = Q_{A3}; \quad Q_{k\ 1-1} = 0.$$

Тоді

$$H_{k\ 1-1} = H_{k\ (1-1)\min} = H_{A3} - k_k Q_{A3} = 354 - 0,712 \cdot 970 = -337 \text{ м}.$$

Але завжди $H_{k\ 1-1} \geq 0$, отже в даному випадку $H_{k\ (1-1)\min} = 0$.

Витрата в перерізі 1 – 1 в кінці першої фази гідрравлічного удару. У цьому разі $H_{0\ 1-1} = H_{A3}$; $Q_{0\ 1-1} = Q_{A3}$; $H_{k\ 1-1} = 0$.

$$Q_{k\ 1-1} = Q_{0\ 1-1} - \frac{H_{0\ 1-1}}{k_k} = 970 - \frac{354}{0,712} = 473 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Стала часу насосного агрегату

$$T_a = \frac{\pi n_n \sum I}{30 M_r} = \frac{3,14 \cdot 1485 \cdot 12,65}{30 \cdot 2530} = 0,778 \text{ с}.$$

Частота обертання вала насоса в кінці першої фази гідрравлічного удару

$$n_1 = n_n \frac{T_a}{T_a + T} = 1485 \cdot \frac{0,778}{0,778 + 0,636} = 817 \text{ об/хв}.$$

Напір насоса при нульовій подачі та частоті обертання n_1 за формулою пропорційності

$$H_{01} = H_0 \left(\frac{n_1}{n_n} \right)^2 = 380 \left(\frac{817}{1485} \right)^2 = 115 \text{ м}.$$

У даному випадку $H_{k\ (1-1)\min} = 0 < H_{01} = 115 \text{ м}$, отже в системі після раптового відключення привідних двигунів виникає непрямий гідрравлічний удар. Графічний аналіз цього перехідного гідрравлічного процесу в координатах $Q - H$ виконано на рис. 2 в наведеній нижче послідовності.

На рис. 2 лінія H_m відображає характеристику зовнішньої мережі, а лінії H_n і H_{3n} відображають напірну характеристику одного насоса і сумарну напірну характеристику насосного агрегату відповідно. Точка A_3 – це робоча точка агрегату в стабільному режимі роботи установки.

На осі абсцис відмічаємо точкою A_{3-0} подачу $Q_{k\ 1-1} = 473 \text{ м}^3/\text{год}$ і з'єднуємо точки A та A_{3-0} прямою лінією, частина якої буде відображати хвильову характеристику перерізу 1 – 1 для першої фази гідрравлічного удару.

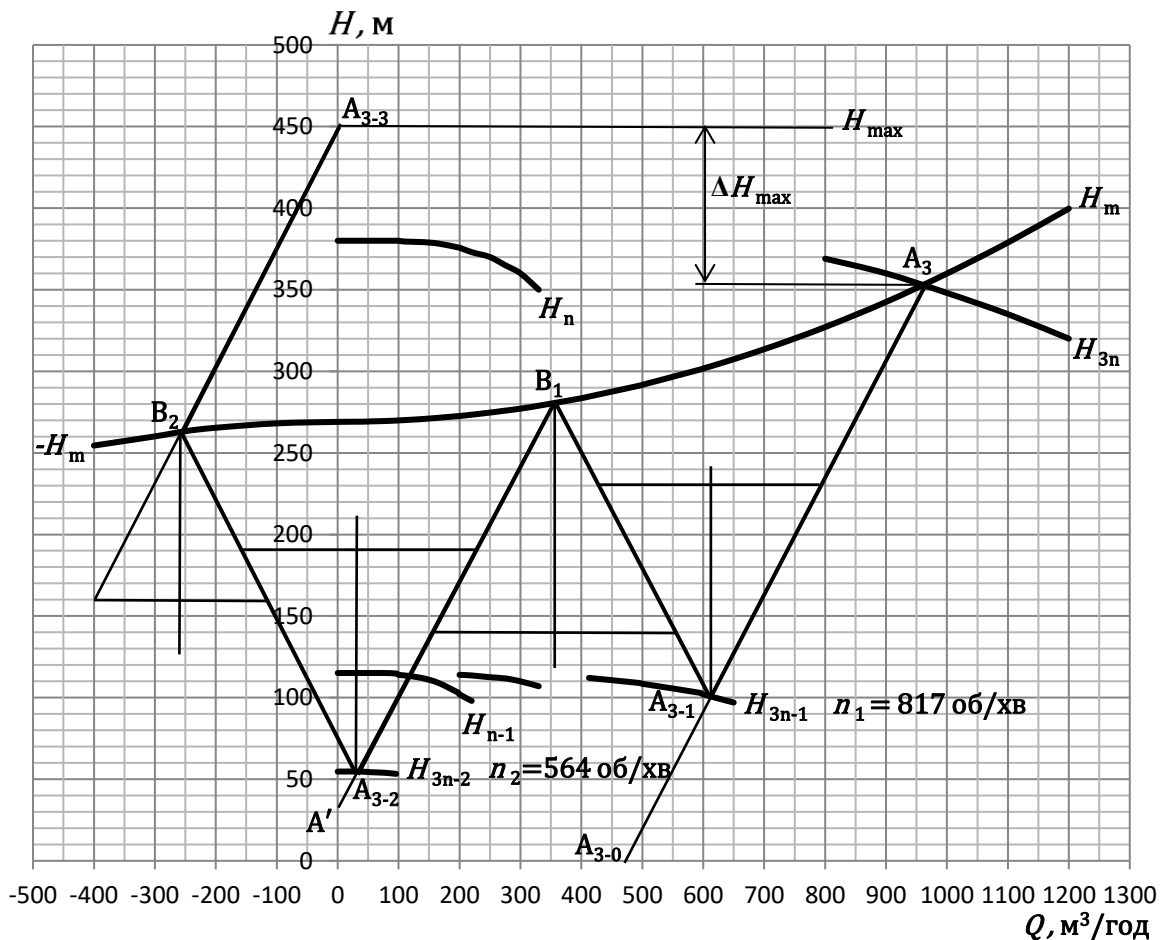


Рисунок 2 – Графічний аналіз перебігу перехідного гідравлічного процесу в головній водовідливній установці при раптовому відключенні привідних двигунів

Параметри потоку в перерізі трубопроводу 1 – 1 визначаються координатами точки перетину хвильової характеристики для перерізу з графіком граничної залежності між витратою та напором у цьому перерізі. При непрямому гідравлічному ударі такою граничною залежністю є напірна характеристика насоса при зниженій частоті обертання вала – у кінці першої фази гідравлічного удару частота обертання вала становить n_1 .

Напірну характеристику насоса при частоті обертання вала n_1 отримуємо шляхом перерахунку паспортної напірної характеристики, що відповідає номінальній частоті обертання вала n_n . Перерахована напірна характеристика позначена H_{3n-1} .

Позначимо точку перетину лінії A_3A з графіком перерахованої напірної характеристики насоса літерою A_{3-1} – отримана пряма A_3A_{3-1} є хвильовою характеристикою перерізу 1 – 1 для першої фази гідравлічного удару. Координати точки A_{3-1} відповідають параметрам потоку в перерізі 1 – 1 у кінці першої фази гідравлічного удару, її абсциса $Q_{A_{3-1}}$ дорівнює витраті рідини, що надходить у трубопровід у цій фазі гідравлічного удару; її ордината $H_{A_{3-1}}$ відповідає напору, що створює насос у цей момент.

Для визначення напору в кінцевому перерізі трубопроводу під час першої фази гідравлічного удару, проводимо через точку A_{3-1} хвильову характеристику для перерізу 2 – 2 до перетину її з граничною залежністю для цього перерізу в першій фазі гідравлічного удару.

Хвильова характеристика для перерізу 2 – 2 в першій фазі гідравлічного удару є прямою, симетричною хвильовій характеристиці для перерізу 1 – 1 відносно вертикальної прямої, проведеної через точку A_{3-1} . Тому для побудови хвильової характеристики для перерізу 2 – 2 заздалегідь проводимо через точку A_{3-1} допоміжну вертикальну пряму.

Граничною залежністю для перерізу 2 – 2 в першій фазі гідравлічного удару є характеристика зовнішньої мережі. Хвильова характеристика для перерізу 2 – 2 перетинається з граничною залежністю

для цього перерізу в точці B_1 , яка в даному випадку знаходиться в першому квадранті. Це говорить про те, що в даній установці за період першої фази гідравлічного удару гальмування потоку не завершилося і в кінці цієї фази вода продовжує рухатися в напрямку від насоса до вихідного перерізу.

Для визначення параметрів потоку в другій фазі гідравлічного удару проводимо з точки B_1 хвилюву характеристику для перерізу 1 – 1 для другої фази гідравлічного удару – вона є прямою, симетричною хвилювій характеристиці для перерізу 2 – 2 відносно вертикальної прямої, проведеної через точку B_1 . Тому для побудови хвилювої характеристики для перерізу 1 – 1 в другій фазі гідравлічного удару заздалегідь проводимо через точку B_1 допоміжну вертикальну пряму. Слід відмітити, що характеристика, яка будується, паралельна хвилювій характеристиці для перерізу 1 – 1 в першій фазі гідравлічного удару і може бути побудованою з урахуванням цього.

Позначимо точку перетину зазначеної прямої з віссю H літерою A' – напір $H_{A'}$ дорівнює мінімально можливому напору в перерізі 1 – 1 в кінці другої фази гідравлічного удару. З побудованого графіка випливає

$$H_{A'} = H_{k(1-1)min2} = 32 \text{ м.}$$

Порівняємо напір $H_{k(1-1)min2}$ з напором, який створює насос при нульовій подачі в кінці другої фази гідравлічного удару H_{02} . Для цього визначаємо частоту обертання вала насоса в кінці другої фази гідравлічного удару:

$$n_2 = n_n \frac{T_a}{T_a + T_{1+2}},$$

де T_{1+2} – тривалість двох фаз гідравлічного удару.

Очевидно, що $T_{1+2} = 2T_1 = 2 \cdot 0,636 = 1,272 \text{ с.}$

Тоді

$$n_2 = 1485 \cdot \frac{0,778}{0,778 + 1,272} = 564 \text{ об/хв.}$$

Розраховуємо напір насоса при нульовій подачі та частоті обертання n_2

$$H_{02} = H_0 \left(\frac{n_2}{n_n} \right)^2 = 380 \left(\frac{564}{1485} \right)^2 = 55 \text{ м.}$$

У даному випадку $H_{k(1-1)min2} = 32 \text{ м} < H_{02} = 55 \text{ м}$, це свідчить про те, що граничною залежністю між витратою та напором у перерізі 1 – 1 у другій фазі гідравлічного удару є напірна характеристика насоса при зниженій частоті обертання вала – у кінці другої фази гідравлічного удару частота обертання вала становить n_2 .

Напірну характеристику насоса при частоті обертання вала n_2 отримуємо шляхом перерахунку паспортної напірної характеристики, що відповідає номінальній частоті обертання вала n_n , у звичайному порядку.

На рис. 2 зображені лише початкові ділянки перерахованих напірних характеристик одного насоса та сумарних напірних характеристик насосних агрегатів з двох та трьох насосів, де вони практично співпадають. Перерахована характеристика позначена H_{3n-2} .

Позначимо точку перетину лінії B_1A' з графіком перерахованої напірної характеристики насоса H_{3n-2} літерою A_{3-2} – отримана пряма B_1A_{3-2} є хвилювою характеристикою перерізу 1 – 1 для другої фази гідравлічного удару. Координати точки A_{3-2} відповідають параметрам потоку в перерізі 1 – 1 у кінці другої фази гідравлічного удару, її абсциса $Q_{A_{3-2}}$ дорівнює витраті рідини, що надходить у трубопровід у цій фазі гідравлічного удару; її ордината $H_{A_{3-2}}$ відповідає напору, що створює насос у цей момент.

Для визначення напору в кінцевому перерізі трубопроводу під час другої фази гідравлічного удару, проводимо через точку A_{3-2} хвилюву характеристику для перерізу 2 – 2 до перетину її з граничною залежністю для цього перерізу в другій фазі гідравлічного удару.

Хвилюва характеристика для перерізу 2 – 2 в другій фазі гідравлічного удару є прямою, симетричною хвилювій характеристиці для перерізу 1 – 1 в цій фазі відносно вертикальної прямої, проведеної через точку A_{3-2} . Тому для побудови хвилювої характеристики для перерізу 2 – 2 заздалегідь проводимо через точку A_{3-2} допоміжну вертикальну пряму.

Граничною залежністю для перерізу 2 – 2 в другій фазі гідравлічного удару є характеристика

зовнішньої мережі для від'ємних витрат. Хвильова характеристика для перерізу 2 – 2 перетинається з граничною залежністю для цього перерізу в точці B_2 . Координати точки B_2 відповідають витраті рідини, що рухається по трубопроводу в напрямку до насоса.

Для визначення напору в перерізі 1 – 1 під час третьої фази гідравлічного удару проводимо з точки B_2 хвильову характеристику для цього перерізу в третій фазі гідравлічного удару. Ця хвильова характеристика є прямою, паралельною хвильовим характеристикам для перерізу 1 – 1 у першій та другій фазах гідравлічного удару.

Хвильову характеристику для перерізу 1 – 1 у третій фазі гідравлічного удару проводимо до перетину її з граничною залежністю для цього перерізу. У цій фазі гідравлічного удару граничною залежністю для перерізу 1 – 1 є вісь H . Хвильова характеристика перетинається з граничною залежністю в точці A_{3-3} . Ордината точки A_{3-3} дорівнює напору, що буде мати місце в перерізі 1 – 1 упродовж третьої фази гідравлічного удару. Напір $H_{A_{3-3}}$ – це максимальний напір, який виникає в установці при раптовому відключенні привідних двигунів насосів, тобто

$$H_{A_{3-3}} = H_{k(1-1)3} = H_{\max}.$$

З побудованих графіків випливає, що $H_{\max} = 450$ м.

Отже, абсолютне зростання напору в головній водовідливній установці шахти «Дніпровська» у разі несанкціонованого раптового вимкнення привідних двигунів становить

$$\Delta H_{\max} = H_{A_{3-3}} - H_{A_3} = 450 - 354 = 96 \text{ м.}$$

У відносному вимірі збільшення напору в установці дорівнює

$$\delta H_{\max} = \frac{\Delta H_{\max}}{H_{A_3}} \cdot 100 = \frac{96}{354} \cdot 100 = 27,1 \text{ \%}.$$

Шахтні напірні трубопроводи відповідно до норм проектування розраховуються на 25-відсоткове підвищення напору, тому при $\delta H_{\max} > 25\%$ треба передбачити заходи щодо захисту трубопроводу. Отже, потребу в захисті шахтних водовідливних установок від негативного впливу гідравлічного удару, який може в них виникати, неможна пов'язувати лише з глибиною шахти.

Висновки

Ударне зростання напору в головних водовідливних установках може сягати неприйнятних значень в шахтах з невеликою висотою водопідйому. Тому потребу в захисті шахтних водовідливних установок від негативного впливу гідравлічного удару, який може в них виникати, неможна пов'язувати лише з глибиною шахти.

Перелік посилань

1. Холоменюк М.В. Насосні та вентиляторні установки: навчальний посібник / М.В. Холоменюк. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – 330 с.

АННОТАЦІЯ

В соответствии с требованием Правил безопасности средствами для предупреждения или гашения гидравлических ударов должны оборудоваться водоотливные установки шахт при высоте подачи воды более 400 м. В то же время давление в нагнетательных трубопроводах при переходных процессах может достигать опасного уровня и при существенно меньшей высоте водоподъема, особенно в шахтах с высокой водообильностью, где часто используется параллельная работа нескольких насосов на общий трубопровод. **Цель работы** состоит в обосновании необходимости проверки прочности нагнетательных водоотливных трубопроводов водообильных шахт при гидравлических ударах, которые могут возникать при внезапных несанкционированных отключениях насосов, независимо от высоты водоподъема.

В работе использован графо-аналитический **метод исследования** протекания гидравлического удара в главной водоотливной установке шахты, высота подъема воды в которой составляет 269 м.

Результатом исследования является то, что исходя из оборудования, которое используется, установлено, что необходимая подача установки может быть обеспечена при параллельной работе двух насосов, однако без кавитации они смогут работать при высоте всасывания меньшей, чем 2,7 м. В то же время при одновременной работе трех насосов на общий трубопровод их допустимая геометрическая высота

всасывания превышает 5,0 м, что обеспечивает высокую надежность работы установки. При указанной схеме использования насосов скорость потока в напорном трубопроводе возрастает до 5,36 м/с, что может вызвать неприемлемое увеличение напора в случае внезапного отключения насосов. Установлено, что несмотря на появление в установке ударного возрастания напора лишь в третьей фазе гидравлического удара, величина его составляет 96 м, т.е. напор в установке при внезапном отключении насосов возрастает на 27 % по сравнению с рабочим.

Практическое значение результатов работы состоит в обосновании того, что определение потребности в защите водоотливной установки от отрицательного влияния гидравлического удара нельзя делать исходя только с высоты подачи воды.

Ключевые слова: главный водоотлив шахты, гидравлический удар, необходимость в мероприятиях по предупреждению или гашению гидравлических ударов.

ABSTRACT

Annotation. In accordance with the requirement of the Safety Rules, drainage installations of mines with a water supply height of more than 400 m must be equipped with means to prevent or extinguish water hammers. At the same time, the pressure in the injection pipelines during transient processes can reach a dangerous level and at a significantly lower water lift, especially but in mines with high water content, where parallel operation of several pumps on a common pipeline is often used. **The purpose of the work** is to substantiate the need to check the strength of the discharge drainage pipelines of water-abundant mines during hydraulic shocks, which can occur during sudden unauthorized shutdowns of pumps, regardless of the height of the water lift.

In the work, a **graphical-analytical method** was used to study the flow of a hydraulic shock in the main drainage system of a mine, the height of the water rise in which is 269 m.

The result of the study is that, based on the equipment that is used, it has been established that the required flow of the installation can be provided with parallel operation of two pumps, however, without cavitation, they will be able to work at a suction height less than 2.7 m. At the same time, with the simultaneous operation of three pumps on a common pipeline, their permissible geometric suction height exceeds 5.0 m, which ensures high reliability of the installation. With the specified pumping scheme, the flow rate in the discharge pipeline increases to 5.36 m / s, which can cause an unacceptable increase in head in the event of a sudden shutdown of the pumps. It was found that despite the appearance of a shock increase in the head in the installation only in the third phase of the hydraulic shock, its value is 96 m, i.e. the head in the installation in case of a sudden shutdown of the pumps increases by 27% compared to the operating head.

Practical value of work results consists in justifying the fact that the determination of the need to protect the drainage system from the negative effect of water hammer cannot be done based only on the height of the water supply.

Keywords: main drainage of the mine, water hammer, the need for measures to prevent or extinguish water hammers.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, професором Самусею В.І.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

УДК 62.04: 62.91: 62.92: 620.179:534.6: 629.4.082.053

МАТЕРІАЛИ ЗМАЩУВАЛЬНІ РІДКІ І ПЛАСТИЧНІ. МЕТОД ЕКСПРЕС ВІДБОРУ

А.С. Беліков¹, О.Г. Кравченко², О.Б. Завалій³, М.В. Лихарев³, З.М. Мацук³, В.В. Проців⁴,
В.У. Григоренко⁴, В.А. Козечко⁴

¹ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна
bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

²СП «Локомотивне депо Нижньодніпровськ Вузол» Регіональна філія «Придніпровська залізниця»
АТ «Укрзалізниця. Дніпро, Україна, kravcenkoaleksandr513@gmail.com

³ТОВ "МОДІФІК", Дніпро, Україна, modific@ukr.net, matsuk.z.n@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6114-9536.

⁴НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна; protsiv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2269-4993,

⁵НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна; gvu135gvu@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1809-2842,

⁶НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна; kozechkova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2837-187X

LUBRICANT LUBRICANTS AND PLASTIC MATERIALS. EXPRESS SELECTION METHOD

A. Byelikov¹, O. Kravchenko², O. Zavalii³, M. Lykharev³, Z. Matsuk³, V. Protsiv⁴,
V. Hryhorenko⁴, V. Kozechko⁴

¹Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine
bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

²JV "Locomotive depot Nizhnedneprovsk Knot" Regional Branch "Dnieper Railway" JSC "Ukrzaliznytsia",
Dnipro, Ukraine, kravcenkoaleksandr513@gmail.com

³LLC "MODIFIK", Dnipro, Ukraine, modific@ukr.net, matsuk.z.n@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6114-9536.

⁴Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, protsiv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2269-4993,

⁵Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, gvu135gvu@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1809-2842,

⁶Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, kozechkova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2837-187X

Мета. Обґрунтування необхідності переходу промислових підприємств України до енергосусефективного підходу у питаннях відбору змащувальних матеріалів за критерієм «Ціна за змащувальний матеріал з відповідними фізико-хімічними властивостями» на прикладі відбору змащувального матеріалу для пари тертя «гребень (реборда) колеса (бандажу колеса) – рейка» залізничного та рейкового транспорту. Розробка методу експрес відбору змащувальних матеріалів та основних засад порядку допуску їх до застосування на виробництві.

Методика дослідження. Експеримент, спостереження, вимірювання, обробка експериментальних даних, статистичний та порівняльний аналіз.

Результати дослідження. Обґрунтована необхідність відбору змащувальних матеріалів на етапі прийняття рішення про їх застосування за критерієм «Ціна за змащувальний матеріал з відповідними фізико-хімічними властивостями». Розроблена експрес методики відбору.

Наукова новизна. До геотрибоенергетики введено нове поняття – «здатність змащувального матеріалу підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування» та супутній показник – «показник деградації здатності змащувального матеріалу підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування». Необхідно якомога швидше переходити до енергосусефективного підходу у питаннях відбору усіх (рідких/пластичних) змащувальних матеріалів за критерієм «Ціна за змащувальний матеріал з відповідними фізико-хімічними властивостями». Разом з цим необхідно адаптувати бортові системи лубрикації локомотивів під змащувальні матеріали з найкращими фізико-хімічними та трибологічними властивостями, а не навпаки, та звернутись до виробників систем лубрикації з проханням вказувати в настановах з монтажу та експлуатації систем не марку рекомендованого до

застосування змащувальних матеріалів, а межі фізико-хімічних показників таких змащувальних матеріалів, які їх системи здатні наносити на відповідні поверхні тертя.

Практичне значення результатів роботи. Промисловим підприємствам України запропоновано здійснити перехід до енергосресурсоефективного підходу у питаннях відбору змащувальних матеріалів, зроблено та впроваджено метод експрес відбору змащувальних матеріалів.

Ключові слова: змащувальний матеріал, енергосресурсоефективність, відбір, метод, властивості.

Вступ. Робота сучасних машин і механізмів характеризується надвеликим терміном служби, важкими умовами експлуатації та «задовільним» рівнем фінансування регламентних і ремонтних робіт. Майже всі відповідальні деталі машин відчувають взаємні переміщення, а отже тертя і пов'язані з ним явища – хімічні, гальванічні і структурні перетворення, механічний і термічний впливи, знос та контактну втому. Процеси, які супроводжують тертя, змінюють властивості деталей і вузлів, визначають їх міцність, надійність і довговічність. Через зношування вузлів трибосполучень відбувається від 80 % до 90 % відмов машин і механізмів [1, 2].

Збільшення терміну служби основних машин, механізмів і устаткування, зниження їх металоємності, скорочення чисельності робітників, зайнятих ремонтом, підвищення продуктивності та безпеки техніки залежить в значній мірі від рішення трибологічних проблем, що включають завдання оптимізації тертя, зносу, змащувальних матеріалів (далі – ЗМ) [3].

У світовій практиці ЗМ (рідкі/пластичні) класифікуються за показниками в'язкості, пенетрації, за рекомендованим температурним діапазоном застосування, за видами палива агрегатів, за типом основи, за природою походження загусника, за областю застосування (на групи за призначенням), навіть за модельним роком випуску агрегату (США). За реальними трибологічними показниками (властивостями) – такими, як наприклад, протизношувальні властивості, ЗМ у світі не класифікуються. Під час вибору ЗМ власник агрегату користується настановами заводу-виробника, де зазначені рекомендовані до застосування ЗМ у аббревіатурі однієї з відомих класифікацій/стандартів (SAE, API, ACEA, NLGI, ILSAC тощо). У разі, якщо агрегати випущені до введення в дію тих чи інших загальноприйнятих класифікацій/стандартів, їх власники користуються перекладними таблицями відповідності, розробленими заводами-виробниками ЗМ, довідниками тощо.

Сучасні умови характеризуються особливою насиченістю ринку ЗМ контрафактною продукцією та/або ЗМ, які не задовольняють сучасним вимогам. Або навпаки, трапляється так, що ЗМ постачальника оригінальний і нібито стандартизований, але склад унікального пакету його присадок і, як наслідок, вплив на конструкційні матеріали конкретного вузла тертя, визначити неможливо. Разом з цим існують випадки, коли заводи-виробники елементів вузлів тертя взагалі не рекомендують які ЗМ застосовувати, прикладом є надвідповідальна пара тертя «гребень (реборда) колеса (бандажу колеса) – рейка». Що робити в усіх цих умовах!?

В таких умовах очевидно, що підприємствам з високим ступенем механізації необхідно переходити до енергосресурсоефективного підходу у питаннях відбору змащувальних матеріалів та впроваджувати методи експрес відбору ЗМ на етапі прийняття рішення про їх застосування.

Постановка задачі. Основним завданням сьогодення є розробка простого та доступного для застосування персоналом відділів забезпечення виробництва промислових підприємств, порядку допуску до застосування на виробництві ЗМ різного призначення та експрес методу відбору ЗМ.

Мета роботи. Обґрунтування необхідності переходу промислових підприємств України до енергосресурсоефективного підходу у питаннях відбору змащувальних матеріалів за критерієм «Ціна за змащувальний матеріал з відповідними фізико-хімічними властивостями» на прикладі відбору змащувального матеріалу для пари тертя «гребень (реборда) колеса (бандажу колеса) – рейка» залізничного та рейкового транспорту. Розробка методу експрес відбору змащувальних матеріалів та основних засад порядку допуску їх до застосування на виробництві.

Методи. Експеримент, спостереження, вимірювання, обробка експериментальних даних, статистичний та порівняльний аналіз.

Матеріали дослідження. Починаючи з 18.04.2019 до 27.01.2020, за ініціативою ТОВ «МОДІФІК» та АТ «Укрзалізниця» під науковим керівництвом д-ра техн. наук В.В. Проціва (НТУ «ДП») та д-ра техн. наук А.С. Белікова (ДВНЗ «ПДАБА») було проведено стендові та експлуатаційні випробування наповнювачів твердозмащувальних ТУ 20.5-001-42277844-2019 (далі – НТ ТУ 20.5-001-42277844-2019), виробництва ТОВ «МОДІФІК» в якості антифрикційних наповнювачів для спеціальних ЗМ (Рельсол-М ТУ У 00152365.089:2001, ТУ У 23.2 30802090-055:2006), призначених для лубрикації контактних поверхонь тертя пари «гребень колеса (бандажу колеса) – рейка» тягового рухомого складу залізничних господарств.

За підсумком стендових випробувань [4, 5] було встановлено, що модифікований НТ ТУ 20.5-001-42277844-2019 ЗМ Рельсол-М ТУ У 23.2 30802090-055:2006 випереджає за своїми протизношувальними властивостями базовий не модифікований ЗМ на 341 %.

Згодом, за підсумком експлуатаційних випробувань було встановлено, що регенований, гомогенізований та модифікований НТ ТУ 20.5-001-42277844-2019 ЗМ Рельсол-М ТУ У 00152365.089:2001 (партія № 4, дата виготовлення 23.06.2005), навіть з вичерпаним терміном придатності, зберігає та демонструє

«ефект переносу» на всіх колесах локомотиву ВЛ ВЛ11м/6 № 496 (АТ «Укрзалізниця») та уповільнює інтенсивність зношування гребнів бандажів коліс, відповідно [6]:

- гребені бандажів, які не обточувались протягом випробування – у 3,57 рази;
- гребені бандажів, які обточувались протягом випробування – у 4,25 рази;
- усереднено по усіх колесах локомотиву – у 2,94 рази.

Під час спостереження та в ході аналізу матеріалів випробувань [5, 6] було встановлено, що їх результати корелюються з точністю, достатньою для того, щоб прийняти методику стендових випробувань [5] другою базовою методикою для відбору ЗМ після методики ГОСТ 9490 [7] за відносною простотою та за ступенем відтворюваності результатів.

Згодом, в ході виконання науково-дослідної роботи на замовлення АТ «Укрзалізниця» за темою: «Послуги з дослідження змащувальних матеріалів і сучасних систем лубрикації колісних пар локомотивів та їх застосування з метою зменшення зносу гребнів бандажів колісних пар, розробка рекомендацій», науковцями НТУ «Дніпровська політехніка» було доопрацьовано програму-методику стендових випробувань ЗМ [5] та розроблено експрес метод відбору ЗМ, який отримав назву: «Матеріали змащувальні рідкі і пластичні. Метод експрес відбору», (надалі – методика).

У спрощеному вигляді методика містить наступні етапи:

- 1) Порівняння фізико-хімічних показників ЗМ, заявлених заводом-виробником, з урахуванням реальних умов експлуатації пари тертя.
- 2) Відбір ЗМ з найкращими фізико-хімічними показниками за вхідними даними (не менше двох ЗМ).
- 3) Визначення показника зносу для ЗМ (D_3) при постійному навантаженні P_1 в 196 Н та обробка результатів випробувань аналогічно за ГОСТ 9490 [7] (зі змінами) за допомогою чотирьохкулькової машини тертя (рисунок 1);
- 4) Визначення показника зносу для ЗМ (D_3) при постійному навантаженні P_2 в 392 Н та обробка результатів випробувань аналогічно за ГОСТ 9490 [7] (зі змінами) за допомогою чотирьохкулькової машини тертя (рисунок 1);

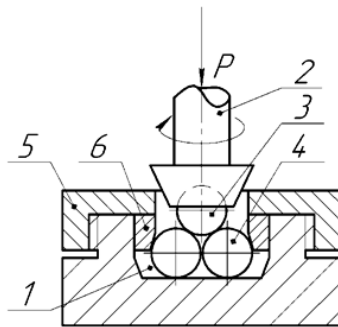


Рисунок 1 – Схеми випробувань на машині тертя ЧКМ:

1 – мастильний матеріал; 2 – цанга; 3 – верхня кулька; 4 – нижні кульки; 5 – гайка; 6 – притискна шайба

- 5) Визначення показника здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування, з урахуванням подвійного підвищення навантаження:

$$\frac{D_{32}}{D_{31}} = x,$$

де D_{31} – показник зносу ЗМ (D_3) при постійному навантаженні в 196 Н, мм; D_{32} – показник зносу ЗМ (D_3) при постійному навантаженні в 392 Н, мм.

Здатність ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування – це здатність ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя процесам руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла та (або) накопиченню залишкової деформації тіла під час тертя, яка поступово змінює його розміри та (або) форму, що ведуть до руйнування елементів трибосистеми або істотно скорочують термін її служби.

Показник (x) має наближуватися до одиниці.

- 6) визначення показника деградації здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування (U_3), з урахуванням подвійного підвищення навантаження:

$$U_3 = \left(\frac{D_{32}}{D_{31}} - 1 \right) \times 100 \%,$$

де U_3 – показник деградації, %; D_{31} – показник зносу ЗМ (D_3) при постійному навантаженні в 196 Н, мм; D_{32} – показник зносу ЗМ (D_3) при постійному навантаженні в 392 Н, мм.

Показник деградації здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування (U_3) – це показник погіршення здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування (%).

Найкращим доцільно вважати ЗМ, при використанні якого показник деградації здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування (U_3) у відсотковому виразі має найменше значення.

У подібний спосіб, без відмінностей, доцільно проводити випробування ЗМ, в тому числі, для стаціонарних та пересувних рейкозмашувачів.

7) Визначення показника здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування через показник втрати маси рухомого зразку, з урахуванням подвійного підвищення навантаження, за схемою випробування зображено на рисунку 2.

Випробування проводяться на машині тертя СМЦ-2, застосовується схема контакту досліджуваних зразків «ролик – колодка» (рисунк 2), яка імітує умови роботи кінематичної пари, що максимально наближено (з доступних машин тертя, які випускаються серійно) відповідає роботі пари тертя «гребень бандажу колеса – рейка».

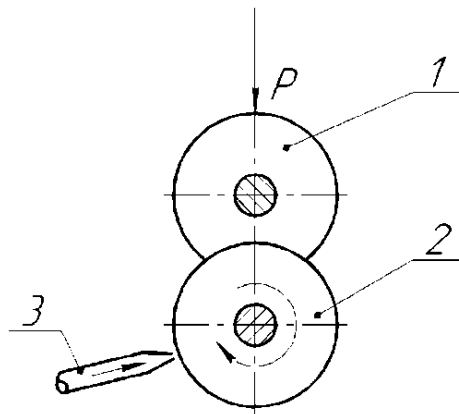


Рисунок 2 – Схема випробувань на машині тертя СМЦ-2:
1 – колодка; 2 – ролик; 3 – вприскування мастильного матеріалу

Обидві деталі пари тертя (колодка 1 і ролик 2, що на рис. 2) виготовляються із конструкційної сталі і піддаються обробці до твердості, яка орієнтовно відповідає поверхням гребенів коліс рухомого складу та бокових граней головок рейок (твердість колодки від НВ360 до НВ370; твердість ролика – від НВ280 до НВ300). До того ж, колодка виконана максимально наближено до розмірів ролика, що додатково моделює умови роботи пари тертя «гребень бандажу колеса – рейка» (зв'язок речовина-енергія).

На контрольних зразках за допомогою контрольних вагів (з точністю до 0,0001 г) у присутності базового ЗМ (наприклад «Солідол-Ж») визначають нижню межу навантаження (P_1), за якої починаються процеси зношування, котрі характеризуються стійкою втратою маси рухомого зразку (ролика). Разом з цим, визначають стабільну швидкість обертання контрольних зразків. Так, обирають стійкий режим тертя без заїдань, скрипів та надмірних вібрацій.

В процесі випробувань у другому циклі навантаження (P_1) подвоюють (P_2) в межах експлуатаційної можливості СМЦ-2 без переобладнання.

Під час визначення (P_1) базовий ЗМ подається до зони тертя циклічно 2 рази/хв у кількості (по масі), яка дорівнює кількості ЗМ, котрий вприскується на гребень реборди колеса за одне включення бортової системи лубрикації локомотиву (надалі-БСЛ), для якої відбирається ЗМ. Так само протягом випробувань подається ЗМ, що підлягає випробуванню.

Під час визначення (P_1) та протягом випробувань контролюється температура контактної зони пари тертя у зоні виходу контактних зразків із контакту за допомогою безконтактного вимірювача температури. Навантаження (P_1) вважається обраним, якщо процеси активного зношування контрольного рухомого

зразку (ролик) починаються за температури вузла тертя, що не є вищою за температуру краплевипадіння ЗМ, який підлягає випробуванню.

Для створення можливості оцінки здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя зразків до переходу в катастрофічні режими зношування, випробування проводяться циклічно в двох режимах навантажень у три цикли ($P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1$) із загальною тривалістю одного циклу випробувань у кожному режимі не менше, ніж одна година, як це видно з таблиці 1. В кожному режимі навантажень для кожного ЗМ випробування повторюються по три рази, при цьому кожного разу на нових зразках. Контрольне зважування ретельно очищених від ЗМ та продуктів зносу лабораторних зразків виконується щогодини.

Таблиця 1

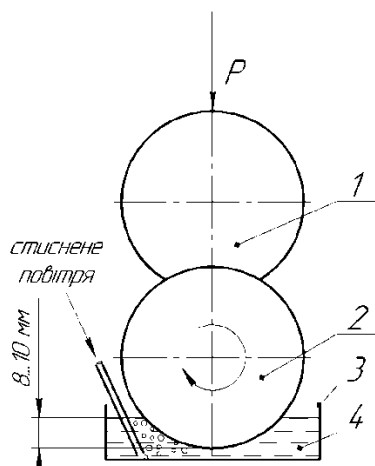
Режими зміни навантажень	
Навантаження, Н	Час випробувань, хв
P_1	60
P_2	60
P_1	60
Загалом	180 (3 год)

Найкращим доцільно вважати ЗМ, при використанні якого показник деградації здатності ЗМ підвищувати опір поверхонь тертя до переходу в катастрофічні режими зношування у відсотковому виразі має найменше значення. У подібний спосіб доцільно проводити випробування ЗМ, в тому числі для стаціонарних та пересувних рейкозмашувачів, за однієї відмінності, що за контрольну величину беруть втрату маси нерухомого зразку (колодки).

Перевага серед подібних віддається ЗМ, під час випробування якого на чотирьохкульковій машині тертя (протягом години, при навантаженнях в 196 Н і 392 Н) на поверхні тертя виявляється наявність сервовітної плівки, яка перетікає по поверхні тертя в напрямку ковзання.

Властивості рідких ЗМ на чотирьохкульковій машині тертя досліджуються у подібний спосіб без відмінностей за схемою, наведеною на рисунку 1.

Властивості рідких ЗМ на машині тертя СМЦ-2 досліджуються за схемою, наведеною на рисунку 3.



**Рисунок 3 – Схема дослідження рідких ЗМ на машині тертя СМЦ-2:
1 – колодка; 2 – ролик; 3 – кювета; 4 – мастильний матеріал**

Щодо обґрунтування необхідності переходу промислових підприємств України до енергосресурсоефективного підходу у питаннях відбору змащувальних матеріалів за критерієм «Ціна за змащувальний матеріал з відповідними фізико-хімічними властивостями» на прикладі відбору змащувального матеріалу для пари тертя «гребень (реборда) колеса (бандажу колеса) – рейка» залізничного та рейкового транспорту. Відомо, що існують випадки, коли заводи-виробники елементів вузлів тертя взагалі не рекомендують які саме ЗМ застосовувати, прикладом цього є надвідповідальна пара тертя «гребень (реборда) колеса (бандажу колеса) – рейка».

В цьому випадку власники тягового рухомого складу – залізничні господарства вимушені обирати ЗМ, які рекомендовані виробниками бортових систем лубрикації (надалі – БСЛ), якими обладнані (планується обладнати) локомотиви, що призводить до застосування в якості ЗМ для лубрикації контактних поверхонь пари «колесо-рейка» в одному випадку «осьової оливи марки Л» [8] та індустріальної оливи

марки І-40 [9], які навіть за призначенням, а не то що за трибологічними властивостями, не відповідають умовам експлуатації та особливостям зазначеної пари тертя.

В іншому випадку виробники БСЛ рекомендують ЗМ Рельсол-М та Рельсол-ГС, які за своїми трибологічними властивостями поступаються сучасним аналогам, схильні до загусання в патрубках та форсунках БСЛ за низьких температур навколишнього середовища та мають нестабільні фізико-хімічні показники.

Не складно зрозуміти, що це все призводить до марних капіталовкладень, непродуктивного використання робочого часу залізничного персоналу, не призводить до отримання бажаного енергосусурсоефективного результату від впровадження технології лубрикації контактних поверхонь пари «колесо-рейка» та значно знижує рівень виробничої безпеки рухомого складу. Закордонні зразки ЗМ для зазначеної пари тертя також не класифікуються за трибологічними властивостями та, зазвичай, їдуть в «комплекті» із системами змащення, тобто також рекомендуються виробниками БСЛ. Вартість закордонних систем лубрикації щонайменше вдвічі перевищує вартість вітчизняних аналогів. Ціна закордонних (не найкращих) ЗМ із задовільними трибологічними властивостями доходить до 15 Євро за 1 кг.

Як розібратися у цьому всьому «різноманітті»? В таких умовах, звісно, підприємствам залізничного транспорту та іншим промисловим підприємствам з високим ступенем механізації необхідно якомога швидше переходити до енергосусурсоефективного підходу у питаннях відбору усіх (рідких/пластичних) змащувальних матеріалів за критерієм «Ціна за змащувальний матеріал з відповідними фізико-хімічними властивостями». Разом з цим необхідно адаптувати бортові системи лубрикації локомотивів під ЗМ з найкращими фізико-хімічними та трибологічними властивостями, а не навпаки, та звернутись до виробників систем лубрикації з проханням вказувати в настановах з монтажу та експлуатації систем не марку рекомендованого до застосування ЗМ, а межі фізико-хімічних показників таких ЗМ, які їх системи здатні наносити на відповідні поверхні тертя. У випадку із ЗМ, які рекомендує завод-виробник агрегатів, наприклад, для трансмісійних оливи, слід також дотримуватись зазначеного критерію та обов'язково під час прийняття рішення щодо застосування ЗМ використовувати енергосусурсоефективні підходи та досліджувати основні властивості ЗМ за допомогою експрес методів.

Слід визнати, що змащування гребенів коліс локомотивів підібраним ЗМ [5] значно зменшує знос гребенів. На рисунку 4 наведені результати експериментальних випробувань регенованого гомогенізованого та модифікованого за допомогою наповнювача твердозмащувального (НТ ТУ.У 20.5-42277844-001:2019) виробництва ТОВ «МОДІФІК» мастила «Рельсол-М» виробництва ВАТ «Азмол» (ТУ У 00152365.089:2001, партія № 4, дата виготовлення 23.06.2005) на електровозі ВЛ11/6 в умовах Придніпровської залізниці.



Рисунок 4 – Середній знос по внутрішнім колесам №№ 5 і 6 електровоза ВЛ11/6 (лівим і правим – всього по 4 колесам), що не переточувалися за увесь період випробувань

У спрощеному вигляді порядок допуску ЗМ до застосування передбачає наступні етапи:

- моніторинг ЗМ, відбір проб ЗМ, проведення лабораторних експрес випробувань на предмет підтвердження відповідності основних властивостей ЗМ встановленим показникам, експлуатаційні випробування ЗМ на об'єкті використання;

– прийняття уповноваженим органом підприємства рішення щодо допуску змащувального матеріалу до застосування на об'єкті використання.

Основні засади порядку допуску ЗМ до застосування на виробництві наступні:

– недопущення до застосування ЗМ з невизначеними фізико-хімічними та трибологічними властивостями;

– допуск до відбору щонайменше двох ЗМ;

– лабораторним випробуванням завжди передуватиме відбір ЗМ за вхідними даними заводу-виробника;

– експлуатаційні випробування ЗМ на об'єкті використання обов'язкові лише за умов відсутності рекомендацій заводу-виробника щодо застосування ЗМ відповідної класифікаційної групи.

Висновки. Обґрунтована необхідність переходу промислових підприємств України до енергосервise-ефективного підходу у питаннях відбору змащувальних матеріалів за критерієм «Ціна за змащувальний матеріал з відповідними фізико-хімічними властивостями». Розроблено метод експрес відбору змащувальних матеріалів та основних засад порядку допуску їх до застосування у виробництві.

Перелік посилань

- 1 Гаркунов Д.Н. (2001) *Триботехніка: Учебник 4-е изд.* – М. : «Издательство МСХА», – 616 с.
- 2 Марков Д.П. (2007) *Трибологія і її застосування на залізничному транспорті*. Труды ВНИИЖТ – М. : «Интекст», – 408 с.
- 3 Дідик Р.П. (2003). *Дослідження механізму дії геомодифікаторів та розробка геотрибології з метою підвищення ресурсу гірничо-металургійного обладнання: отчет о НИР (заключительный)* / Национальный горный университет. рук. Р. П. Дидик – ГП-294; ГР 0102U003026, № 0204 U000700. – 120 с.
- 4 Проців В.В., Мацук З.М., Козечко В.А. (2019). *Випробування змащувальних матеріалів для гребнезмащувачів та пересувних стаціонарних колійних рейкозмащувачів*. Сборник научных трудов международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2019». – Днепр: НТУ «ДП», – С. 80-86.
- 5 Програма та методика приймальних випробувань. Змащувальні матеріали для гребне- та рейкозмащувачів. Оцінка властивостей змащувальних матеріалів. НТУ «ДП», АТ «Укрзалізниця», ТОВ «МОДІФІК», м. Дніпро, Дата введення в дію 17.04.2019.
- 6 Програма-методика. Оцінка протизношувальних властивостей модифікованих змащувальних матеріалів у локомотивних системах лубрикації гребенів бандажів колісних пар тягового рухомого складу. НТ 30.63.001:2019 ПМ2 // НТУ «ДП», АТ «Укрзалізниця», ТОВ «МОДІФІК», м. Дніпро, Дата введення в дію 03.09.2019.
- 7 ГОСТ 9490-75 Матеріали змащувальні рідкі і пластичні. Метод визначення трибологічних характеристик на чотирьохкульовій машині тертя.
- 8 ГОСТ 610-72 Оливи осьові. Технічні умови.
- 9 ГОСТ 20799-88 Оливи індустріальні. Технічні умови.

АННОТАЦИЯ

Цель. Обоснование необходимости перехода промышленных предприятий Украины на энергоресурсоэффективный подход в вопросах отбора смазочных материалов по критерию «Цена за смазочный материал с соответствующими физико-химическими свойствами» на примере отбора смазочного материала для пары трения «гребень (реборда) колеса (бандажа колеса) – рельс» железнодорожного и рельсового транспорта. Разработка метода экспресс отбора смазочных материалов и основных принципов порядка допуска их к применению на производстве.

Методика исследований. Эксперимент, наблюдения, измерения, обработка экспериментальных данных, статистический и сравнительный анализ.

Результаты исследования. Обоснована необходимость отбора смазочных материалов на этапе принятия решения об их применении по критерию «Цена за смазочный материал с соответствующими физико-химическими свойствами». Разработана экспресс методика отбора.

Научная новизна. В геотрибоэнергетику введено новое понятие – «способность смазочного материала повышать сопротивляемость поверхностей трения к переходу в катастрофические режимы изнашивания» и сопутствующий показатель – «показатель деградации способности смазочного материала повышать сопротивление поверхностей трения к переходу в катастрофические режимы износа». Необходимо как можно скорее переходить к энергосервise-ефективного подхода в вопросах отбора всех (жидких/пластических) смазочных материалов по критерию «Цена смазочный материал с соответствующими физико-химическими свойствами». Вместе с этим необходимо адаптировать бортовые системы лубрикации локомотивов под смазочные материалы с лучшими физико-химическими и трибологическими свойствами, а не наоборот, и обратиться к производителям систем лубрикации с просьбой указывать в установках по монтажу и эксплуатации систем не Марк рекомендованного к применению смазочных материалов, а пределы физико-химических показателей таких смазочных материалов, их системы способны наносить на соответствующие поверхности трения.

Практическая значимость результатов работы. Промышленным предприятиям Украины предложено осуществить переход к энергоресурсоэффективному подходу на этапе принятия решения о применении смазочных материалов, разработан и внедрен метод экспресс отбора смазочных материалов.

Ключевые слова: *смазочный материал, энергоресурсоэффективность, отбор, метод, свойства.*

ABSTRACT

Purpose of work. Justification of the need for the transition of industrial enterprises of Ukraine to an energy-resource-efficient approach in the selection of lubricants according to the criterion "Price for a lubricant with appropriate physical and chemical properties" on the example of selection of a lubricant for a friction pair "flange (flange) of a wheel (wheel tire) – rail" and rail transport. Development of a method for express selection of lubricants and the basic principles of the procedure for their admission to use in production.

Research methods. Experiment, observations, measurements, experimental data processing, statistical and comparative analysis.

Research results. The necessity of selection of lubricants, at the stage of making a decision on their use, according to the criterion "Price for a lubricant with appropriate physical and chemical properties" is substantiated. An express selection method has been developed.

Scientific novelty. A new concept has been introduced into geotriboenergy - "the ability of a lubricant to increase the resistance of friction surfaces to the transition to catastrophic wear modes" and the accompanying indicator - "an indicator of degradation of the lubricant's ability to increase the resistance of friction surfaces to the transition to catastrophic wear modes".

Practical significance of work results. Industrial enterprises of Ukraine were offered to make a transition to an energy-resource-efficient approach at the stage of making a decision on the use of lubricants; a method of express selection of lubricants was developed and implemented.

Key words: *lubricant, energy efficiency, selection, method, properties.*

Рекомендовано до друку: д-р. техн. наук, професором Самусею В.І.

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ

О.М. Заславський¹, В.В. Ткачов², С.М. Проценко³, О.В.Карпенко⁴

¹ Національний ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
zaslavskyi.o.m@nmu.one, ORCID 0000-0001-7812-7229

² Національний ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
tkachev@nmu.one, ORCID 0000-0002-2079-4923

³ Національний ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
protsenko.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-2624-0187

⁴ Національний ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
karpenko.o.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-0115-5234

PRINCIPLES OF SOFTWARE CONSTRUCTION FOR NON-ELECTRIC ENERGY AND MATERIAL FLOWS MONITORING

A. Zaslavskyi¹, V. Tkachev², S. Protsenko³, O. Karpenko⁴

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
zaslavskyi.o.m@nmu.one, ORCID 0000-0001-7812-7229

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
tkachev@nmu.one, ORCID 0000-0002-2079-4923

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
protsenko.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-2624-0187

⁴ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
karpenko.o.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-0115-5234

В роботі розглянуто принципи побудови комп'ютерної системи моніторингу неелектричних енергетичних та матеріальних потоків на промислових підприємствах металургійної та хімічної галузей промисловості. Наведено дані про особливості програмного забезпечення та технічної реалізації системи моніторингу неелектричних енергетичних та матеріальних потоків. Метою роботи є побудова принципової основи таких програмних та технічних рішень, на які повинна спиратися уніфікована система цифрового моніторингу енергоносіїв, широкого спектру призначень для використання на розосереджених об'єктах зі складної топологією інформаційних мереж. За результатами аналітичних досліджень побудовано математичну модель обчислення витрат газів, пару та рідин у розосередженій інтелектуальній мережі, знайдено принципові схеми технічні та програмні рішення щодо побудови локальних цифрових обчислювачів та принципів їх взаємодії у розосередженій мережі з сервером системи моніторингу неелектричних матеріальних та енергетичних потоків. Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці нових алгоритмічних та структурних принципів побудови комп'ютерних мережевих систем моніторингу енергоносіїв. За результатами проведених досліджень розроблено сумісно з фахівцями міжгалузевої корпорації «Облік» конструкторську документацію та оригінальне програмне забезпечення програмно технічного комплексу, який втілено у промислову експлуатацію для диспетчерського контролю та технічного обліку енергоносіїв на Дніпровському коксохімічному заводі у місті Кам'янсько Дніпропетровської області.

Ключові слова: цифровий моніторинг, інтерфейс, мікроконтролер – вимірювач, концентратор, адресний простір, інтелектуальний лічильник, база даних.

Структурна схема програмного комплексу системи моніторингу неелектричних енергоносіїв наведена на рисунку 1. Адресний простір, який призначено для зберігання не опрацьованих даних про витрати енергоносіїв, якість вимірювання, мінімальних та максимальних значень вимірюваних параметрів, розбито на чотири частини для відображення його за допомогою протоколу MODBUS [1,2].

Старша чверть використовується для передачі службової інформації (читання поточного значення, запису/читання конфігурації). Решта – три чверті є областю для зберігання хвилинних значень витрат за три доби. Оскільки одна доба дорівнює 1440 хвилин, номер необхідної хвилини в добі є фактично адресом області пам'яті з урахуванням вказівки доби (сьогодні, вчора, позавчора).

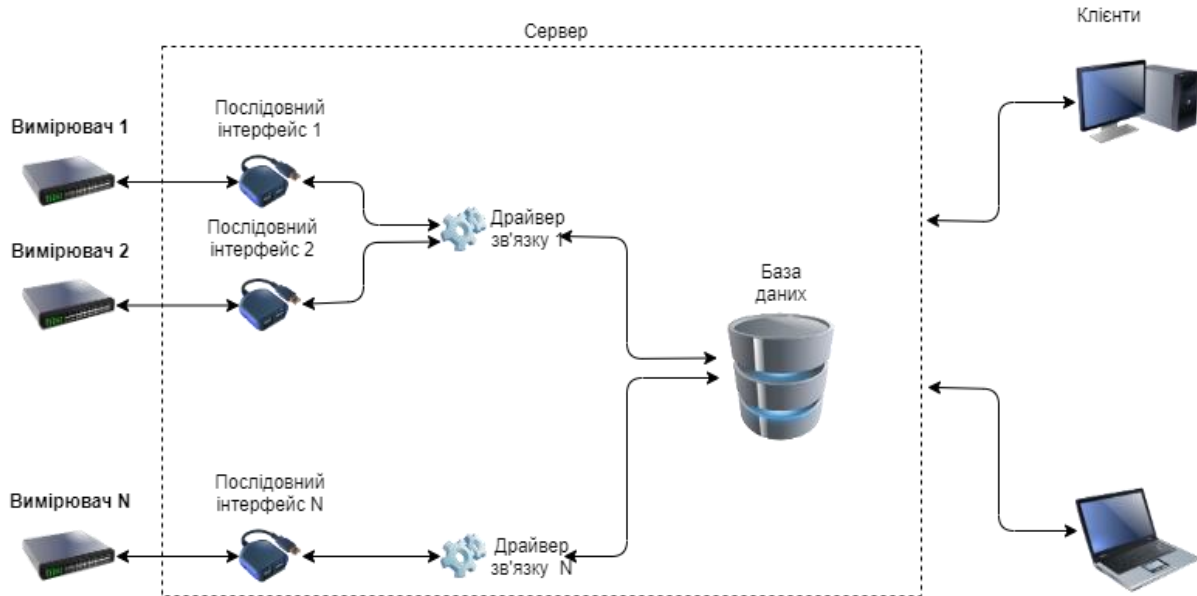


Рисунок 1 - Структурна схема програмного комплексу системи моніторингу неелектричних енергоносіїв

Система моніторингу має клієнт - серверну організацію. Вона включає програмне забезпечення сервера, клієнта, конфігуратора, програми моніторингу та базу даних, доступом до якої керує SQL - сервер InterBase [3].

Через послідовні інтерфейси відбувається опитування вимірювачів, які розосереджені у просторі контролюваного об'єкту. Для прискорення опитування вимірювачів передбачено можливість створювати необхідну кількість драйверів зв'язку для паралельного опитування об'єктів вимірювання, що істотно підвищує швидкість обміну інформацією.

Паралельність запису інформації з вимірювачів забезпечується можливістю буферизації інформації в концентраторах мікроконтролер вбудовано модуль RTS, що підтримує годинник реального часу і календар, який синхронізує паралельність запису з вимірювачів. До кожного концентратора по зовнішньому послідовному синхронному каналу може бути підключено до 8 вимірювачів. До інформаційної мережі концентратор підключено через асинхронний послідовний порт.

Концентратор кожну хвилину подає запит підключеним до нього вимірювачам. По цьому запиту вимірювачі по черзі передають йому мінімальне, максимальне та інтегральне (накоплене за хвилину) значення параметру, що вимірюється, а також запускають новий відлік параметру. Одержані значення концентратор відразу заносить по SPI інтерфейсу до зовнішньої флеш пам'яті. Адресний простір цієї пам'яті організовано таким чином, що молодші значення адреси кожної комірки це номер хвилини виміру від початку доби. З флеш - накопичувача концентратора сервер, що керує моніторингом, в будь-який момент може прочитати ці значення по мережі до якої підключений концентратор.

Інтелектуальний лічильник газу або рідини здійснює вимірювання швидкості v протікання вимірюваної речовини, наприклад за допомогою ультразвукового вимірювача. Обчислення об'ємної величини витрати енергоносія здійснюється інтегруванням (1).

$$W_q = \Delta t S \sum_{k=1}^{k=n} v(t_k), \quad (1)$$

де Δt - проміжок часу між суміжними відліками швидкості $v(t_k)$ протікання вимірюваної речовини, S - площа перерізу у отворі лічильника, де вимірюється витрата речовини.

Якщо здійснюється моніторинг газу, то одержане значення приводиться до нормальних умов (2).

$$W_{q0} = 2,696 W_q \frac{P}{T}, \quad (2)$$

де P (кПа)- абсолютний тиск газу, T (К) - температура газу.

Інформація про витрати енергоносіїв може передаватися імпульсами, кількість яких пропорційна витраті, що виміряна. Облік енергоносія в такому разі здійснює інтелектуальний пристрій - тарифікатор, який підсумовує імпульси на заданих інтервалах часу і обчислює витрату енергоносія W (3).

$$W = \frac{N}{C}, \quad (3)$$

де N – кількість врахованих імпульсів, C – константа, така, що вказує кількість імпульсів, які видаються датчиком при вимірі одиничної кількості енергоносія, наприклад, 200 імплітр або 1500 імпл/кВт*ч. Принцип формування телеметричних імпульсів зображено на рисунку 2.

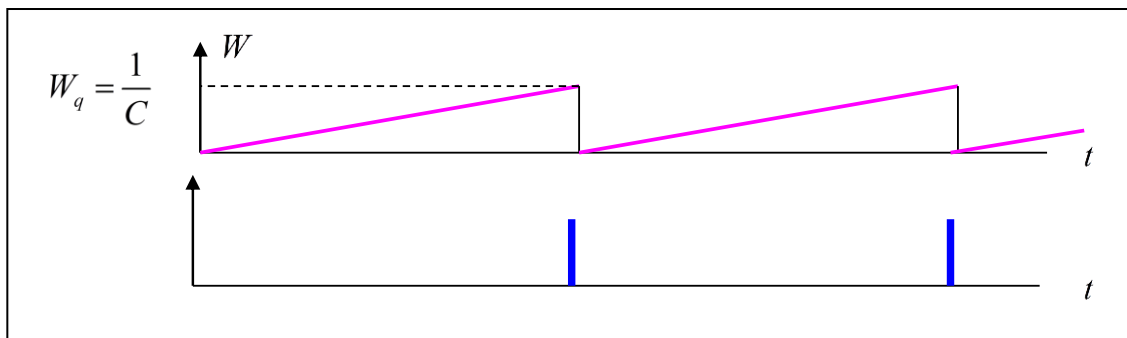


Рисунок 2 - Принцип формування телеметричних імпульсів

Тарифікатор одержує телеметричні імпульси від деякої кількості первинних датчиків і формує у енергонезалежній пам'яті структурований масив даних обліку з мітками якості та прив'язкою до астрономічного часу.

Параметричний моніторинг здійснюється в тих умовах, коли витрату енергоносія необхідно обчислювати за первинними даними, які одержуються за результатами вимірювань перепаду тиску на звужуючих пристроях (наприклад, діафрагмах), а також тиску та температури контрольованої речовини у напірному трубопроводі [4].

Об'ємна і масова витрата сухого газу (пара), приведена до нормальних умов (4, 5).

$$q_{ном} = 0,059736 \alpha \varepsilon K_t^2 d_{20}^2 Q^* \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho} \cdot \frac{P}{T}} \quad (m^3 / s), \quad (4)$$

$$m_{ном} = 0,059736 \alpha \varepsilon K_t^2 d_{20}^2 Q^* \sqrt{\Delta P \cdot \rho \cdot \frac{P}{T}} \quad (kg / s). \quad (5)$$

Об'ємна і масова витрата рідини:

$$q_0 = 01,1105 \cdot K_t^2 d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (m^3 / s), \quad (6)$$

$$m_0 = 1,1105 \cdot \alpha \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2 \sqrt{\Delta P \cdot \rho} \quad (kg / s) \quad (7)$$

У цих формулах P і ΔP вимірюється в Па, - T в градусах Кельвіна, щільність ρ у (m^3/c), внутрішній діаметр d отвору пристрою звуження - в м. Для отримання об'ємної витрати у $m^3/год.$ необхідно обчислену об'ємну витрату помножити на коефіцієнт 3600. Для отримання масової витрати в т / год необхідно обчислену масову витрату помножити на коефіцієнт 3,6. Коефіцієнти α та K_t є константами для даної точки обліку, які вводяться при параметризації, ε - коефіцієнт «розширення» для газу і пари відносна калорійність газу становить:

$$Q^* = \frac{Q}{Q_{ном}}. \quad (8)$$

Особливістю обліку газових енергоносіїв є необхідність контролювати три параметри по кожній точці обліку, це: падіння тиску на вимірювальній шайбі, тиск газу а також температури газу. Крім цього горючі гази можуть утворювати вибухонебезпечні суміші, тому вимір їх параметрів відбувається в два етапи. Спочатку, в іскробезпечній зоні тиск і температура перетворюється сильфонними перетворювачами в стандартні тиски з діапазоном значення 0-1 атм або 0.2-1 атм. Цей тиск пневмотрубами подається в пультів, які знаходяться за межами іскробезпечних зон, і там перетворювачами типу Сапфір перетворюються в стандартні струмові сигнали діапазону 0-5 та або 4-20 та. Зважаючи на те, що ці сигнали використовуються не тільки системою моніторингу, але ще й існуючими системами автоматичного регулювання технологічними процесами, додатково вимогою до системи моніторингу неелектричних носіїв є повна гальванічна розв'язка всіх каналів вимірювання між собою. Аналіз рішень щодо розв'язки безпосередньо аналогових електричних сигналів показав, що необхідна точність вимірювань досягається лише ціною невиправдано дорогих і примхливих в налаштуванні і експлуатації вузлів розв'язки. З огляду на це, нижній рівень системи вирішено було виконати у вигляді трьохканального аналого-цифрового вимірювача, з живленням кожного каналу від гальванічно незалежних перетворювачів. Точність вимірювання при цьому підходить забезпечується: застосуванням в кожному вимірювальному каналі мікроконтролера Nuvoton 76ne003 з 12- розрядним аналоговоцифровим перетворювачем, використанням струмовимірювальних резисторів з точністю 0,1%, застосування для живлення мікроконтролера прецизійного стабілізатора MC1700, а також інтегрального виміру параметрів на основі 120 вибірових відліків з періодом 0,5сек. На рисунку 3 наведено приклади звітів системи моніторингу енергетичних потоків, які формуються клієнтською та серверною програмами.

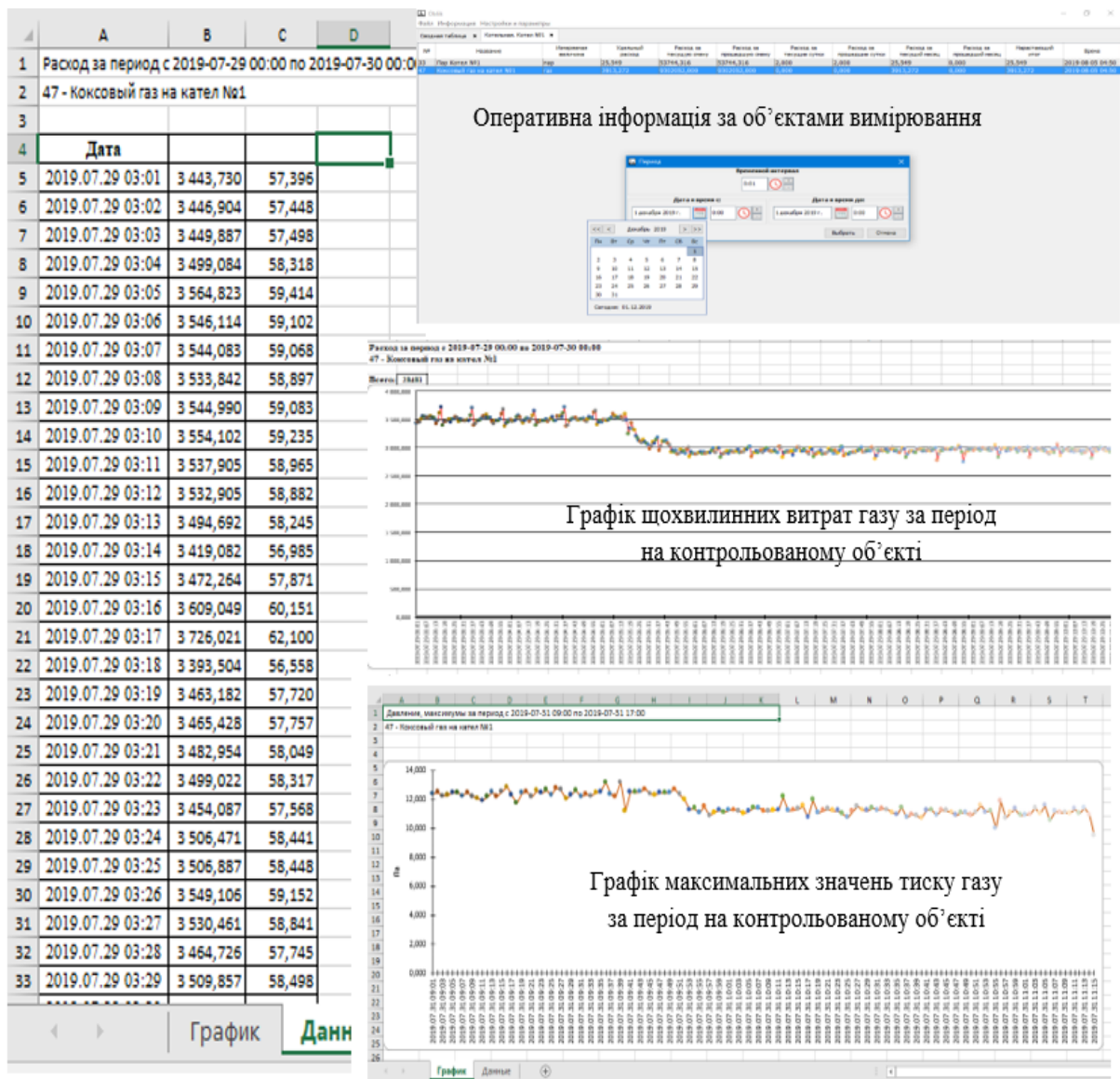


Рисунок 3 - Приклади звітів системи моніторингу енергетичних потоків

Після отримання інформації від вимірювачів, драйвер зв'язку обробляє попередні дані, і записує отриману і обчислену інформацію в базу даних, яка знаходиться на сервері. У базі даних зберігаються інтегральні значення витрат та контрольованих параметрів (результати усереднень 120 вибірових відліків протягом однієї хвилини), а також мінімуми та максимуми цих хвилинних витрат (максимальне і мінімальне значення за 120 відліків). У обчисленні витрат використовуються дані, що вносяться при конфігуруванні системи, дані, що отримано драйверами з периферії системи, та довідкові дані. Крім того необхідно використовувати дані, що отримані від лабораторії на поточний момент. Внесення цих даних у систему керується відповідним клієнтським програмним забезпеченням. Так само в базі зберігається наростаючий підсумок по кожному значенню яке вимірюється. Все це дозволяє надавати кінцевим користувача (клієнтам) різноманітні і точні звіти про спожиті обсяги різних неелектричних середовищ (газ, пар, вода, тощо). Приклади таких звітів наведено на рисунку 3. Точність вимірювання при цьому підходить забезпечується шляхом застосування в кожному вимірювальному каналі мікроконтролера Nuvoton 76ne003 з 12- розрядним аналоговоцифровим перетворювачем, використанням струмовимірювальних резисторів з точністю 0,1%, застосування для живлення мікроконтролера прецизійного стабілізатора MC1700, а також інтегрального виміру параметрів на основі 120 вибірових відліків з періодом 0,5сек. На рис. 2 наведено приклади звітів системи моніторингу енергетичних потоків, які формуються клієнтською та серверною програмами. Така структура програмного забезпечення системи найбільше відповідає принципу програмування на базі об'єктно орієнтованої мови Java.

Висновки

1. Розроблено принципи побудови програмних засобів моніторингу, що забезпечують збір поточних та накопичення інтегральних показників неелектричних енергетичних та матеріальних потоків підприємства, яке може бути розосереджене на значній території.
2. Створено надійне, достовірне та економічно доцільне джерело первинної інформації, яке забезпечує можливості в плановому та поточному режимі вирішувати задачі обчислення енергетичних балансів у будь-якій деталізації, розраховувати оптимальну структуру виробництва, закупівель та споживання палива та енергії, оцінювати реальні їх втрати, планувати заходи щодо підвищення енергоефективності та енергозбереження.
3. Цільовими споживачами пропонованої інноваційної розробки технологій цифрового моніторингу енергетичних потоків являються підприємства, що генерують теплову та електричну енергію, а також металургійні, гірничодобувні, хімічні та машинобудівні підприємства, які споживають та виробляють різноманітні енергоносії.
4. Досягнуто зниження питомої вартості апаратно – програмного комплексу на точку обліку в 1,5 – 2 рази з урахуванням кон'юнктури ринку систем аналогічного призначення.
5. Наступні дослідження фокусуються у напрямку створення алгоритмічної та програмної бази побудови експертної системи моніторингу енергетичних потоків з урахуванням взаємних кореляцій усіх енергоносіїв.

Перелік посилань

1. Modbus UDP Specification. Java Modbus Library (електронний ресурс)
2. Charles Palmer, Sujeet Shenoi (ed) Critical Infrastructure Protection III: Third IFIP WG 11. 10 International Conference, Hanover, New Hampshire, USA, March 23–25, 2009, Revised Selected Papers Springer, 2009 ISBN 3-642-04797-1, page 87
3. Interbase.com/products/interbase (електронний ресурс)
4. ГОСТ 8.586.1-2005 (ИСО 5167-1:2003), Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств
5. Заславський О.М., Кухарчук В.В. (2008). *Вимірювання електричної енергії методом безпосереднього інтегрування та подвійного сканування миттєвих значень струму та напруги*. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №1 (15). – С.191 – 196.

6. Кухарчук В.В., Заславський О.М. (2012). *Комп'ютеризована система обліку електричної енергії*. Вінниця, ВНТУ. – 152 с.
7. Заславський О.М., Соснін К.В., Зибалов Д.С., Славінський Д.В., Воскобойник Є.К. (2019). *Теоретичні основи комп'ютерних систем збирання, перетворення та передачі інформації: підруч.* М-во освіти та науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», – 292 с.

Аннотація.

В работе рассмотрены принципы построения компьютерной системы мониторинга неэлектрических энергетических и материальных потоков на промышленных предприятиях металлургической и химической отраслей промышленности. Приведены данные об особенностях программного обеспечения и технической реализации системы мониторинга неэлектрических энергетических и материальных потоков. Целью работы является построение принципиальной основы таких программных и технических решений, на которые должна опираться унифицированная система цифрового мониторинга энергоносителей, широкого спектра назначений для использования на рассредоточенных объектах из сложной топологией информационных сетей. По результатам аналитических исследований построена математическая модель расчета расходов газов, паров и жидкостей в рассредоточенной интеллектуальной сети, найдено принципиальные схемы технические и программные решения по построению локальных цифровых вычислителей и принципов их взаимодействия в рассредоточенной сети с сервером системы мониторинга неэлектрических материальных и энергетических потоков. Научная новизна исследования заключается в разработке новых алгоритмических и структурных принципов построения компьютерных сетевых систем мониторинга энергоносителей. По результатам проведенных исследований разработаны совместно со специалистами межотраслевой корпорации «Учет» конструкторскую документацию и оригинальное программное обеспечение программно-технического комплекса, который воплощен в промышленную эксплуатацию для диспетчерского контроля и технического учета энергоносителей на Днепровском коксохимическом заводе в городе Каменка Днепропетровской области.

Ключевые слова: цифровой мониторинг, интерфейс, микроконтроллер - измеритель, концентратор, адресное пространство, интеллектуальный счетчик, база данных.

Abstract

The principles of construction of a computer system for monitoring non-electric energy and material flows at industrial enterprises of the metallurgical and chemical industries are considered in the work. Data on the features of software and technical implementation of the monitoring system of non-electric energy and material flows are given. The aim of the work is to build a fundamental basis for such software and technical solutions, which should be based on a unified system of digital energy monitoring, a wide range of applications for use in scattered facilities with a complex topology of information networks. Based on the results of analytical research, a mathematical model for calculating the consumption of gases, vapors and liquids in a dispersed intelligent network, found basic schemes, technical and software solutions for building local digital computers and the principles of their interaction in a dispersed network with the server monitoring non-electric material and energy flows. The scientific novelty of the obtained results lies in the development of new algorithmic and structural principles of construction of computer network systems for energy monitoring. According to the results of the research, the design documentation and original software of the software and technical complex, which is implemented in industrial operation for dispatch control and technical accounting of energy at the Dnieper Coke Plant in Kamyanske, Dnipropetrovsk region, were developed jointly with the specialists of the inter-branch corporation "Accounting".

Keywords: digital monitoring, interface, microcontroller - meter, concentrator, address space, smart meter, database.

Рекомендовано до друку: д-р. техн. наук, професором Слесаревим В.В.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПОКАЗНИКИ РЕКУПЕРУЮЧИХ ТРАМВАЇВ

М. О. Костін¹, О. Г. Шейкіна²

¹ Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна, nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

² Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна, sheikina.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-5367-2674

ENERGY CHARACTERISTICS AND INDICATORS OF RECUPERATIVE TRAMS

M. O. Kostin¹, O. Hr. Sheikina²,

¹ Dniprovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, nkostin@ukr.net, ORCID ORG/0000-0002-0856-6397

² Dniprovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, sheikina.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-5367-2674

Мета роботи. Розробка нового імовірнісного методу оцінки та чисельний аналіз потужностей і енергетичних показників рекуперуючих трамваїв. **Методики досліджень.** Використано методи теорії електричної тяги, електричних кіл несинусоїдного струму і теорії випадкових процесів. **Результати досліджень.** Отримано аналітичні вирази і виконано імовірнісно-статистичні розрахунки потужностей і енергетичних показників трамваїв типу Т3Д і Т4д з урахуванням стохастичного характеру зміни рекуперованих напруг і струмів. Показано, що різкозмінний характер рекуперованих напруги і струму обумовлює таку ж динаміку зміни потужностей і енергетичних показників. При цьому в багатьох фазах рекуперативного гальмування коефіцієнт потужності менше 0,92-0,95, а коефіцієнт реактивної потужності більше 0,25. Статистичний розподіл величин потужностей різний: реактивна потужність, на відміну від активної і повної, підкоряється закону Гаусса. Розподіл коефіцієнта потужності «лінійно-зворотний» закону розподілу реактивної потужності, а коефіцієнта реактивної потужності – близьке до нормального закону. **Наукова новизна досліджень.** Розроблено новий кореляційно-дисперсійний метод визначення енергетичних показників трамваїв, заснований на дисперсійній теорії випадкових процесів. Встановлено й обґрунтовано закономірності впливу стохастичного характеру генерованих напруги і струму на коефіцієнт потужності і коефіцієнт реактивної потужності. Запропоновано вважати, що коефіцієнт потужності не завжди є досить очевидним енергетичним показником і в режимах рекуперації. **Практична значимість.** Отримані в роботі аналітичні співвідношення потужностей і коефіцієнтів потужностей дають можливість скласти більш повний і більш точний енергобаланс в системі міського трамвайного руху. Часові графічні залежності і гістограми величин потужностей, а також коефіцієнтів потужностей дають можливість прогнозувати параметри ефективних режимів рекуперації і для інших типів трамваїв, в інших містах України.

Ключові слова: трамвай, дисперсійний метод, рекуперація, напруга, енергетичні показники, струм, випадковий процес, потужності, ймовірність.

Вступ

Системи електричного транспорту, магістральний залізничний, приміський та міський, являються найбільш енергоємними галузями України: споживання ними електроенергії складає біля 5,5 – 6,0% від загального її споживання [1]. Тому аналіз і розробка різних способів економії електроенергії в зазначених системах – задача надзвичайно актуальна [2]. Розв'язуючи цю задачу, треба враховувати, що одним із найважливіших найпотужніших джерел економії електроспоживання в системах електротранспорту є процес рекуперації електроенергії її електрорухомим складом (ЕРС). Особливо це стосується систем міського транспорту, зокрема трамваїв. Це обумовлено тим, що вони являються найбільш динамічним, з різко змінним навантаженням, видом ЕРС, оскільки перед зупинками і на спусках ними майже обов'язково застосовується рекуперативне гальмування (РГ). Ця фаза руху трамваю є найбільш частою. Вона складає від 37 до 62% часу від загальної тривалості активної роботи трамваю й тим самим дозволяє отримувати від 33 до 54% електроенергії рекуперації відносно фази тяги. При цьому зазначимо, що електроенергетична ефективність трамваїв не повинна оцінюватись тільки за об'ємом і станом використання ними рекуперованої електроенергії, але й за такими їх енергетичними характеристиками як активна P , реактивна Q і повна S потужності, а також за енергетичними показниками: коефіцієнтом потужності λ і коефіцієнтом реактивної потужності $tg\phi$. Однак, на сьогодні ці показники залишаються майже не

вивченими. За нашою думкою, це пов'язано з хибною думкою про те, що, оскільки тягові електродвигуни трамваїв є машинами постійного струму, то і генеровані ними в режимах РГ напруга і струм являються теж постійними, а отже реактивна і повна потужності в системі відсутні і тому поняття коефіцієнтів λ і $\cos \varphi$ не застосовні. Насправді ж рекуперовані і напруга $U(t)$, і струм $I(t)$ являються змінними, навіть різкозмінними, для трамваїв, які в умовах міського руху повинні здійснювати розгони, прискорення і гальмування на коротких ділянках між зупинками. Більш того, генеровані напруга і струм мають випадковий (стохастичний) характер (рис. 1 і [3]), обумовлений технологічними імовірнісними факторами: масою і швидкістю руху вагонів; профілем залізничної колії; режимом ведення трамваю (кваліфікацією водія) тощо. Врахування стохастичного характеру напруг і струмів тим більше потрібно при аналізі електроенергетичної ефективності роботи трамваїв, оскільки в системах електротранспорту України контролюється не лише загальне споживання електроенергії (зі зростанням її тарифу), але і зміни споживання реактивної енергії. До речі, спостерігається щорічне її зростання на 10–17% при одночасному теж щорічному зростанні її тарифу на 12–21%.

Тому проблема електрозбереження, яка безпосередньо пов'язана з оцінкою якості і балансу електроенергії у міському електричному транспорті, невід'ємна від аналізу зазначених енергетичних показників і характеристик системи руху трамваїв в режимах рекуперації. Такий аналіз дозволить у подальшому розробити засоби підвищення електроенергетичної ефективності міського електричного транспорту, що відповідає державній програмі [2].

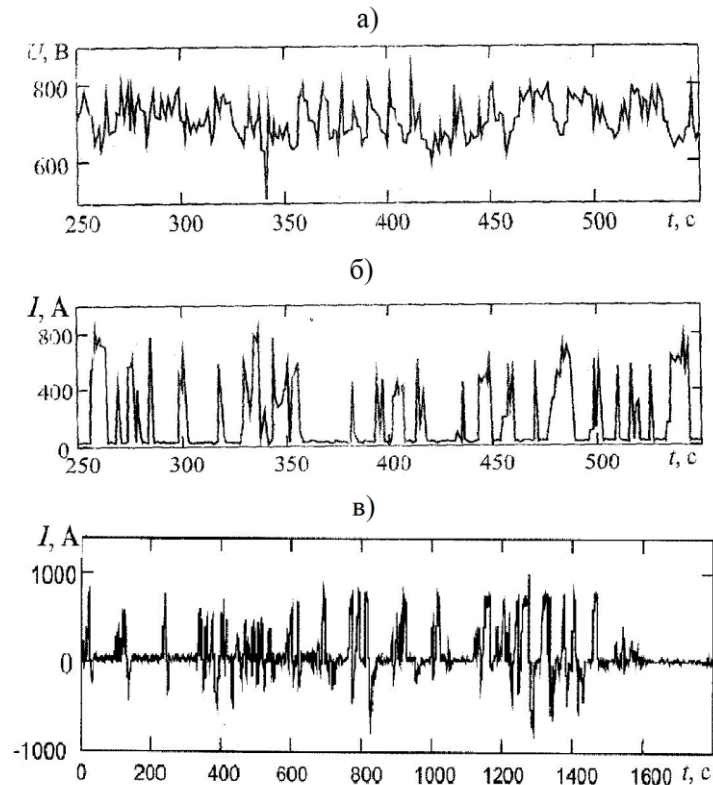


Рисунок 1 – Реєстрограми: напруга на струмоприймачі трамваю (а); тяговий струм (б); тягово-рекуперативний струм (в) [11]

Огляд останніх публікацій за темою статті

В останні 10–15 років суттєво збільшилась кількість наукових публікацій з аналізу існуючого стану власне процесу РГ та розробки різних способів отримання, аналізу якості та більш корисного використання енергії рекуперації трамваїв. Особливо це спостерігається в країнах Європи (нажаль, окрім України), що обумовлено необхідністю підвищення енергоефективності систем міського електротранспорту шляхом розробки бортових систем накопичення, аналізу характеристик і використання енергії рекуперації.

Найбільш ґрунтовні дослідження з розглядуваної проблеми виконано в Німеччині [4–6] і в Швейцарії [7]. Зокрема, фірмою *Bombardier* докладно проаналізована робота системи рекуперації, що розташована на дахах 19 трамваїв міста Гельдерберга. Система накопичує до 3 кВт·год, які використовуються при пуску трамваїв. Ця ж фірма на основі швидкісного трамваю і в дослідницькому центрі міста Мангейм виконала роботи по порівняльному аналізу передачі та якості енергії рекуперації. Цю ж технологію пізніше використано в канадському місті Монреаль.

В проаналізованих вище (так і в інших) публікаціях задача визначення потужностей та енергетичних коефіцієнтів розв'язується лише для детермінованих напруг і струмів рекуперації. У певній мірі цей недолік виправлено в роботі [8], в якій приведено по одній реалізації випадкових процесів напруги і струму рекуперації і розраховано величину миттєвої потужності. Однак в цій роботі, по-перше, оцінка енергоспоживання виконана для трамваїв з асинхронним приводом (в Україні маємо привод постійного струму). По-друге, не визначались складові повної потужності та енергетичні коефіцієнти.

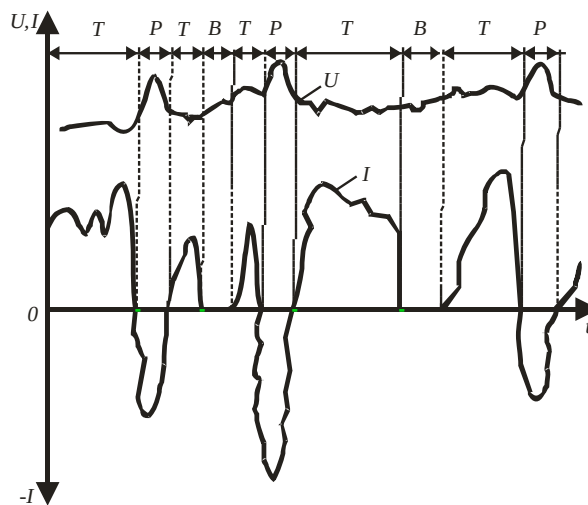
За нашою думкою, найбільш докладно розглядувана в цій роботі задача досліджена в [9-11]. Однак, по-перше, запропоновані в [9,10] методи застосовні лише для режимів електричної тяги електровозів та електропоїздів. По-друге, випадкові процеси напруги і струму розглядаються в них класично, тобто як сукупність реалізацій $U(t)$, $I(t)$ за "n" поїздок, здійснених в однакових умовах. Однак таке припущення не може бути виконане для ділянок-струмів у фазах рекуперації трамваїв. Робота [11] присвячена аналізу лише режимів тяги трамваїв і, по-друге, отримані в ній вирази для потужностей базуються на теорії випадкових величин, в той час як рекуперовані напруга і струм являються стохастичними процесами.

Мета роботи

Розробка нового методу оцінки та імовірнісно-статистичний аналіз енергетичних характеристик і показників трамваїв в режимах їх рекуперації з урахуванням стохастичного характеру зміни рекуперованих напруг і струмів.

Методики експериментальних досліджень

Імовірнісно-статистичні розрахунки реактивної потужності та енергетичних показників виконували на основі реєстрограм (часових залежностей) напруги на струмоприймачі і рекуперованого струму, які отримували в реальних умовах експлуатації трамваїв типу ТЗД і Т4Д на маршрутах №11 і №17 міста Дніпро [11]. На кожному маршруті було синхронно зареєстровано по 30 реалізацій напруги і струму. При цьому (рис. 2) реєстрували напругу і повний, тобто тягово-рекуперативний, струм з наступним виділенням фаз руху трамваю: тяга, вибіг, рекуперація.



**Рисунок 2 – Якісний вигляд реєстрограм напруги $U(t)$ на струмоприймачі трамваю та його тягово-рекуперативного струму $I(t)$ з виділенням фаз руху трамваю:
Т – тяга; Р – рекуперація; В – вибіг**

Теоретичні передумови методу

Відома неоднозначність понять і формул знаходження складових повної потужності в електричних колах з несинусоїдною напругою та струмом [12,13]. Однак всі дослідники мають єдину думку, що з точки зору проблеми визначення енергоефективності, як в усталених, так і перехідних режимах роботи системи, найбільш правильною та ефективною є концепція С. Фризе [14], згідно з якою, зокрема, реактивна потужність визначається як невязка між повною S та активною P потужностями:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1)$$

Стохастичний характер генерованих $U(t)$, $I(t)$ не дозволяє використовувати відомі в теоретичній електротехніці класичні вирази для визначення потужностей, необхідна розробка нового методу.

Уявимо собі синхронно зареєстровані за термін часу T_p фази електричного гальмування (термін часу рекуперації) ділянки часових залежностей напруги $U(t)$ на струмоприймачі ЕРС та струму рекуперації $I(t)$ (рис. 1 і 2). Запишемо вирази функцій дисперсій цих випадкових процесів, відповідно $D_U(t)$ та $D_I(t)$.

Згідно теорії випадкових процесів [15], функція дисперсії довільної випадкової функції $X(t)$ визначається як математичне очікування квадрату центрованої розглядуваної функції $\overset{\circ}{X}(t)$

$$D_X(t) = M \left[\overset{\circ}{X}(t) \right]^2 = M [X(t) - m_X(t)]^2. \quad (2)$$

Оскільки терміни часу T_p ділянок-фаз короткі, тоді можна прийняти, що математичне очікування напруги $m_U(t) = \text{const} = m_U$ і струму $m_I(t) = \text{const} = m_I$. Тоді, з урахуванням (2) дисперсію процесу напруги можна записати як:

$$D_U(t) = M [U(t) - m_U]^2. \quad (3)$$

Тобто, функція дисперсії напруги може бути записана як середнє арифметичне значення квадратів відхилення процесу $U(t)$ від свого математичного очікування:

$$\begin{aligned} D_U(t) &= \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} [U(t) - m_U]^2 dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U^2(t) dt - \\ &- \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} 2U(t) \cdot m_U dt + \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} m_U^2 dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Як відомо [15], для стаціонарних випадкових процесів незміщеною оцінкою математичного очікування є середнє арифметичне його значення за певний проміжок часу. Тоді за термін часу T_p фази рекуперації математичне очікування напруги прийме вираз:

$$M[U(t)] = m_U = \lim_{T_p \rightarrow 0} \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t) dt. \quad (5)$$

Використовуючи відоме поняття діючого значення напруги і зміст виразу (5), а також проінтегрувавши складові виразу (4), отримаємо результуючу формулу дисперсії напруги:

$$D_U = U_d^2 - m_U^2, \quad (6)$$

де U_d – діюче значення стохастичного процесу напруги на струмоприймачі в фазі рекуперації.

За аналогією, дисперсія стохастичного процесу струму рекуперації прийме вигляд:

$$D_I = I_d^2 - m_I^2, \quad (7)$$

де I_d – діюче значення струму рекуперації в фазі гальмування.

Із (6) і (7) випливає, що діючі значення напруги і струму запишуться як:

$$U_d = \sqrt{m_U^2 + D_U}, \quad (8)$$

$$I_d = \sqrt{m_I^2 + D_I}. \quad (9)$$

Тоді повна потужність, що рекуперується за термін часу T_p фази електричного гальмування, визначається за відомою формулою

$$\begin{aligned} S &= U_d I_d = \sqrt{(m_U^2 + D_U)(m_I^2 + D_I)} = \\ &= \sqrt{m_U^2 m_I^2 + m_U^2 D_I + m_I^2 D_U + D_U D_I}. \end{aligned} \quad (10)$$

Згідно [15], уведемо поняття взаємної дисперсії напруги і струму D_{UI} як математичне очікування добутку центрованих функцій $U(t)$ і $I(t)$ і тоді з урахуванням (5) маємо:

$$\begin{aligned} D_{UI}(t) &= M \left[\overset{0}{U}(t) \overset{0}{I}(t) \right] = M [(U(t) - m_U)(I(t) - m_I)] = \\ &= \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} [U(t) - m_U][I(t) - m_I] dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t)I(t) dt - \\ &- \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t)m_I dt - \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} I(t)m_U dt + \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} m_U m_I dt. \end{aligned} \quad (11)$$

Перший доданок у правій частині (11) являє собою активну потужність P , що рекуперується за термін часу T_p в кожній фазі електричного гальмування, а наступні два:

$$\frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t)m_I dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} I(t)m_U dt = m_U m_I. \quad (12)$$

Четвертий доданок (після інтегрування) теж прийме вираз “ $+m_U m_I$ ” з урахуванням зазначеного виразу (11) для взаємної дисперсії прийме вигляд:

$$D_{UI} = P - m_U m_I, \quad (13)$$

звідки активна потужність рекуперації:

$$P = D_{UI} + m_U m_I, \quad (14)$$

а реактивна потужність Фризе, згідно виразу (1), прийме вигляд:

$$Q_F = \sqrt{[(D_U + m_U^2)(D_I + m_I^2)] - [m_U m_I + D_{UI}]^2}. \quad (15)$$

Енергетичні показники досліджуваного типу ЕРС в фазі рекуперації оцінюються через знайдені потужності, а саме:

– коефіцієнт потужності

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{D_{UI} + m_U m_I}{\sqrt{m_U^2 m_I^2 + m_U^2 D_I + m_I^2 D_U + D_U D_I}}; \quad (16)$$

– коефіцієнт реактивної потужності:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_F}{P} = \frac{Q_F}{D_{UI} + m_U m_I}. \quad (17)$$

Отримувані за вищезазначеними формулами величини P , Q_F , S , λ , $\text{tg } \varphi$ в фазах електричного гальмування трамваю являються випадковими величинами, що обумовлює необхідність їх подальшого імовірнісного аналізу.

Результати та аналіз чисельних розрахунків

Із отриманих експериментальних даних генерованих напруги і струму, а також результатів чисельних розрахунків потужностей та енергетичних коефіцієнтів випливає таке.

Різкі випадкові зміни напруги в межах 600...900 В (при математичному очікуванні 720 В) та струму в інтервалі 100...350 А, при математичному очікуванні 183,4 А, (наприклад, рис. 1) призводять до того, що, часові залежності потужностей трамваїв являються також різкозмінними неперервними випадковими процесами (рис. 3). При цьому, зокрема, реактивна потужність Фризе Q_F змінюється в межах 10...100 квар за одну поїздку по певному маршруту, при математичному очікуванні, рівному 37,0 квар. Статистичні розподілення величин потужностей різні в залежності від маршрутів. Зокрема, на маршруті 17 реактивна потужність підкоряється закону Гаусса з коефіцієнтом асиметрії 0,72 і ексцесом 0,54 (рис. 4, а), а на маршруті 11 – величина Q_F описується асиметричним нормальним законом. В той же час, в режимах маршруту 17 і активна (рис. 4,б), і повна (рис 4,в) потужності не підкоряються закону Гаусса.

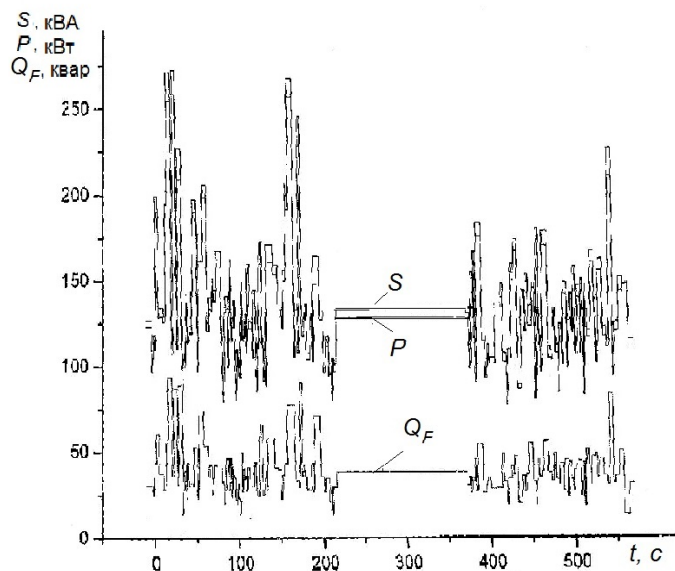
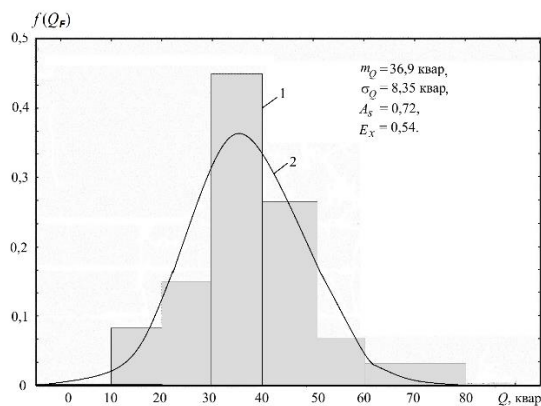
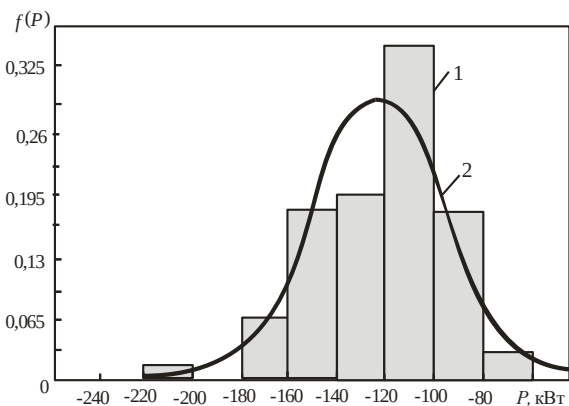


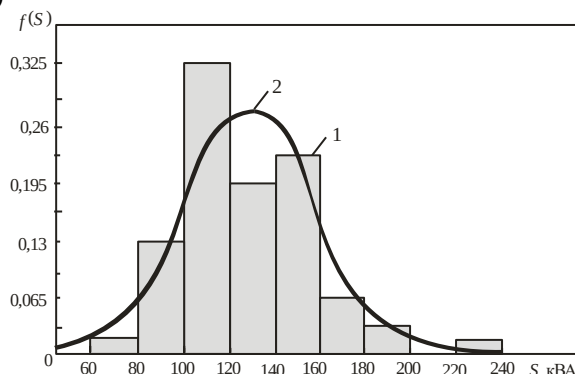
Рисунок 3 – Часові залежності реактивної Фризе Q_F , активної P та повної S потужностей трамваю Т4D



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Реактивна (а), активна (б) і повна (в) потужності трамваю Т4D в режимі рекуперації при рухові по маршруту № 17: статистичні (1) і теоретичні (2) розподілення

Різкозмінний характер поведінки часових залежностей потужностей (рис. 3) обумовлює таку ж динаміку зміни коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\varphi$ в режимі рекуперації (рис. 5). Характерною особливістю цих графіків є те, що і λ , і $\text{tg}\varphi$ мають різні значення в різні фази рекуперативного гальмування і при цьому нерідко коефіцієнт потужності λ менше нормативної величини 0,92...0,95, а коефіцієнт реактивної потужності більше нормативного значення 0,25.

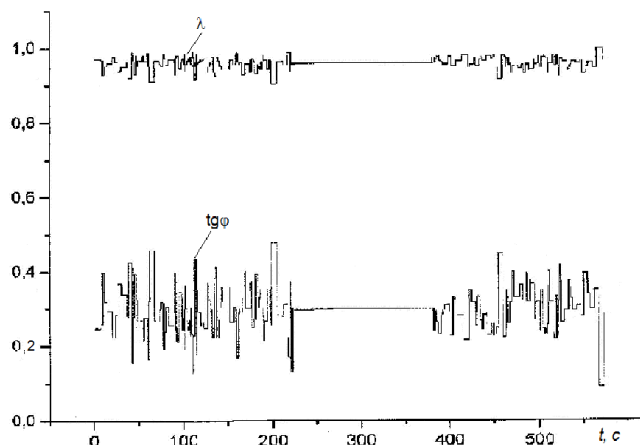


Рисунок 5 – Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\varphi$ трамваю ТЗД у режимі рекуперації

За аналогією з потужностями, величини λ і $\text{tg}\varphi$ являються випадковими процесами. Імовірнісний закон розподілення коефіцієнта λ (рис. 6, а) є “лінійно оберненим” закону розподілення реактивної потужності Q_F . Статистичне розподілення коефіцієнта $\text{tg}\varphi$ (рис. 6, б) близьке до закону Гаусса з $A_s = 0,053$ і $E_s = 0,154$. При цьому розкиди величин значні: λ – від 0,9 до 0,99 при $m_\lambda = 0,96$ і $\text{tg}\varphi$ – від 0,05 до 0,5 при $m_{\text{tg}\varphi} = 0,29$.

Аналізуючи ці розкиди, слід зауважити таке: дійсно коефіцієнт потужності λ не завжди є достатньо очевидним енергетичним показником в електричних колах несинусоїдного струму. Тому в останні 10...15 років в системах електротранспорту в якості звітної величини, наряду з λ , використовують, як вважається, більш точний енергетичний показник, яким є $\text{tg}\varphi$. Це проглядається і в нашій задачі: згідно рис. 6, а, найбільш імовірнісні значення коефіцієнта λ зміщені до інтервалу 0,94...0,99, в якому задовольняється вимога якості рекупераційної електроенергії трамваю. В той же час, найбільш імовірнісні значення $\text{tg}\varphi$ зосереджені в межах 0,25...0,4 (рис. 6, б), тобто в межах недоброякісності енергії рекуперації.

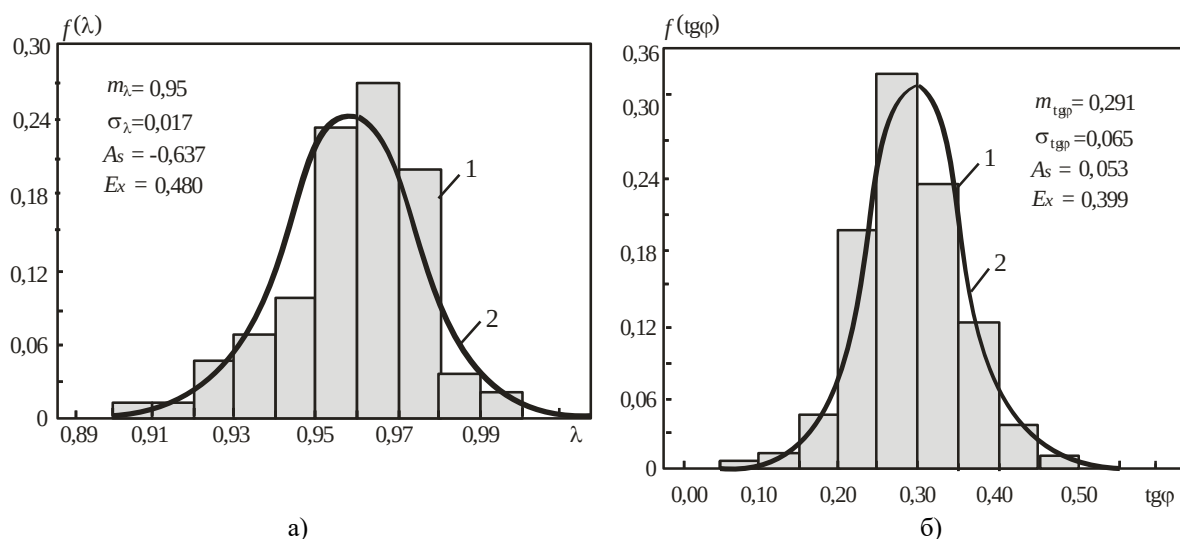


Рисунок 6 – Статистичні (1) і теоретичні (2) розподілення коефіцієнта λ (а) і коефіцієнта $\text{tg}\varphi$ (б) трамваю Т4Д у режимі рекуперації

Зазначена вище наявність реактивної потужності обумовлює достатньо великі значення (до 20%) додаткових втрат електроенергії рекуперації в системі руху трамваїв.

Висновки

1. Стохастичний характер рекуперованих напруги і струму обумовлює наявність в системах руху трамваїв активної, реактивної і повної потужностей та енергетичних показників, що являють собою стаціонарні неергодичні випадкові процеси і, статистичні розподілення яких залежать від типу трамваю та маршруту його руху і у більшості фаз рекуперації підкоряються закону Гаусса або асиметричному нормальному закону з дисперсійною функцією.

2. Імовірнісні розкиди реактивної потужності у фазах рекуперативного гальмування достатньо великі, в межах 10...100 квар, в результаті чого коефіцієнт реактивної потужності системи руху трамваїв суттєво перевищує допустиме значення 0,25, а повні технологічні втрати енергії рекуперації складають до 33% від її сумарної величини.

3. Суттєве покращення електроенергетичної ефективності системи руху трамваїв в режимах їх рекуперації можливе шляхом розробки на базі суперконденсаторів і встроювання в трамваї бортових систем компенсації реактивної потужності або систем регенерації рекуперованої електроенергії.

4. Результати проведених досліджень являються основою для адаптації і застосування дисперсійного методу оцінки потужностей та енергетичних показників для усіх систем електричного транспорту постійного струму.

Перелік посилань

1. Малышко И. В. Основные направления энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины/ И. В. Малышко // *Залізничний транспорт України*. – 2007. - № 1. – С. 12-14.
2. Транспортна стратегія України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010 р. № 2818-VI.
3. Kostin M., Nikitenko A. Statistics and Probality Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode// *Przegląd Electrotechniczny*. Warsaw, Poland. – 2013. No 2a. – p. 273-275.
4. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb // *Elek. Bahnen*. – 2010. No 1-2 (108). – p. 93-94.
5. Klohr M. Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojek / M. Klohr, A. Maroschik // *Elek. Bahnen*. – 2012. No 8-9 (110). – p. 444-451.
6. Bombardier extends catenary-free technology // *Int. Railway J.* – 2011. No 5 (51). – p. 28.
7. Tango fur Gent mit Energiespeicher // *Elek. Bahnen*. – 2012. No 8-9 (110). – p. 508.
8. Czuchra W. Ocena energochłonności tramwajów y napędem asynchronicznym / W. Czuchra, J. Prusak, W. Zając // 7th International Conference “Modern Electric Transport in Integrated XXIst Century Europe”, Poland, Warsaw. – 2005. – p. 160-164.
9. Костін М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними процесами / М. О. Костін // *Технічна електродинаміка*. Темат. випуск. ПСЕ. Частина 6. – 2006. – С. 3-8.
10. Костін М. О., Петров А. В. Методи визначення складових повної потужності в системах електричної тяги // *Технічна електродинаміка*. – 2011. Вип. 4.3. – С. 53-59.
11. Костин Н. А., Саблин О. И., Шейкина О. Г., Никитенко А. В. Коэффициенты мощности и реактивной мощности трамваев // *Гірничя електромеханіка та автоматика*. - 2013. Вип.91.- С.124-131.
12. Тонкаль В. Е. и др. Баланс энергий в электрических цепях. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
13. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах электроники / И. Ф. Доминин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крилов и др.// *Технічна електродинаміка*. Тем. Вип. – 2004. – ч.1. – С.80-91.
14. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfaf von strom und spannung/ S. Fryze // *ETZ*, Germany, 1932, No 25, pp. 596-599; No 26, pp. 625-627; No 29, pp. 700-702.
15. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1962. – 659 с.

АННОТАЦИЯ

Цель работы. Разработка нового вероятностного метода оценки и численный анализ мощностей и энергетических показателей рекуперирующих трамваев. **Методики исследований.** Используются методы теории электрической тяги, электрических цепей несинусоидального тока и теории случайных процессов. **Результаты исследований.** Получены аналитические выражения и выполнены вероятностно-статистические расчеты мощностей и энергетических показателей трамваев типа T3D и T4D с учетом стохастического характера изменения рекуперованных напряжений и токов. Показано, что резко переменный характер рекуперованных напряжения и тока обуславливает такую же динамику изменения мощностей и энергетических показателей. При этом во многих фазах рекуперативного торможения коэффициент мощности менее 0,92-0,95, а коэффициент реактивной мощности более 0,25. Статистическое распределение величин мощностей различное: реактивная мощность, в отличии от активной и полной, подчиняется закону Гаусса. Распределение коэффициента мощности «линейно-обратное» закону распределения

реактивной мощности, а коэффициента реактивной мощности – близкое к нормальному закону. **Научная новизна исследований.** Разработан новый корреляционно-дисперсионный метод определения энергетических показателей трамваев, основанный на дисперсионной теории случайных процессов. Установлены и обоснованы закономерности влияния стохастического характера генерированных напряжения и тока на коэффициент мощности и коэффициент реактивной мощности. Предложено считать, что коэффициент мощности не всегда является достаточно очевидным энергетическим показателем и в режимах рекуперации. **Практическая значимость.** Полученные в работе аналитические соотношения мощностей и коэффициентов мощностей дают возможность составить более полный и более точный энергобаланс в системе городского трамвайного движения. Временные графические зависимости и гистограммы величин мощностей и коэффициентов мощностей дают возможность прогнозировать параметры эффективных режимов рекуперации и для других типов трамваев, в других городах Украины.

Ключевые слова: трамвай, дисперсионный метод, рекуперация, напряжение, энергетические показатели, ток, случайный процесс, мощности, вероятность.

ABSTRACT

Purpose of work. Development of a new probability assessment method and numerical analysis of power and energy indicators of recuperative trams. **Methods of the research.** The methods of the theory of electric traction, electric circuits with non-sinusoidal current and the theory of stochastic processes have been used. **Results of the research.** Analytical expressions have been obtained and probability and statistical calculations of power and energy indicators for trams of T3D and T4D type, taking into account stochastic nature of the change in the recovered voltages and currents, have been performed. It has been shown that sharply variable nature of recovered voltage and current determines the same dynamics of changes in power and energy indicators. Moreover, in many phases of regenerative braking, power factor is less than 0.92-0.95 and the reactive power factor is more than 0.25. Statistical distribution of power values is different: reactive power, in contrast to active and full power is subject to the Gauss's law. The distribution of power factor is "linear-inverse" to the law of distribution of reactive power but reactive power factor is close to a normal law. **Scientific novelty of the research.** A new correlation and dispersion method for determining energy indicators of trams based on the dispersion theory of stochastic processes has been developed. The regularities of the influence of stochastic nature of generated voltage and current on the power factor and reactive power factor have been established and grounded. It is offered to consider that power factor is not always a sufficiently obvious energy indicator in recuperation modes. **Practical significance.** The analytical expressions of power and power factors obtained in the work make it possible to compile more accurate and more detailed energy balance in urban tram traffic systems. Time graphical dependencies and histograms of power values and power factors make it possible to predict the parameters of effective recuperation modes also for other types of trams in other cities of Ukraine.

Key words: tram, dispersion method, recuperation, voltage, energy indicators, current, stochastic process, power, probability.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, професором Івановим О.Б.

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ И СПОСОБОВ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧИСТОТЫ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ
И ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЕМКостей
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Д.С. Абраменко¹, С.О. Давидов²

¹ Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара, Дніпро, Україна,
dmitriy.dts@gmail.com, ORCID [0000-0002-1101-5713](https://orcid.org/0000-0002-1101-5713)

² Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара, Дніпро, Україна,
sdavydov1960@gmail.com, ORCID [0000-0002-4142-7217](https://orcid.org/0000-0002-4142-7217)

**ANALYSIS OF EXISTING METHODS AND MEANS OF PROVIDING INDUSTRIAL
CLEANLINESS OF PNEUMATIC HYDRAULIC AND FUEL SYSTEMS OF LARGE-SIZED
TANKS OF ROCKET AND SPACE EQUIPMENT**

D.S. Abramenko¹, S.A. Davidov²

¹ Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine,
dmitriy.dts@gmail.com, ORCID [0000-0002-1101-5713](https://orcid.org/0000-0002-1101-5713)

² Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
sdavydov1960@gmail.com ORCID [0000-0002-4142-7217](https://orcid.org/0000-0002-4142-7217)

Мета. Мета роботи є оптимізація проектно-конструкторських рішень гідроструминного очищення вузлів ракетно-космічної техніки шляхом досягнення необхідних показників струменя мийочної рідини за допомогою оптимізації конструкції соплового пристрою.

Методика дослідження. Аналіз, експеримент, спостереження, вимірювання, обробка експериментальних даних, математичне моделювання, статистичний та порівняльний аналіз.

Результати дослідження. Проведено аналіз існуючих методів і засобів щодо забезпечення промислової чистоти пневмогідрравлічних і паливних систем виробів РКТ. Наведено негативний вплив забруднень порожнин на працездатність виробів і наведені приклади позаштатних ситуацій, як наслідок певної проблеми. Визначено обмеження режимів мийки, підібрана мийочна рідина. Розроблена математична модель впливу конструктивних особливостей прохідного каналу соплового пристрою на розподілення динамічного тиску струменя мийочної рідини від її довжини.

Наукова новизна. Обґрунтований критерій якості соплового пристрою – коефіцієнт осьового динамічного тиску, що дає можливість підібрати оптимальну конструкцію соплового пристрою під задані режими миття ємностей, що забезпечує мінімальні енерговитрати. Розроблено методику визначення оптимальної конструкції соплових пристроїв, яка дозволяє розробити малогабаритні мийні головки.

Практичне значення результатів роботи. Отримані результати використано для впровадження технології механізованого струминного очищення паливних відсіків I та II ступенів РКН «Циклон-4» на підприємстві ДП «ПО ЮМЗ ім. А.М. Макарова». Вони також можуть бути використані при створенні нових виробів РКТ та авіації, та для зниження трудомісткості знежирення головних обтічників сучасних ракет-носіїв. Крім того, отримані результати роботи можуть бути використані в хімічній, нафтохімічній, гірській та харчовій галузях промисловості для очищення великогабаритних ємностей, авто- та залізничних цистерн, гідровідбивки вугілля тощо.

Ключові слова: *гідроструйна очищення, мийна головка, паливні баки, рівень чистоти, режими мийки.*

Загрязнённость полостей пневмогидросистем (ПГС) отрицательно влияет на работоспособность изделий. По статистическим данным до 50% всех отказов гидравлических систем, связанных с выходом из строя насосов, заклиниванием распределительных и регулирующих устройств, повышенным износом ответственных деталей, снижением жесткости системы и с другими дефектами, происходит по причине чрезмерной загрязненности [1, 2, 3]. Важным является также и то, что выход из строя гидравлической системы приводит, как правило, к отказу системы управления всего изделия, что может повлечь за собой аварию [4].

Обеспечение промышленной чистоты узлов и агрегатов изделий РКТ является комплексным вопросом и зависит от ряда факторов:

- а) технологии изготовления и культуры производства;
- б) методов и средств очистки и контроля;
- в) правильной организации монтажно-сборочных работ.

Одним из важнейших вопросов в проблеме обеспечения чистоты ПГС РКТ является очистка полостей крупногабаритных емкостей [5]. Типичной крупногабаритной емкостью является топливный бак, который изготавливается из металлических материалов.

Очистка поверхностей металлических деталей, внутренних полостей узлов, агрегатов и систем представляет собой совокупность сложных физико-химических и механических процессов, эффективность которых зависит от свойств моющей среды, размера и свойств частиц загрязнений, технологических режимов очистки, конструктивных особенностей очищаемых деталей, агрегатов и систем. Вид и степень оставшихся после очистки загрязнений поверхности зависит, в основном, от способа очистки и типа моющей среды.

Продолжительность процесса очистки топливных баков современных изделий достигает 10-15 % от общих затрат времени на их изготовление и сборку. Поэтому выбор моющей среды, способа и гидродинамических параметров очистки является важным этапом в технологическом процессе изготовления изделий РКТ.

Производственные механические загрязнения представляют собой совокупность компонентов искусственного и естественного происхождения, характеризующихся прочными адгезионными, электростатическими и ионными связями, как между собой, так и с очищаемой поверхностью. Образованию прочных адгезионных связей способствует состояние развитой вафельной поверхности и использование на предшествующих операциях обезжиривания органических растворителей, образующих на очищаемой поверхности адгезионную плёнку.

В общем виде все загрязнения могут быть отнесены к двум группам [1]:

- органические загрязнения;
- неорганические (механические) загрязнения.

Различают три степени загрязнения: слабую, среднюю, сильную. При слабом загрязнении поверхность деталей покрыта легкими неравномерными загрязнениями (например, масла, пыль). При среднем загрязнении поверхность деталей покрыта небольшим равномерным слоем смазки, эмульсионных охлаждающих жидкостей с частицами металлической стружки. При сильном загрязнении поверхность деталей покрыта толстым слоем консервационной смазки или масла после термической обработки. Для удаления наиболее распространенных загрязнений расходуется значительная энергия (кДж/м²) [1]:

- механические примеси (дорожно-почвенные загрязнения) – 3600;
- масляно-грязевые – 7200;
- асфальтено-смолистые вещества – 10800;
- лакокрасочные покрытия – 14400;
- нагар – 36000.

Характер загрязнений для топливных отсеков авиационной и ракетно-космической техники соответствует механическим примесям со слабой степенью загрязнения и прочности связи [1]. Для их удаления потребуется не менее 3600 кДж/м².

В последние двадцать лет мировая аэрокосмическая промышленность была нацелена на высокий уровень чистоты выпускаемых изделий. Для этого в США был разработан Военный стандарт MIL-STD-1246C «Уровни чистоты изделий и программа контроля загрязнений», последняя редакция которого вышла 11 апреля 1994г [6]. Требования к внутренней чистоте баков кислородосодержащих компонентов топлива предъявляется на уровне 500D.

Таблица 1.1 – Требования стандарта MIL-STD-1246C на уровне 500D к внутренней чистоте баков кислородосодержащих компонентов топлива

Уровень чистоты	Размер фракции, 10 ⁻⁶ м	Количество частиц по фракциям на поверхности детали или в объеме жидкости, не более, шт (для уровня D – 10 ⁻⁶ кг)	
		0,1 м ²	10 ⁻³ м ³
500	50	11817	118170
	100	1100	11000
	250	26	260
	500	1	10
D	органические загрязнения	4	4

Загрязнения металлических поверхностей в виде пленок, прилипших твердых частиц, масел, смазок могут быть удалены в результате механического воздействия, растворения, химической реакции или смывания. Очисткой полостей крупногабаритных емкостей занимаются во многих отраслях тяжелого машиностроения. Как показала практика очистки крупногабаритных узлов (не только емкостей) в машиностроении, широко применяется струйная очистка незатопленными струями моющей жидкости [9, 10, 11, 12, 12 – 15, 16]. Типовая схема струйной очистки крупногабаритной емкости представлена на рисунке 1.1.

Струйная очистка является в настоящее время одним из наиболее эффективных способов очищающего воздействия на поверхность за счет механического, физико-химического или химического факторов. Основным условием очистки является превышение динамического давления струи над прочностными связями загрязнений с поверхностью. При этом определяющим параметром механического воздействия является давление очищающей струи. По величине давления на срезе сопла гидродинамические струи разделяют на струи низкого (до 1 МПа), среднего (1-5 МПа) и высокого давления (5-60 МПа).

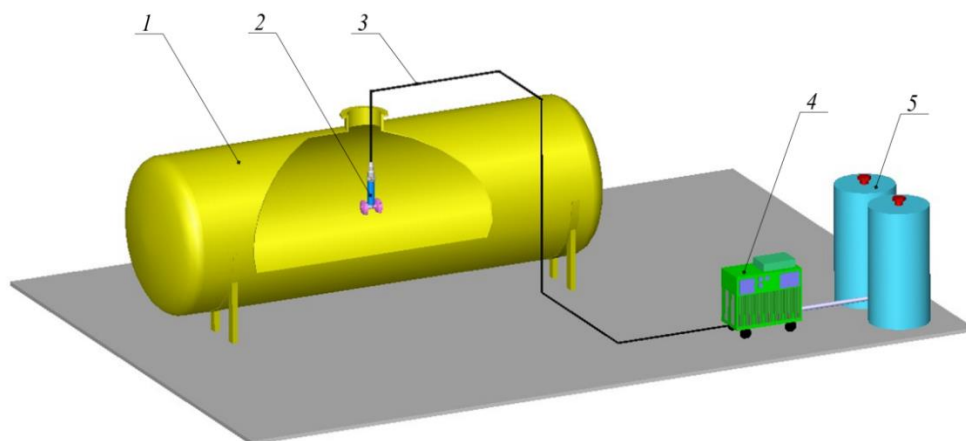


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема очистки емкостей

1 – емкость; 2 – моечная головка; 3 – шланг подачи жидкости; 4 – насос;
5 – емкости с моющей жидкостью

Широкое распространение струйная очистка водными растворами получила для очистки крупногабаритных емкостей изделий ракетно-космической техники, отличающихся большой конструктивной насыщенностью и затрудненным доступом к очищаемым поверхностям. При этом эффективность очистки достигается при совместном вращении и перемещении струй моющей жидкости внутри промываемой емкости с применением высоконапорных моющих устройств (рис. 1.2).

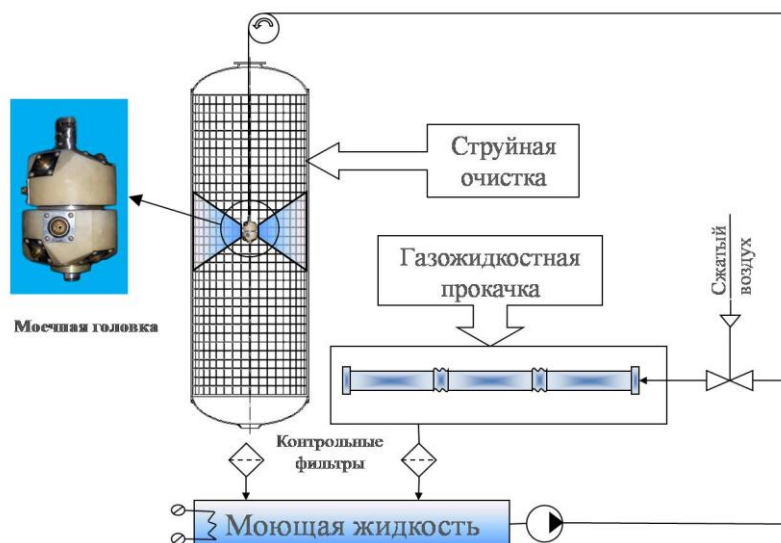


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема механизированной очистки топливных отсеков незатопленными струями моющей жидкости в РКТ

Основным узлом моечного оборудования является моечная головка с сопловыми устройствами, благодаря которой и обеспечивается высокое качество очистки емкостей.

В молочной промышленности широко используется моечное оборудование фирмы Керхер. Основным и уникальным узлом по своим конструктивным особенностям является моечная головка (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Моечная головка HKS 100 разработки фирмы Керхер

Моечная головка (рис. 1.3) высокого давления с реактивным жидкостным двигателем для чистки резервуаров. Расход и давление могут быть индивидуально подобраны для очищаемой ёмкости так, чтобы моечная головка была фактически универсальна в применении. Моечная головка выполнена компактно и удобна в использовании. Привод двигателя обеспечивает преимущества в передвижном применении. Пространственное вращение сопел в двух плоскостях, произведено через положительно-соединенный двигатель сопла. Асимметричная зубчатая передача с её большим количеством зубов гарантирует близко расположенные реактивные проходы и таким образом интенсивную чистку всей внутренней поверхности резервуара. Скорость вращения сохраняется постоянной внутренней циркуляцией жидкости, которая передается через дроссельную заслонку так, чтобы расход, и таким образом скорость могли быть оптимизированы под необходимую задачу очистки.

Таблица 1.2 Технические характеристики моечной головки HKS 100

Параметр	Величина параметра
Расход жидкости, л/ч	2400 – 6000
Давление, бар	40 – 100
Температура, °C	60 (80)
Мин. размер люк-лаза, мм	200
Частота вращения 1/мин	8 – 40
Масса, кг	6

К недостаткам моечной головки Керхер можно отнести использование механизма вращения в горизонтальной плоскости. Этот механизм использует электрический привод. В качестве смазки вращающегося механизма используется масло. В случае утечки масла оно попадает в моющую полость и требуется дополнительная чистка бака, а в большинстве случаев попадание сторонних материалов недопустимо. Моечная головка (МГ) часто выходит из строя и ее периодически не реже раз в полгода необходимо проводить ремонтные работы.

Моечное оборудование требовательно к качеству воды. Необходимо использовать только дистиллированную воду. При использовании не дистиллированной воды выходит из строя аппарат высокого давления.

Используемая моечная жидкость на отечественном производстве для очистки емкостей бихромат калия 0,2 % (содержит мелкий порошок) [4], что не применимо на керхеровской моечной головке.

На расстоянии 15-20 см давление струи моющей жидкости достигает от 10 – 11 МПа, что может привести к повреждениям внутри баковых устройств [5, 9]. Также к существенным недостаткам относится высокая стоимость МГ.

Близкой по своей конструкции и по принципам работы является промывочная головка «Циклон» (рис. 1.4), российской разработки.

Промывочная головка обеспечивает очистку внутренней полости железнодорожной цистерны, за счет пространственно движущейся струи горячей воды, подаваемой в промывочную головку под давлением. Промывочная головка с помощью легкоъемного приспособления устанавливается в верхний наливной люк цистерны. Промывочная головка целиком выполнена из коррозионностойких сталей, которые устойчивы к действию агрессивных сред и при соударениях и трении не создают искр. Конструкция промывочной головки обеспечивает очистку цистерн от остатков нефтепродуктов, химических продуктов, пищевых продуктов и тому подобное [7]. К недостаткам данной конструкции МГ можно отнести использование зубчатой передачи для вращения ее корпуса, что представляет опасность заклинивания и выхода из строя всего механизма.

Таблица 1.3

Технические характеристики промывочной головки «Циклон»	
Параметр	Величина параметра
Рабочее давление, МПа:	2
максимальное	1
минимальное	1-1,5
рекомендуемое	
Рабочая температура, °С, не более	100
Продолжительность моечного цикла, мин	8-15
Число сопел, шт.	2-4
Диаметр сопел, мм	10-13
Расход моющей жидкости, м ³ , не более:	
за цикл	4,5
за час	25
Эффективная дальность струи, м	9-10
Время очистки стандартной железнодорожной цистерны, с	900
Масса прибора, кг, не более	5
Габаритные размеры, м	0,144 x 0,235 x 0,373

Применяемые в настоящее время на ПО ЮМЗ моечные головки (разработки УкрНИИТМ) для очистки обтекателей и топливных баков (ракеты-носители «Зенит» и «Таурус») показали высокую надежность и хорошее качество очистки. Головка представляет собой два ротора, вращающихся в одной плоскости в двух противоположных направлениях за счет реактивных сил жидкости, истекающей из сопел (рис.1.5). Сопла располагаются под разными углами к плоскости вращения роторов, что обеспечивает подачу струй жидкости также под разными углами к удаляемым загрязнениям. Полный охват очищаемой поверхности достигается за счет вертикального перемещения шланги с моечной головкой вдоль очищаемого изделия. Для изделий с боковым расположением люка ввод шланга с моечной головкой и его позиционирование в очищаемой плоскости осуществляются при помощи специального приспособления.



Рисунок 1.4 – Промывочная головка «Циклон»

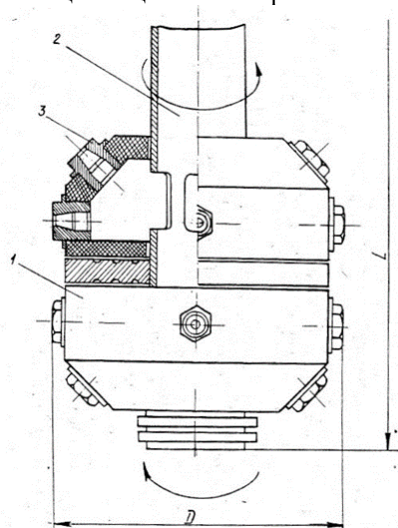


Рисунок 1.5 – Моечная головка разработки УкрНИИТМ

К недостаткам данной конструкции МГ можно отнести не полный охват области чистки емкости. МГ необходимо перемещать вдоль емкости посредством вертикального механизма находящегося вне емкости.

Таблица 1.4

Технические характеристики МГ разработки УкрНИИТМ

Параметр	Величина параметра
Диаметр	155
Длина	400
Масса, кг	4,5
Число сопел	20
Диаметр выходного отверстия, мм	4
Наличие спрямляющего аппарата	есть
Число степеней свободы вращения роторов	1
Рабочее давление жидкости, МПа	0,6-0,7
Расстояние эффективного действия струи, м	2,5
Угол наклона сопел	фиксированный

Для очистки топливных полостей более сложных конструкций УкрНИИТМом в конце 80х годов прошлого века была разработана МГ, стационарно размещаемая в очищаемой полости и обеспечивающая вращение роторов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 1.6).

Данная головка успешно эксплуатировалась на протяжении всего периода выпуска комплекса Зенит. Однако, создание нового изделия – «Циклон-4» с иными конструктивными решениями требует и совершенствования проектно-конструкторских решений моющих устройств, позволяющих не только возможность их ввода в очищаемые полости, но и улучшающих динамические характеристики струй жидкости и обеспечивающих их прямое попадание на все точки очищаемой поверхности под разными углами наклона и по разным направлениям [5].

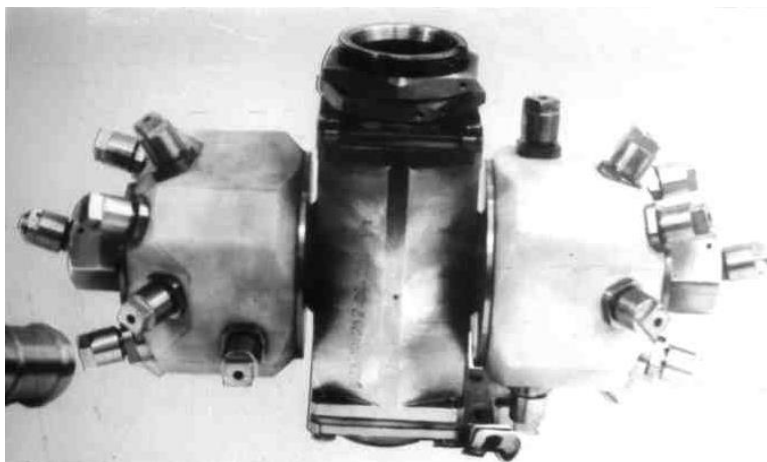


Рисунок 1.6 – Моечная головка, вращающаяся в двух плоскостях

Кроме того, как показал опыт эксплуатации моющих головок, применяющихся на ПО ЮМЗ, использование в этих конструкциях фторопластовых подшипников скольжения приводит к большим потерям моющей жидкости - до 50 % от общего расхода, влечет за собой падение давления, что снижает динамические характеристики струи, тем самым, увеличивая продолжительность мойки. Также применение данного материала сужает диапазон рабочей температуры моющей жидкости в пределах 15 – 25°C, а для применения некоторых моющих средств (например на основе водно-моющего средства «Деталан») его температура должна быть не ниже 35°C.

На ряду с конструктивным исполнением МГ, обеспечивающая доставку моющей жидкости к очищаемой поверхности, достижение оптимальных параметров физических показателей струи моющей жидкости обеспечивается проектно-конструкторскими решениями сопловых устройств. Существует много различных сопловых устройств, выполняющих требование дальнбойности и компактности истекающих жидкостных струй.

Заслуживает внимания сопла, имеющие малые габариты при высоких энергетических характеристиках.

В качестве аналога можно рассмотреть щелевую форсунку [14], содержащую полый цилиндрический корпус с узлом подсоединения к напорному трубопроводу, расположенному на одном из его концов, соплом, установленным на другом конце корпуса соосно с ним и средством его фиксации, включающим винт. Для улучшения гидродинамических характеристик струи сопло выполнено в виде кольца с секторным вырезом, а средство фиксации сопла содержит оправку в виде колпачка, схватывающего кольцо и имеющего отверстие в центре для прохода винта. Рекомендуемое расстояние от щелевой форсунки до очищаемой поверхности 50 – 150 мм, рабочее давление 10 – 60 МПа. Принимая во внимание средние диаметры топливных отсеков около 3,0 м, то данная конструкция СУ является не эффективной.

В разработанных УкрНИИТМ моечных головках для ПО "Южный машиностроительный завод" используются жидкоструйные дальнобойные сопловые устройства [7], содержащие цилиндрический ствол с конической сужающейся выходной частью и размещенный в нем выпрямитель. Для уменьшения габаритов и повышения дальнобойности, выпрямитель выполнен в виде двух групп продольных перегородок, первая из которых установлена с образованием, по меньшей мере, четырех каналов, а вторая, по меньшей мере, девяти каналов. Длина первой группы перегородок выбрана от 1,0 до 1,2, длина второй группы перегородок - от 1,3 до 1,6, а зазор между группами выбран равный 0,2 внутреннего диаметра ствола. Эффективная рабочая длина струи таких СУ, при которой давление падает не менее чем в два раза, не более 1,0 м, при рабочем давлении 0,6 – 10,0 МПа.

Жидкоструйное сопловое устройство [11] имеет еще меньшие размеры, чем предыдущее при сохранении гидродинамических характеристик. Оно позволяет создавать облегченные малогабаритные моечные головки, позволяющие, по мнению заявителей, осуществлять эффективную жидкоструйную очистку крупногабаритных емкостей диаметром до 5...6 метров. Рабочее давление 0,6 – 10,0 МПа. Но данное СУ включает в себя выпрямители в виде сот, изготовленных из фольги (толщина не более 0,5 мм). Практика отработки таких устройств на ГП «ПО «ЮМЗ» показала, что в течение 5 – 6 месяцев эксплуатации данный выпрямитель сминается за счет абразивных частичек, находящихся в моющем растворе, и попадает в полость бака, тем самым еще больше загрязняя его. В виду этого пришлось отказаться от данного конструктивно-технологического решения.

В качестве моющих жидкостей могут использовать самые разнообразные водно-моющие растворы, фторохлоросодержащие растворители и составы. Традиционно в отечественной и зарубежной отрасли для очистки баков применяют фреон-113, нефрас либо 0,1 – 0,2 % раствор бихромата калия. Применение этих веществ не вызывает коррозию материалов, из которых изготовлен бак и внутрибаковые устройства, к тому же фреон-113 и раствор хромпика являются пожаробезопасными и не токсичными веществами. Перспективным является применение водно-моющих растворов, но они практически не регенерируются и на их утилизацию необходимо выделить больших денежных средств.

Выводы

1. Применение при производстве, эксплуатации и ремонте ПГС авиационной и ракетно-космической техники высокоэффективных методов и средств очистки обеспечивает значительный экономический эффект.

2. Как показала практика очистки крупногабаритных узлов (не только емкостей) в машиностроении, широко применяется струйная очистка незатопленными струями моющей жидкости как самый высокоэффективный метод очистки от органических и неорганических (механических) загрязнений.

3. В качестве моющих жидкостей используют раствор 0,1 – 0,2% бихромата калия и фреон-113, как не токсичные, не горючие вещества и не вызывающие коррозию металлических емкостей, подвергающихся мойке.

4. Конструктивное исполнение МГ и СУ весьма разнообразно и зависит от режимов мойки (давления, температуры) и внутренней конструкции очищаемой емкости (ВБУ, габариты и так далее). Применительно к РКТ при мойке баков необходимо использовать МГ, работающую на низком давлении, в виду того, что при превышении давления выше чем 1,5 МПа, то существует вероятность повреждения ВБУ.

5. МГ и СУ, применяемые в РКТ, обладают рядом отрицательных факторов, а именно:

- чувствительность к перепаду температур моющей жидкости (заклинивание МГ при повышении температуры более чем на 10°C);
- потери жидкости через уплотняющие элементы МГ до 50%;
- СУ приходят в негодность через 6 месяцев эксплуатации и тем самым дополнительно загрязняют очищаемую емкость.

Все эти факторы обуславливают актуальность проблемы обеспечения чистоты ПГС авиационной и ракетно-космической техники.

Список использованных источников

1. Потапович Л. П. Конструктивно-технологічні методи забезпечення чистоти ракетно-космічних об'єктів для підвищення надійності їх функціонування: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.07.02 «Проектування, виробництво та випробування ЛА» / Потапович Л. П. – Днепропетровск, 2008. – 165 с.
2. Дмитрий Панов. Развиваем технологии создания ракет "Ангара" и "Союз-5", [Электронный ресурс] URL: <https://ria.ru/20170629/1497474701.html> - 2017.
3. Шандер А.Ю. Разработка методики очистки топливных баков и магистралей летательных аппаратов на основе акустических и вакуумных воздействий / Шандер А.Ю. // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров авиакосмической отрасли. Материалы XII Всероссийской научной конференции, посвященной памяти главного конструктора ПО «Полёт» А. С. Клинышкова. – Омск, 2018. – С. 126 – 132.
4. Экспериментальные исследования по выбору оптимального водно-моющего средства для обезжиривания поверхностей под «оксид»: Технический отчет / УкрНИИТМ. инв. № 1060. – Днепропетровск, 2008. – 38 с.
5. Экспериментальные исследования по сравнительным коррозионным испытаниям образцов, обезжиренных рекомендуемым водно-моющим средством и хладоном-113: Технический отчет / УкрНИИТМ. инв. № 1080с. – Днепропетровск, 2009. – 17 с.
6. Product Cleanliness Levels and Contamination Control Program: MIL-STD-1246C. – [Accepted 11 April, 1994]. – 56 p. – (Military Standard of USA).
7. А.с. 288624, СССР, МКИ4 В 08 В 9/36. Устройство для очистки емкостей/ К.А. Гудков, В.В. Ващенко, Ю.И. Мельник, М.Н. Хвостов. № 3193679/31-21. Заявлено 09.03.88г. Оpubл. 14.05.1989, Бюл. № 23.
8. А. с. 1657229 СССР, МКИ4 В 08 В 9/08. Жидкоструйное сопловое устройство / С .М. Ермолаев, М. Н. Хвостов, В. М. Шаранюк, А. В. Кислица. - № 4703998; заявл. 03.04.1989; опубл. 23.06.1991, Бюл. № 2.
9. Грецов Н. А. Гидравлические основы струйного метода очистки деталей машин // Опыт применения новых моющих средств. – М. : ГОСИНТИ, 1973. – 237 с.
10. Струйная очистка емкостей. Методические основы создания моечной головки для струйной очистки / [Лобанов В. С. и др.] – НПО, 1988. – №7. С. 45 – 49.
11. Пат. 14440 перереєстроване авторське свідоцтво СРСР, МПК В 05 В 1/02. Рідкоструминний сопловий прилад / Ермолаєв С. М., Єфімчук Б. П., Кіслиця О. В., Хвостов М. М., Шаранюк В. М.; власник Укр. наук.-дослід. ін-т машинобудування. – № 4703998/SU , заявка 03.04.89 ; опубл. 25.04.97, Бюл. № 2.
12. А. с. 1219177 СССР, МКМ4 В 08 В 3/08, В 08 В 9/08. Способ очистки внутренней поверхности емкостей / Ефимчук Б. П., Жуганов В. П., Сметанина Т. Г., Хвостов М. Н., Святодух А. С. – № 3813786/28-12 ; заявл. 15.11.84 ; опубл. 23.03.86, Бюл. № 11-20.
13. А.с. 651858 СССР, МКИ4 В 08 В 3/02. Установка для очистки крупногабаритных изделий / Колесников А. И., Гушин А. И., Ясько В. П., Кравченко В. Е., Прохоров В. М., Одинокоев В. Н. – № 2476295/28-Т2 ; заявл. 04.04.77.
14. А. с. 1121070 СССР, МКИ4 В 08 В 9/08. Щелевая форсунка / Одинцов Ю. А., Беликов В. Г., Жуйков В. И. – № 3363973/28-12 ; заявл. 03.12.81 ; опубл. 30.10.84, Бюл. № 40.
15. А. с. 1327986 СССР, МКИ4 В 08 В 9/08. Жидкоструйное дальнобойное сопловое устройство / Мальцев А. С., Ефимчук Б. П., Калининченко П. А., Баталионюк Т. Ю., Святодух А. С. – № 3974564; заявл. 04.11.1985; опубл. 07.08.1987, Бюл. № 29.
16. Алексеев Ю. С. Технологія виробництва ракетно-космічних літальних апаратів / За ред. д-ра техн. наук Є. О. Джур; навч. посіб. / Ю. С. Алексеев, О. Є. Джур, О. В. Кулик, Л. Д. Кучма, Є. Ю. Ніколенко, В. В. Хуторний. – Д. : АРТ-ПРЕС. – 2007. – 480 с. Надійшла до редакції 01.10.2010.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Дронь Н.М.

ABSTRACT

Purpose of work. The purpose of the work is to optimize the design and engineering solutions of hydrojet cleaning of rocket and space technology units by achieving the required performance of the jet of detergent by optimizing the design of the nozzle device.

Research methods. Analysis, measurement, processing of experimental data, statistical and comparative analysis.

Research results. The analysis of the existing methods and means for ensuring the industrial purity of pneumohydraulic and fuel systems of rocket products is carried out. A mathematical model of the influence of the design features of the passage channel of the nozzle device on the distribution of the dynamic pressure of the washing fluid jet from its length has been developed.

Scientific novelty. The substantiated criterion of quality of the nozzle device is the coefficient of axial dynamic pressure, which makes it possible to choose the optimal design of the nozzle device for the specified modes of tank washing, which ensures minimal energy consumption.

Practical significance of work results. The obtained results can be used to create new aviation products, and to reduce the complexity of degreasing the main fairings of modern launch vehicles. In addition, the results of the work can be used in the chemical, petrochemical, mining and food industries for cleaning large tanks, road and rail tanks, coal miners.

Key words: hydro-jet cleaning, a washing head, fuel tanks, cleanliness level, clean mode.

ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ БАРАБАННИМИ МЛИНАМИ САМОЗДРІБНЮВАННЯ РУД

І.В. Новицький¹, В.В. Слесарєв², А.В. Малієнко³

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна,

novytskyi.i.v@nmu.one ORCID [0000-0002-8780-6589](https://orcid.org/0000-0002-8780-6589)

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна,

sliesariyev.v.v@nmu.one ORCID [0000-0002-1058-5183](https://orcid.org/0000-0002-1058-5183)

³ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна,

andrei.malienko@gmail.com ORCID [0000-0002-3165-9233](https://orcid.org/0000-0002-3165-9233)

IDENTIFICATION ALGORITHM OF EXTREME MANAGEMENT BY THE RATTLEJACKS OF SELF-GROWING SHALLOW OF ORES

I. Novitskyi¹, V. Sliesariyev², A. Maliienko³

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

novytskyi.i.v@nmu.one ORCID [0000-0002-8780-6589](https://orcid.org/0000-0002-8780-6589)

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

sliesariyev.v.v@nmu.one ORCID [0000-0002-1058-5183](https://orcid.org/0000-0002-1058-5183)

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

andrei.malienko@gmail.com ORCID [0000-0002-3165-9233](https://orcid.org/0000-0002-3165-9233)

Анотація. Розглянуто задачу оптимізації процесу подрібнення руд в барабанних млинах з урахуванням матеріалу та його впливу на систему приводу млина. Зауважено що в реальних умовах ідеальних консервативних систем керування барабанними млинами не існує. Аналіз руху матеріалу показує коливання системи, які або затухнуть, або будуть виникати зі зростаючою амплітудою. Зменшення коливань можливо з використанням алгоритму ідентифікації та виконується в умовах квазістаціонарності об'єкту, оскільки час відбору необхідної інформації на кожному кроці управління набагато менше часу спаду автокореляційної функції основного збурюючого процесу зміни фізико-механічних властивостей руди. Таким чином в роботі запропонована модель, спосіб та система екстремального управління барабанними млинами самоздрібнювання руд

Ключові слова: математична модель, процес подрібнення руд, млин самоздрібнювання, точки екстремуму, ідентифікаційний алгоритм.

Вступ. Відомо, що процеси подрібнення руд в барабанних млинах є найбільш ресурс ємними процесами збагачувальної технології. Тому раціональне використання підводиться до млина енергії є актуальною практичною задачею.

Постановка задачі дослідження. У роботах [1,2] показано, що при обертанні барабана млина самоздрібнювання знаходиться всередині нього подрібнюється матеріал робить коливання і є джерелом змінних навантажень в системі приводу млинів. Механізм виникнення таких коливань навантаження всередині млина пояснює наступна математична модель (рис. 1):

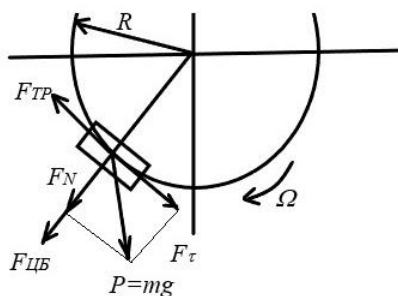


Рисунок. 1- Рух плоского тіла на внутрішній поверхні обертового барабана

На внутрішню поверхню обертового барабана радіуса R поміщено плоске тіло малих розмірів. Рівняння його руху під дією сил по поверхні барабана матиме вигляд:

$$f(F_n + F_{цб}) - F_\tau = m \ddot{\theta} R \quad (1)$$

У формулі (1) і на рис. 1 позначено:

$F_n = mg \cos \theta$ - нормальна складова сили тяжіння P ;

$F_\tau = mg \cdot \sin \theta$ - тангенціальна складова;

$F_{цб} = m \dot{\theta}^2 R$ - відцентрова сила;

$F_{тр} = f(F_n + F_{цб})$ - сила тертя;

f - коефіцієнт тертя між тілом і поверхнею барабана;

m - маса тіла;

θ - кутова координата.

Підставляючи в (1) вирази для сил і виконавши перетворення, отримаємо:

$$\ddot{\theta} - f \dot{\theta}^2 + g \cdot R^{-1} \cdot \sqrt{1 + f^2} \cdot \sin(\theta - \arctg f) = 0 \quad (2)$$

Як випливає з (2), характер руху тіла не залежить від його маси, а визначається радіусом обертання R , коефіцієнтом тертя f і початковими умовами. Характерною особливістю рівняння (2) в порівнянні з відомими лінійними рівняннями другого порядку є сталість знаку функції першої похідної (точніше незалежність його від знаку першої похідної кута). Тому, при постійних f і R система (2) є консервативною, її фазові траєкторії мають вигляд замкнутих кривих, а точка 0 на рис. 2 є особлива точка типу центр з координатами $(\arctg f; 0)$.

Відповідно до (2) частота коливань визначається радіусом R :

$$\omega = \sqrt{g \cdot R^{-1} \sqrt{1 + f^2}} \quad (3)$$

В реальних умовах ідеальних консервативних систем не існує, а коливання в системі або затухнуть, або будуть виникати зі зростаючою амплітудою. У промислових барабанних млинах при їх обертанні завжди має місце залишковий небаланс, тобто розбіжність центра ваги з центром обертання.

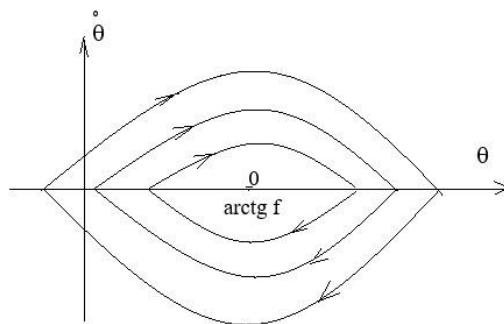


Рисунок 2 - Фазові траєкторії системи (2)

Іншими словами, радіус обертання на рис. 1 і в рівнянні (2) здійснює малі коливання з частотою обертів барабана. Коливання ж рудної маси відбуваються в її внутрішніх шарах і частота цих коливань, згідно (3) залежить від ступеня заповнення барабана φ [%]. Частота обертів барабана млина Ω і власна частота коливань внутрішньо млинового навантаження мають один і той же порядок. Тому за певних ступенів заповнення барабана (точніше, у вузькому діапазоні внутрішньо млинових заповнень) має місце параметричне збудження коливань у внутрішніх шарах рудного навантаження з частотою ω [3].

В роботі [4] експериментально обґрунтовано, що інтенсифікація коливань рудного навантаження призводить до збільшення продуктивності млинів самоздрібнювання по новоутвореному готовому класу. Отже, доцільно шляхом регулювання ступеня заповнення млина підтримувати максимальну інтенсивність

коливань рудного навантаження. Функціональна схема відповідної системи регулювання приведена на рис. 3.

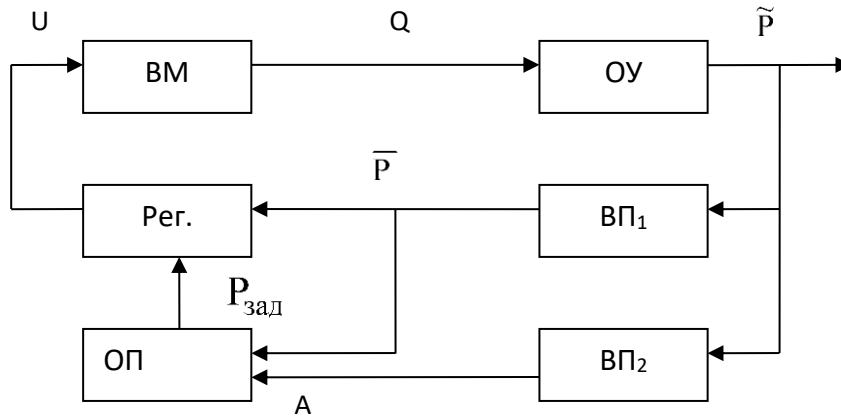


Рисунок 3 – Функціональна схема системи регулювання

Тут об'єктом управління ОУ є млин самоздрібнювання з класифікатором. Керуючим впливом U через виконавчий механізм ВМ регулюється потік руди (гальки) в млин Q і, отже, ступінь заповнення барабана. Як джерело оперативної інформації про стан ОУ в системі використовується активна потужність $\tilde{P}$, споживана привідним двигуном млини. Вимірювальний пристрій ВП1 згладжує процес $\tilde{P}$ з метою отримання сигналу середньої потужності $\bar{P}$, який пропорційний в робочому діапазоні ступеню заповнення барабана φ . Тому основний контур регулювання системи рис. 3 реалізує стабілізацію середньої потужності двигуна на рівні завдання за допомогою регулятора Рег. Вимірювальний пристрій ВП2 виділяє з спектра сигналу гармонійну складову з частотою коливань рудного навантаження і вимірює її амплітуду (сигнал A).

Обчислювальний пристрій ОП реалізує покроковий пошук екстремуму A, встановлюючи таке значення $P_{зад}$, щоб інтенсивність коливань рудного навантаження була б максимальною. При цьому сигнал $\bar{P}$ виступає в якості параметра оптимізації, а сигнал A - в якості критерію. На рис. 4 представлена експериментально отримана в умовах РЗФ-2 Північного ГЗК на млині МРГ 55 x 75 залежність A від $\bar{P}$.

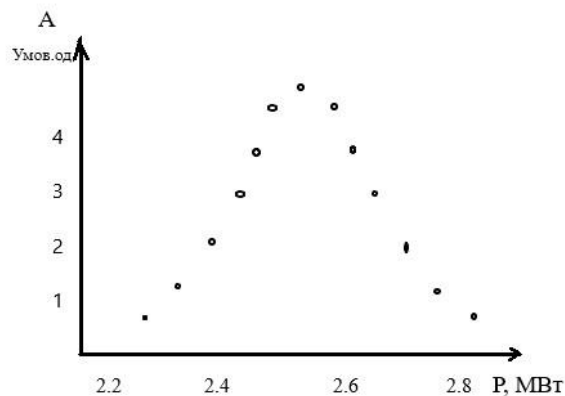


Рисунок 4 –Залежність інтенсивності коливань рудного навантаження A від середньої потужності двигуна млина $\bar{P}$

Ця залежність якнайкраще апроксимується кривій Гауса виду :

$$A = -\frac{C_1}{C_2 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\bar{P}-C_3)^2}{2C_2^2}\right]$$

де C_1, C_2, C_3 – параметри.

Цей факт пояснюється дією більшої кількості чинників, що впливають на процес виникнення коливань, зокрема випадковим характером формування епюри заповнення працюючого млина у поєднанні з вузьким діапазоном заповнень, в якому виникають коливання.

Рішення задачі. З урахуванням викладеного, в обчислювальному облаштуванні ВМ крокової пошукової системи мал.3 доцільно реалізувати ідентифікаційний алгоритм, що забезпечує швидке обчислення точки екстремуму залежності $A = f(\bar{P})$ для формування завдання на регулятор.

Нехай в процесі крокового пошуку екстремуму залежності отримані три пари відповідних значень: $(A; \bar{P}) i = \overline{1,3}$, на основі яких може бути складена система:

$$A_i = \frac{C_1}{C_2 \sqrt{2\pi}} \cdot 1 - \frac{(\bar{P}_i - C_3)^2}{2C_2^2} \quad i = \overline{1,3} \quad (4)$$

Розділивши перше рівняння системи (4) на друге і друге на третє, отримаємо:

$$\frac{A_1}{A_2} = 1 - \frac{(\bar{P}_2 - C_3)^2 - (\bar{P}_1 - C_3)^2}{2C_2^2}$$

$$\frac{A_2}{A_3} = 1 - \frac{(\bar{P}_3 - C_3)^2 - (\bar{P}_2 - C_3)^2}{2C_2^2}$$

або після логарифмування:

$$\frac{\ln(A_1/A_2)}{2C_2^2} = (\bar{P}_2 - C_3)^2 - (\bar{P}_1 - C_3)^2$$

$$\frac{\ln(A_2/A_3)}{2C_2^2} = (\bar{P}_3 - C_3)^2 - (\bar{P}_2 - C_3)^2 \quad (5)$$

Розділимо перше рівняння системи (5) на друге:

$$\frac{\ln(A_1/A_2)}{\ln(A_2/A_3)} = \frac{\bar{P}_2^2 - 2\bar{P}_2C_3 - \bar{P}_1^2 + 2\bar{P}_1C_3}{\bar{P}_3^2 - 2\bar{P}_3C_3 - \bar{P}_2^2 + 2\bar{P}_2C_3}$$

Останнє рівняння вирішується відносно C_3 , яке і визначає точку оптимуму по параметру $\bar{P}$:

$$\bar{P}_{\text{опт}} = C_3 = \frac{\ln(A_1/A_2) \cdot (\bar{P}_3^2 - \bar{P}_2^2) - \ln(A_2/A_3) \cdot (\bar{P}_2^2 - \bar{P}_1^2)}{\ln(A_2/A_3) \cdot (2\bar{P}_1 - 2\bar{P}_2) - \ln(A_1/A_2) \cdot (2\bar{P}_2 - 2\bar{P}_3)} \quad (6)$$

Таким чином в обчислювальному пристрої ОП пошукової екстремальної системи (рис.3) на основі поточних вимірювань $(A; \bar{P})$ виконується перерахунок оптимального значення аргументу залежності $A = f(\bar{P})$ по виразу (6) і відповідна корекція завдання $\bar{P}_{\text{зд}}$ на регулятор.

Висновки. Застосування вказаного способу управління млинами самоподрібнення забезпечує виконання умови квазістаціонарної об'єкту, оскільки час відбору необхідної інформації на кожному кроці управління набагато менше часу спаду автокореляційної функції основного збурюючого процесу зміни фізико-механічних властивостей руди.

На основі описаного ідентифікаційного алгоритму екстремального управління були розроблені і впроваджені системи управління млинами МРГ 55 x 75 збагачувальної фабрики-2 Північного ГЗКа [5].

Перелік посилань.

1. Марюта А.Н., Новицкий И.В. О сигнале активной мощности приводных двигателей барабанных мельниц в узкой полосе инфранизкого диапазона частот. / Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. научн.-техн. Сб., 1982, вып. 40, с. 81-83.
2. Марюта А.Н., Новицкий И.В. Разработка и испытание в промышленных условиях устройства диагностики состояния внутримельничной нагрузки. / Системы управления технологическими процессами: Межвузовский сборник. Новочеркасск, изд. НПИ, 1981, с. 128-131.
3. Марюта А.Н. О повышении технико-экономической эффективности энергосберегающей технологии управления измельчением руд в промышленных барабанных мельницах. // Изв. Вузов – Цветная металлургия. – 1987. – №3. – с. 18-19.
4. Марюта А.Н., Новицкий И.В., Мамонов С.Г. и др. Промышленные испытания устройств технологической диагностики барабанных мельниц / Горный журнал. – 1982. – №8. – с. 48-49.
5. Новицкий И.В., Григорьев В.Б., Бульба В.И., Горшков Н.А. Система автоматического управления рудногальными мельницами / Горный журнал. – 1990. – №5. – с. 50-51.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена задача оптимизации процесса измельчения руд в барабанных мельницах с учетом материала и его влияния на систему привода мельницы. Замечено что в реальных условиях идеальных консервативных систем управления барабанными мельницами не существует. Анализ движения материала показывает колебания системы, или затухнут, или будут возникать с растущей амплитудой. Уменьшение колебаний возможно с использованием алгоритма идентификации и выполняется в условиях квазистационарности объекта, поскольку время отбора необходимой информации на каждом шагу управления гораздо меньше времени спада автокорреляционной функции основного возмущающего процесса изменения физико-механических свойств руды. Таким образом в работе предложена модель, способ и система экстремального управления барабанными мельницами самоизмельчения руд

Ключевые слова: математическая модель, процесс дробления руд, мельница самоизмельчения, точки экстремума, идентификационный алгоритм.

ABSTRACT

The problem of optimization of ore grinding process in drum mills taking into account the material and its influence on the mill drive system is considered. It is noted that in real conditions there are no ideal conservative control systems for drum mills. Analysis of the movement of the material shows the oscillations of the system, which will either attenuate or will occur with increasing amplitude. Reduction of oscillations is possible using the identification algorithm and is performed in the quasi-stationary conditions of the object, because the time of selection of the necessary information at each control step is much less than the time of decline of the autocorrelation function of the main perturbing process of physical and mechanical properties of ore. Thus, the model, method and system of extreme control of drum mills of self-grinding of ores are offered in the work.

Keywords: mathematical model, ore grinding process, self-grinding mill, extremum points, identification algorithm.

ДОВГОСТРОКОВА СТРАТЕГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ І РЕГУЛЮВАННЯ ГЛИБОКО-ВОДНИХ ГІДРОПІДЙОМІВ В СКЛАДІ СУДНОВИХ ВИДОБУВНИХ КОМПЛЕКСІВ

В.І. Самуся¹, Є.О. Кириченко², І.М. Чеберячко³, О.О. Бобришов⁴

¹ Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна,
samusia.v.i@nmu.one, ORCID 0000-0002-6073-9558

² Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна,
kyrychenko.ye.o@nmu.one, ORCID 0000-0003-2748-989X

³ Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна,
cheberiachko.i.m@nmu.one, ORCID 0000-0002-6193-5729

⁴ Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна,
bobryshov.o.o@nmu.one, ORCID 0000-0002-3712-7676

LONG-TERM STRATEGY FOR THE DESIGN AND REGULATION OF DEEP-WATER HYDRAULIC HOISTS AS PART OF SHIP MINING COMPLEXES

V.I. Samusia¹, Y.O. Kyrychenko², I.M. Cheberiachko³, O.O. Bobryshov⁴

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
samusia.v.i@nmu.one, ORCID 0000-0002-6073-9558

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
kyrychenko.ye.o@nmu.one, ORCID 0000-0003-2748-989X

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
cheberiachko.i.m@nmu.one, ORCID 0000-0002-6193-5729

⁴ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
bobryshov.o.o@nmu.one, ORCID 0000-0002-3712-7676

Анотація. Шляхом узагальнення нових закономірностей і відомих результатів, отриманих даними авторським колективом, протягом більше 40 років розроблено довгострокову багатоступінчасту стратегію створення глибоководних гідропідйомів в складі морських видобувних комплексів. Запропонована стратегія базується на прогресивних методологічних принципах визначення раціональних проектних і експлуатаційних параметрів установок і інноваційних способах підвищення ефективності гідропідйомів в складних умовах великих глибин. Запропонована стратегія є потужним інструментом досліджень на всіх стадіях проектування і експлуатації, а також забезпечує правильний вибір найбільш обґрунтованого шляху до досягнення мети. Деформація запропонованої стратегії призводить до стрімкої девальвації практичних результатів.

Ключові слова: глибоководний гідропідйом, глибоководний видобуток, трубопровідний став, гідро-транспорт, насос, ерліфт, тверді корисні копалини, судновий видобувний комплекс.

На ранней стадии освоения океанических месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ) глубоководные гидроподъемы, в общем, проектировались, как и в традиционном горном деле по аналогии с шахтными водоотливными установками. Основными тактическими задачами являлись определения оптимального диаметра транспортирующего трубопровода и рациональных расходных и энергетических параметров установок. При этом игнорировалась специфика транспортирования ТПИ с океанического дна на базовое плавсредство в толще морской воды. На этом этапе результаты многочисленных расчетных методик зачастую не совпадали не только количественно, но и на качественном уровне. Большинство проектных расчетов ошибочно базируются на некорректной физической модели [4, 5, 8, 16, 17], согласно которой гидродинамика и энергоемкость процесса транспортирования конкреций определялась объемом поднимаемой осредненной по физическим свойствам гидросмеси, а не массового расхода полезных ископаемых, что является конечной целью разработок. Понятно, что новая физическая модель исследуемого процесса требует и новой математической модели и новых расходных и энергетических характеристик, а, в конечном итоге, и новой теории гидроподъемов полиметаллических конкреций, тем более, что эти уникальные горные машины не имеют аналогов в традиционном горном деле.

К сожалению, на сегодняшнем этапе доминируют в основном теоретические подходы к решению проблемы [11 - 14], без необходимой поддержки экспериментальных исследований, что снижает достоверность результатов моделирования. Кроме того, при анализе эксплуатационных режимов ошибочно не

корректируется величина массового расхода и истинные концентрации твердого, а также энергетические показатели рабочих режимов, в соответствии с уровнем развития техники и технологии разработок. По нашему мнению, эти ошибки в первую очередь связаны с отсутствием научно обоснованной долгосрочной стратегией проектирования глубоководных гидроподъемов в составе морских судовых комплексов и определения рациональных эксплуатационных рабочих режимов в сопряженной постановке.

Очевидно, что разработка долгосрочной многоэтапной стратегии является предметом масштабной монографии, а не единичной статьи. Тем не менее, настоящая публикация актуальна и полезна, так, как отражает наиболее важные моменты проектирования и эксплуатации морских гидроподъемов впервые в сопряженной постановке.

Цель – повышение эффективности глубоководных насосных и эрлифтных гидроподъемов и снижение энергоёмкости установок путем определения их рациональных проектных и эксплуатационных параметров за счет внедрения разработанной современной стратегии моделирования пневмогидротранспортных процессов.

Научная новизна – задачи определения рациональных проектных параметров и регулирования рабочих режимов для обеспечения наиболее высоких показателей гидроподъемов решается в сопряженной постановке в рамках единой методологической концепции.

Насосный гидроподъем имеет ряд преимуществ, связанных с высокими производительностями и к.п.д. грунтовых насосов, а также возможностью подъема пульп высоких концентраций. Однако быстрый износ рабочих деталей грунтовых насосов вследствие контакта с транспортируемыми абразивными частицами обуславливает необходимость частого технического обслуживания оборудования в сложных условиях больших глубин.

В эрлифтном варианте гидроподъема основное электромеханическое оборудование располагается на поверхности водного бассейна, что значительно упрощает его техническое обслуживание и сокращает необходимые для этого периоды времени. Данное обстоятельство повышает работоспособность гидроподъемов такого принципа действия, однако высокая энергоёмкость компрессоров обуславливает низкие значения к.п.д. установок.

Согласно динамике патентования, при выборе оборудования для подъема горной массы на поверхность морской воды [13], насосные и эрлифтные установки имеют хорошие перспективы.

На рисунке 1 показана общая схема морского горно-добывающего комплекса (МГК) для добычи полиметаллических конкреций (ПМК).

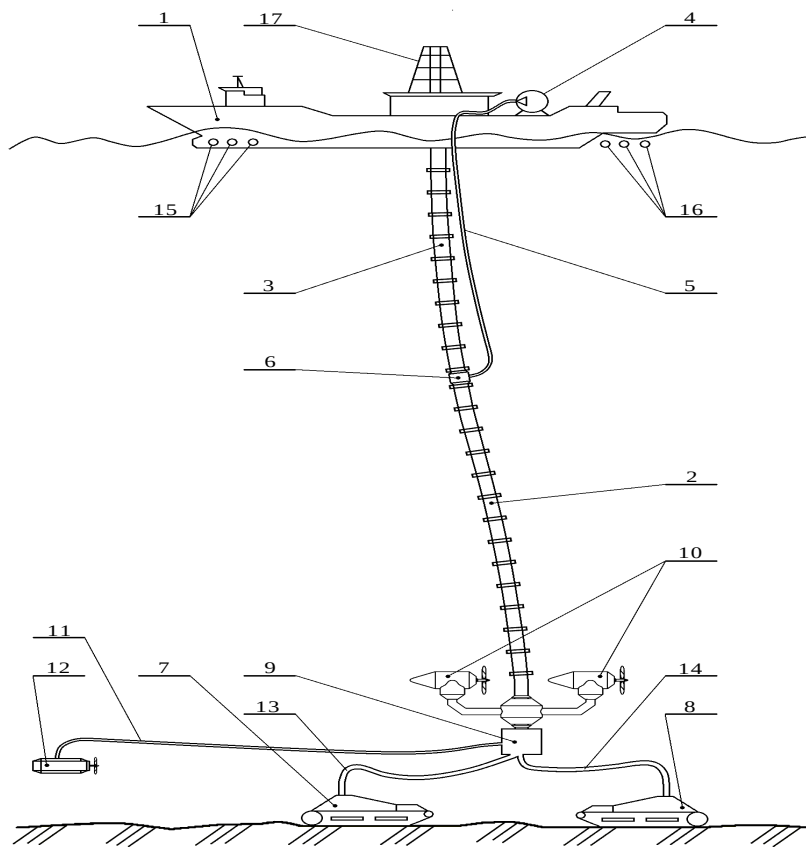


Рисунок 1 – Общая схема морского горнодобывающего комплекса

Один из современных вариантов реализации МГК, базирующегося на эрлифтном гидроподъеме, отображен на рис. 1 [15]. На базовом плавающем средстве 1 закреплен транспортный трубопровод системы гидроподъема (подводящий 2 и подъемный 3 трубопроводы глубоководного эрлифта). Компрессор 4 сообщен через пневмопровод 5 со смесителем 6. Агрегаты сбора самоходного типа 7, 8 расположены на дне водного бассейна и предназначены для сбора, дробления и отделения ПМК от донных осадков. Подводная технологическая платформа 9 присоединена к нижней части транспортного трубопровода, снабжена двигателем 10, а также сообщена посредством гибкого кабель-троса 11 с подводным навигационным модулем 12 и через соответствующие гибкие трубопроводы 13, 14 с агрегатами сбора 7, 8. По гибким трубопроводам осуществляется доставка твердого материала от агрегатов сбора на технологическую платформу, а транспортный трубопровод обеспечивает подъем минерального сырья до базового плавсредства. Технологическая платформа содержит бункер-дозатор со шнековым питателем, обеспечивающие соответственно промежуточное хранение запаса твердых полезных ископаемых и дозированную подачу минерального сырья в транспортный трубопровод. На базовом плавсредстве размещены центр оперативного управления оборудованием, автономная электрическая станция, а также комплекс оборудования для первичного обогащения горной массы, сброса хвостов и перегрузки полученного концентрата на транспортные суда-рудовозы. Подводный навигационный модуль служит для исследования ландшафта донной поверхности на пути движения агрегатов сбора. Система управления движением базового плавающего средства включает вспомогательные рулевые устройства 15 и выдвижные движительно-рулевые колонки 16, обеспечивающие динамическую стабилизацию судна. Вышка 17 предназначена для сборки трубных секций транспортного трубопровода глубоководного эрлифта.

Окончательный вывод о достоверности того или иного симуляционного метода может быть сделан путем сравнения расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными на полномасштабных натурных установках. Однако, «воплотить в жизнь» такие работоспособные установки невозможно без решения широкого спектра научно-исследовательских задач на этапе предпроектных исследований, подчиняющихся строгой научной стратегии.

Глубоководные насосные и эрлифтные гидроподъемы конкурентно способны по глубинам и производительностям и имеют общую часть по конструктивным и функциональным факторам. Особенность стратегии заключается в разработке универсальной пилотной установки по причине того, что в условиях неопределенности некоторых исходных данных и условий эксплуатации высока вероятность ошибочно выбрать первоначальный вариант гидроподъема ввиду обнаружения различного рода «подводных камней» [11]. В результате может оказаться, что лидирующий вариант или не рационален, или не реализуется в сложных условиях больших глубин. В этом случае, реализация запасного варианта будет дешевле и оперативнее. Поэтому целесообразно разработать универсальное методическое обеспечение и для насосного, и для эрлифтного варианта гидроподъема, тем более, что они базируются на модульном принципе.

Особое внимание следует уделить наиболее ответственному этапу проектирования, связанного с определением геометрических размеров экспериментальной пилотной установки. Ошибки при решении этой задачи уже на первом этапе проектирования могут свести на нет все последующие результаты, в том случае, если выбранная длина пилотной установки будет выбрана недостаточной для реализации, хотя бы одного, определяющего физического эффекта.

Предложенная стратегия базируется на полуэмпирической идеологии и **семи основополагающих принципах**.

Согласно принципу «Преемственности», методология дальнейшего усовершенствования теоретических и экспериментальных исследований гетерогенных сред должна базироваться на хорошо апробированных закономерностях однофазных потоков.

Принцип предварительного «Отсеивания» бесперспективных математических моделей на стадии предпроектных разработок заключается в следующем. Гидродинамические уравнения неразрывности, движения и энергии трехфазной твердожидкостногазовой смеси при обнулении расходных концентраций сначала твердой, а затем газовой фазы должны совпадать с указанными уравнениями сначала для газовоздушной смеси, а затем и для однородной жидкости.

Суть принципа «Золотой середины» можно трактовать следующим образом. Морские гидроподъемы характеризуются большой протяженностью транспортирующих трактов и значительной инерционностью управляющих воздействий. А необходимость регулирования расходных параметров при изменении эксплуатационных режимов приводит к тому, что стационарные режимы транспортирования добытого сырья априори не возможны. Поэтому возможности исследования эксплуатационных режимов выходят за рамки корректного использования стационарных моделей. В тоже время симуляция неустановившихся процессов связана с существенным усложнением математического аппарата. Поэтому, исследование транспортных процессов на данном этапе развития горной техники в рамках квазистационарных моделей является золотой серединой между необходимостью моделирования неустановившихся процессов при эксплуатации реальных установок, и возможностью качественного усовершенствования современных расчетных методов.

Принцип соответствия «Достоверного масштаба» гласит, что экспериментальные исследования на стадии экспериментальной добычи должны выполняться на пилотной установке, геометрические размеры которой позволяют гарантированно реализоваться основным определяющим полномасштабным физическим эффектом в протяженных трубопроводах глубоководных гидроподъемах.

Принцип «Модульности» разработки программно-алгоритмического обеспечения предусматривает уже на ранней стадии создания программного продукта предусматривает использование отдельных программных модулей как и для насосов, так и для эрлифтов. Это при инструментальном моделировании исследуемых процессов позволит существенно уменьшить затраты интеллектуального труда и времени. Данный принцип органично согласуется с идеями декомпозиции сложных эффектов и с возможностями последовательного расширения и наращивания функциональности системы.

Принцип «Обратной связи» гласит о том, что на всех этапах проектирования и эксплуатации гидроподъемов для транспортирования добытого сырья, игнорирование их кинематических, технологических и функциональных связей с агрегатом сбора и судна-носителя неизбежно приводит к нереализуемым на практике рабочим режимам. Наличие постоянной обратной связи с характеристиками гидроподъемов, агрегатами сборов (АС), а также изменением траекторий позиционирования судна-носителя есть обязательным условием корректности энергетической оптимизации параметров эксплуатационных режимов.

Согласно принципу «Приоритетности» первостепенное внимания разработчика следует уделять обеспечению наиболее благоприятному режиму АС в плане его работоспособности и функциональности. Специфика глубоководного добычного комплекса заключается в том, что недостатки конструкции АС неизбежно приводят к дополнительным проблемам во всех звеньях технологической цепочки, а в первую очередь в организации гидроподъема. Достаточно сказать, что снижение показателя «выемки» конкреции при разработке месторождения для обеспечения заданной производительности приведет к необходимости увеличения скорости АС. Это в свою очередь, обуславливает увеличение скорости перемещения трубного стана гидроподъема в толще морской воды, рост гидродинамических сопротивлений и дополнительных энергозатрат движителя судноносителя.

Сформированные принципы представлены в популярной форме и могут быть особенно полезными для разработчиков методологического и программного обеспечения, которые делают только первые шаги в этом направлении, и могут легко запутаться в многочисленных, часто противоречащих друг другу рекомендациях. Изложенные принципы являются, как бы, своеобразным стволom долгосрочной стратегии, направленные на определение рациональных, расходных, конструктивных и энергетических параметров установок, и автоматически отсекают, как и нереализуемые, так и нерациональные режимы гидроподъема.

Предлагаемая стратегия сводится к **восьми основным этапам**. Первые семь этапов посвящены организации вопросов на стадии проектирования МГК с использованием разработанной блочно-иерархической структуры [5, 7, 15]. Структура последовательно отражает моменты определения параметров напряженно-деформированного состояния трубного става [13], его нестационарных аэрогидродинамических характеристик [18, 19], а также конструктивных, расходных и энергетических параметров гидроподъемов с учетом обратной связи со стороны влияния подводного оборудования добычного блока и судна-носителя [15].

На первом этапе стратегии разработка полуэмпирической теории, базирующейся на получении основных уравнений гидродинамики трехфазных смесей, корректной схемы и способа замыкания математических моделей [10]. Тенденция усовершенствования математических моделей к увеличению степени их универсальности.

Второй этап заключается в разработке пилотной эталонной экспериментальной установке, которая позволяет получить достоверные как качественные, так и количественные (а не только сомнительные качественные) данные и закономерности, и в конечном итоге, установить реальные расходные характеристики глубоководных гидроподъемов релевантны опытной добыче ста тысяч тонн в год конкреций с глубины 6 км.

На третьем этапе систематические экспериментальные исследования на разработанной пилотной установке сконцентрированы на получении надежных замыкающих эмпирических зависимостей в критериальном виде. К числу замыкающих зависимостей, в первую очередь, относятся потери давления на трение в двух и трех фазных потоках, скорости устойчивого транспортирования твердого материала, с учетом изменения морфологии многофазной смеси, а также истинные газосодержания [9].

На четвертом этапе - многофакторный численный эксперимент по корректировке расчетных схем, математических моделей, алгоритмов и методик путем обеспечения удовлетворительной для данного класса задач сходимости расчетных и экспериментальных данных [11 - 15].

На пятом этапе - комплекс расчетов рациональных, конструктивных, расходных и энергетических параметров гидроподъемов при опытной добыче конкреций. Выбранные параметры должны гарантированно обеспечивать целостность и работоспособность гидроподъемов [11, 13]. Следует отметить, что выполненные ранее исследования и соответствующие проектные расчеты [11 - 15] начинались сразу на пятом этапе, не рассматривая всю архиважную информацию предыдущих обязательных этапов.

Для шестого этапа необходимо наладить тесное взаимодействие с технологами, обогатителями, специалистами по системам управления и установить возможные эксплуатационные режимы с учетом объективных ограничений со стороны агрегата сбора, судна-носителя и другого технологического оборудования [15]. Игнорирование этого этапа приводит к попытке оптимизации нереализуемых на практике рабочих режимов.

На седьмом этапе - энергетическая оптимизация конструктивных и расходных параметров гидроподъемов на стадии опытной добычи конкреций.

Восьмой этап разработанной стратегии обобщенно отвечает за организацию работ на стадии эксплуатации МГК. Этот этап может быть проиллюстрирован с помощью функционально-оптимизационной системы экспериментальной АСУТП [15]. Предметом этой схемы является согласование технологических звеньев морского горнодобывающего комплекса с помощью экспериментальной системы управления АС [1-3, 6, 15], а также динамическим позиционированием судна-носителя и технологической платформы.

Восьмой этап в обозримом будущем предусматривает переход к промышленной добычи 1-3 млн. тонн в год конкреций с глубины 6-7 км. Данный этап требует информационной поддержки о взаимодействии гидроподъема с основными технологическими и функциональными блоками, связанные с очисткой добытого сырья от ила, дробления твердого, обогащением на судноносителе, перегрузкой сырья на базовое плавсредство и другими операциями. Особое внимание требуется уделить технологии экологической безопасности при транспортировании «хвостов» обогащения, что непрерывно связано с процессом гидроподъема добытого на дне сырья на морскую поверхность.

Изложенная стратегия предусматривает развитие и модернизацию комплекса технических средств, при накоплении достаточного опыта эксплуатации промышленных гидроподъемов. При этом целесообразно корректировать и основной показатель установки «производительность по твердому материалу» при усовершенствовании технологии добычи и соответствующего оборудования.

Так, на стадии предпроектных исследований теоретическая производительность по твердому материалу предварительно назначается по требованию обеспечения рентабельности добычи твердых полезных ископаемых.

На стадии эксплуатации фактическая производительность меньше теоретической ввиду целого ряда ограничений со стороны АС и всей технологической цепочки, а также зависит от ландшафта донной поверхности, плотности залегания конкреций и др. Более тщательный анализ эксплуатационных режимов предполагает достижения **трех последовательных уровней** развития техники и технологии. На первом уровне величина фактической производительности определяется максимально возможной для выбранных технологии и конфигурации технических средств [13, 15].

На втором уровне величина рационального массового расхода конкреций должна соответствовать максимальному КПД гидроподъема [15].

На третьем уровне при достижении должного развития АСУТП производительность определяется по минимальной удельной себестоимости добытого сырья [15]. При изменении условий эксплуатации величина фактической производительности корректируется согласно целям конкретного этапа освоения месторождения.

Третий уровень связан с развитием АСУТП и заключается в прогнозировании возможных аварийных ситуаций, в адаптации параметров изменения продолжительности работы подводного оборудования и диагностики работоспособности технологического оборудования. Другими словами, третий уровень эксплуатации непосредственно связан не только с гидроподъемом, но и с функционированием добычного блока и АСУТП и должен рассматриваться только в рамках системного подхода.

Авторы выражают уверенность, что изложенная стратегия будет способствовать на международном уровне координации усилий разработчиков национальных агентств разных стран в освоении богатств минерального потенциала Мирового океана.

Выводы

1. Разработана прогрессивная долгосрочная стратегия создания глубоководных гидроподъемов в составе судовых добычных комплексов, проиллюстрированная с использованием интеллектуального алгоритма проектных исследований и анализа эксплуатационных режимов. Парадигма предложенной стратегии заключается в том что при выборе проектных конструктивных, расходных и энергетических параметров установок обязательно принимается во внимание основные регулировочные характеристики эксплуатационных режимов для обеспечения высоких технико-экономических показателей.

2. Разработаны прогрессивные методологические принципы новой стратегии создания гидроподъемов обеспечивающие преемственность уже апробированных теоретических методов исследований и новых экспериментальных результатов. Предложенные принципы являются основой для разработки теории оптимального проектирования уникальных гидроподъемов во взаимодействие с основным подводным и надводным технологическим оборудованием, путем отсеивания бесперспективных разработок.

3. На заключительной стадии находится разработка расчетной части ТЗ на создание эскизного проекта эталонной пилотной экспериментальной универсальной установки, для определения расходных параметров насосного и эрлифтного вариантов гидроподъема. Геометрические размеры и её тактические характеристики гарантированно обеспечивают объективную возможность осуществления корректных физических и численных экспериментов для моделирования исследуемых процессов на стадии опытной добычи полиметаллических конкреций с глубины 6 км.

4. Определены основные подходы и соответствующие критерии выбора фактической производительности на трех уровнях развития технологий гидроподъема и техники смежных областей в зависимости от целей конкретной стадии эксплуатации глубоководных месторождений.

Список использованных источников

1. Пат. 89861 Україна, МПК E21C50/00, E21C45/00, F04F1/18, F04F1/20, E02F7/00, B65G53/00. Спосіб керування роботою ерліфта / Кириченко С.О., Євтєєв В.В., Кириченко В.Є., Романюков А.В., Татуревич А.А.; заявник та патенто-власник Національний гірничий університет. – № а200805542; заявл. 29.04.08; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.
2. Пат. 2460883 Российская Федерация, МПК E21C50/00. Способ непрерывного сбора полезных ископаемых подводных месторождений и многофункциональная система для его реализации / Пивняк Г.Г., Франчук В.П., Кириченко Е.А., Егурнов А.И., Евтеев В.В.; заявитель и патентообладатель Национальный горный университет. – № 2008141576/03; заявл. 16.10.08; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25.
3. Пат. 97283 Україна, МПК E21C50/00, F04F1/00, F04F1/20, F04D13/12, E21B43/16, G05B13/00. Технології запуску, інтелектуального управління роботою та зупинки морського гірничовидобувного комплексу / Ткачов В.В., Кириченко С.О., Кириченко В.Є., Шворак В.Г., Євтєєв В.В.; заявник та патентовласник Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – № а201001559; заявл. 15.02.10; опубл. 25.01.12, Бюл. № 1.
4. Pivnyak, G.G. Problems of deep-water hydraulic lifting of solid mineral resources / G.G. Pivnyak, E.A. Kyrychenko, V.P. Franchuk // New technologies in mining 21st World mining congress – Krakow, 2008. – P. 49–57.
5. Кириченко, Е.А. Определение проектных параметров гидротранс-портной установки на базе экономико-математической модели / Е.А. Кириченко, И.М. Чеберячко, В.Г. Шворак, В.В. Евтеев // Геотехническая механика: матер. III научн.-техн. конф. молодых ученых “Геотехнические проблемы разработки месторождений”. – Днепропетровск: ИГТМ, 2006. – Вып. 62. – С. 177–183.
6. Пат. 86471 Україна, МПК E21C50/00, F04F1/00. Технологія керування комплексом розробки підводних родовищ корисних копалин / Кириченко С.О., Шворак В.Г., Євтєєв В.В., Хоменко В.Л.; заявник та патентовласник Національний гірничий університет. – № а200706512; заявл. 11.06.07; опубл. 27.04.09, Бюл. № 8.
7. Кириченко, Е.А. Блочно-иерархический подход к разработке технологии управления глубоководными добычными комплексами / Е.А. Кириченко, В.И. Самуся, В.Е. Кириченко // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. – № 80. – С. 101–109.
8. Kyrychenko, Y. Research of dynamic processes in deep-water pumping hydrohoists lifting two-phase fluid / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Romanyukov // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – CRC Press/Balkema, Taylor Francis Group, London, 2011. – PP. 115–124. – ISBN 978-0-415-68877-2.
9. Кириченко, Е.А. Анализ известных зависимостей для определения критических скоростей движения гидросмеси / Е.А. Кириченко, И.М. Чеберячко, В.Г. Шворак // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2004. – Вып. 20 (61). – С. 135–141.
10. К вопросу замыкания трехскоростной модели трехфазного течения применительно к расчету глубоководного эрлифта / Е.А. Кириченко, А.В. Романюков, В.В. Евтеев, В.Е. Кириченко // Зб. наук. праць Національного гірничого університету. – 2007. – № 29. – С. 92–98.
11. Кириченко, Е.А. Теория и алгоритмы расчета снарядного течения в эрлифте: [монография] / Е.А. Кириченко, В.Е. Кириченко, В.В. Евтеев. – Д.: Национальный горный университет, 2013. – 263 с. – ISBN 978-966-350-398-1.
12. Моделирование динамических процессов в глубоководных пневмотранспортных системах: [монография] / Е.А. Кириченко, О.Г. Гоман, В.Е. Кириченко, А.В. Романюков. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 268 с. – ISBN 978-966-350-350-9.
13. Кириченко, Е.А. Механика глубоководных гидротранспортных систем в морском горном деле: [монография] / Евгений Алексеевич Кириченко. – Д.: Национальный горный университет, 2009. – 344 с. – ISBN 978-966-350-170-3.
14. Динамика глубоководных гидроподъемов в морском горном деле: [монография] / Е.А. Кириченко, В.Г. Шворак, В.Е. Кириченко, В.В. Евтеев. – Д.: Национальный горный университет, 2010. – 259 с. – ISBN 978-966-350-231-1.
15. Основы проектирования систем гидротранспорта полиметаллических руд Мирового океана [Текст]: моногр. / Е.А. Кириченко, О.Г. Гоман, В.Е. Кириченко, В.В. Евтеев. – Д.: Национальный горный университет, 2014. – 611 с.
16. Kyrychenko, E.A. The technology of polymetallic concretions extraction and transporting / Kyrychenko E.A., Samusya V.I., Kyrychenko V.E. // Innovations in Non-Blasting Rock Destruction, Freiberg 2008. – P. 169–178.
17. Kyrychenko, Y. Advanced method for calculation of deep-water airlifts and the special software development [Text] / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Taturevych // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, 2011. – P. 215–222. ISBN 978-0-415-68877-2.
18. Гоман, О.Г. Экспериментальные исследования аэроупругой неустойчивости элементов става [Текст] / О.Г. Гоман, И.Ю. Графский, Е.А. Кириченко // Сб. науч. тр. НГАУ. – Днепропетровск, 1998. – № 2. – С. 400–417.
19. Гоман, О.Г. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик элементов эрлифтных гидроподъемов [Текст] / О.Г. Гоман, И.Ю. Графский, Е.А. Кириченко // Збагачення корисних копалин. – 1999. – Вып. 4 (45). – С. 46–54.

АННОТАЦИЯ

Путем обобщения новых закономерностей и известных результатов, полученных данным авторским коллективом, на протяжении более 40 лет разработана долгосрочная многоэтапная стратегия создания глубоководных гидроподъемов в составе морских добычных комплексов. Предложенная стратегия базируется на прогрессивных методологических принципах определения рациональных проектных и эксплуатационных параметров установок и инновационных способах повышения эффективности гидроподъемов в сложных условиях больших глубин. Предложенная стратегия является мощным инструментом изысканий на всех стадиях проектирования и эксплуатации, а также обеспечивает правильный выбор наиболее обоснованного пути к достижению цели. Деформация предложенной стратегии приводит к стремительной деvaluации практических результатов.

Ключевые слова: *глубоководный гидроподъем, глубоководная добыча, трубопроводный став, гидро-транспорт, насос, эрлифт, твердые полезные ископаемые, судовой добычной комплекс.*

ABSTRACT

By generalizing new patterns and known results obtained by this team of authors, a long-term multi-stage strategy for creating deep-water hydraulic lifts as part of offshore production complexes has been developed for more than 40 years. The proposed strategy is based on progressive methodological principles for determining rational design and operating parameters of installations and innovative ways to increase the efficiency of hydraulic lifting in difficult conditions of great depths. The proposed strategy is a powerful exploration tool at all stages of design and operation, and also ensures the correct choice of the most reasonable way to achieve the goal. The deformation of the proposed strategy leads to a rapid devaluation of practical results.

Key words: *deep-water hydraulic hoist, deep-water mining, pipeline, hydrotransport, pump, airlift, solid minerals, ship mining complex*

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Колосовим Д.Л.

ОБЧИСЛЕННЯ НАЙБІЛЬШОГО ТИСКУ ТА КООРДИНАТ МАКСИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ ДИСКОВОГО ГАЛЬМА

А.Г. Моня

Україна, Дніпро, Національна металургійна академія України
mag121066@gmail.com, ORCID 0000-0002-6073-9558

CALCULATION OF THE HIGHEST PRESSURE AND COORDINATES OF A MAXIMUM TEMPERATURE ON A DISC BRAKE WORKING SURFACE

A. Monia

Ukraine, Dnipro, National metallurgical academy of Ukraine
mag121066@gmail.com, ORCID 0000-0002-6073-9558

Мета. Для вибраних шляхом математичного моделювання раціональних параметрів основних елементів дискового гальма шахтного локомотива з багатосекторним гальмовим диском обчислити координати максимальної температури та найбільший тиск на робочій поверхні.

Методика дослідження. Для знаходження координат максимальної температури і найбільшого тиску на робочій поверхні дискового гальма з багатосекторним гальмовим диском при вибраних раціональних параметрах було проведено математичне моделювання температури і тиску на поверхні тертя.

Результати дослідження. На основі математичного моделювання знайдені максимальна температура та її координати і найбільший тиск на робочій поверхні дискового гальма з багатосекторним гальмовим диском. Показано, що максимальна температура на поверхні тертя основних елементів дискового гальма з вибраними параметрами в специфічних шахтних умовах при найбільш несприятливих умовах роботи не перевищить допустиме значення.

Наукова новизна. Розроблено математичну модель гальмування шахтного локомотива дисковим гальмом, що створює на осі колісної пари пульсуючий гальмовий момент, який залежить від її кутової координати, з урахуванням нелінійної залежності коефіцієнта зчеплення від відносного ковзання, на базі якої встановлені параметри гальмового моменту, що дозволяють поліпшити гальмові характеристики.

Практичне значення. Розроблено науково обґрунтовану інженерну методику вибору раціональних параметрів дискового гальма шахтного локомотива та визначення динамічних і кінематичних характеристик привода шахтного локомотива при гальмуванні дисковим гальмом із багатосекторним диском. Отримано аналітичний розв'язок задачі нестационарної теплопровідності про знаходження температурного поля, що виникає в гальмовому диску та фрикційних накладках дискового гальма шахтного локомотива при виконанні накладок у вигляді кільцевого сектора, на підставі якого знайдена залежність відносної температури на поверхні тертя гальмового диска від часу при циклічному гальмуванні.

Ключові слова: *фрикційна пара, коефіцієнт зчеплення, дискове гальмо, гальмовий момент, колесо локомотива, рейкова колія.*

Introduction. Force of adhesion of wheels of the locomotive with rails depends both on a condition of a railway line, and on conditions of interaction of frictional couple a wheel rail [1]. Much attention is paid to research of implementation process of the greatest possible force of adhesion. The key parameter characterizing the force of adhesion of wheels with rails is the coupling coefficient. The brake moment created on a wheel by a wheel and block brake depends on the speed of the movement of the mine locomotive, a condition of a railway line and heating of a brake shoe that does not allow to implement possible coefficient of coupling fully. The disk brakes applied in transport systems have no this shortcoming [2].

The technique of the choice of the constant brake moment enclosed to an axis of wheel couple is given in work [3]. For the purpose of prevention of failure of coupling and the movement of wheels the skid (at the same time force of adhesion sharply falls and flats on wheels are formed) for miner electric locomotives recommends to implement 80% of the greatest possible brake moment.

The strongest impact on reliability of work of a brake mechanism is exerted by temperature condition. Underestimation of the thermal phenomena in brakes of modern machines can lead to a deviation of their performance data from rated and even to accident [2]. In relation to brake mechanisms of mine locomotives safety issues are on the first place. The brake overheating above maximum permissible temperature can become a cause of explosion of methane-air mixture and death of people. Thus, thermal calculation of elements of a brake mechanism of any machine working in mine - one of the most important tasks at its designing.

In the monograph [4] the problem of heating and cooling of a disk brake of mine hoist engines at the coefficient of mutual overlapping of a disk and frictional pads of blocks equal to unit is considered.

Problem Statement. Calculate the coordinates of the maximum temperature and maximum pressure on the working surface for the rational parameters of the main elements of the disc brake of a mine locomotive with a multi-sector brake disc selected by mathematical modeling.

Solving of the Problem. Let's consider the choice of rational parameters of a disk brake with a multisector brake disk on the example of the mine E10 locomotive. Considering design features of an eight-wheel mine electric locomotive of E10, it is reasonable to place a disk brake on a shaft of the engine of each drive cart. It will allow to create two disk brakes the brake moment on all four axes. At placement of disk brakes on axes of four wheel couples their quantity would double. Besides, the necessary brake moment on an axis of wheel couple M_t is significantly more than necessary brake moment on an engine shaft M'_t ($M_t = uM'_t/2$ where u – a gear ratio of a reducer). Therefore, it would lead to increase in the geometrical sizes and a moment of inertia of brake disks, or to increase in their quantity, i.e. would complicate a design of brake system and would increase its cost.

When calculating frictional devices, the friction coefficient is usually considered as a constant, disregarding its dependence from changing in the course of work of temperature, speed and pressure. Take its smallest possible value for the considered frictional couple for a calculated value of coefficient of friction under existing conditions of work [2].

At determination of the geometrical sizes of a brake disk the internal radius of a working zone is chosen minimum admissible for constructive reasons, and external radius as it that during creation of the maximum brake moment pressure in a working zone did not exceed admissible value for considered frictional couple [2].

Let's accept quantity of the sectors of a brake disk made in turn of steel 45 HB 415 and the Ч 15-32 HB 200 gray cast iron, equal to eight, pads of the brake shoes made of frictional material 6KH-1 (press material of cold formation) [5] - in the form of ring sector with the central corner $\alpha = \pi/4$. Friction coefficients for the specified couples of materials of a disk and frictional pads are respectively equal to 0,535 and 0,41 [2].

Let's define the maximum necessary moment of braking on an engine shaft M'_{tmax} in the assumption that on the locomotive steel wheels are established. Proceeding from quantity of sectors of a brake disk and a form of frictional pads, we come to a conclusion that dependence of the pulsing braking moment on an engine shaft from the angular coordinate of a shaft of the engine φ_1 can with sufficient degree of accuracy be described by expression

$$\begin{aligned} M'_t &= 2(M_0 - A \sin(n\varphi_2))/u = M'_0 - A' \sin(n'\varphi_1) = \\ &= M'_0 (1 - A^* \sin(n'\varphi_1)) = M'_0 \left(1 - \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \sin(n'\varphi_1) \right) \quad (\mu_1 > \mu_2), \end{aligned} \quad (1)$$

where M_0, M'_0 – constant components of the moments of braking respectively on an axis of wheel couple and on an engine shaft; n, n' – numbers of the periods of a sinusoid for one turn according to an axis of wheel couple and a shaft of the engine; φ_2 – angular coordinate of an axis of wheel couple; A, A' – amplitudes of fluctuations of variable components of the moments of braking on an axis of wheel couple and on an engine shaft; $A^* = A'/M'_0$; μ_1, μ_2 – friction coefficients for two couples of materials of a disk and frictional pads.

Let's integrate taking into account a formula (1) system of differential equations [5]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{m_c}{4} - m_3 - m_4 \right) \ddot{y} &= -[C_{y3}(y - y_3) + \beta_{y3}(\dot{y} - \dot{y}_3) + C_{y4}(y - y_4) + \beta_{y4}(\dot{y} - \dot{y}_4)]; \\ m_3 \ddot{y}_3 &= C_{y3}(y - y_3) + \beta_{y3}(\dot{y} - \dot{y}_3) + F_3(S_3); \\ m_4 \ddot{y}_4 &= C_{y4}(y - y_4) + \beta_{y4}(\dot{y} - \dot{y}_4) + F_4(S_4); \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 &= -[C_{\varphi3}(\varphi_3 - \varphi_2) + \beta_{\varphi3}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + rF_3(S_3)]; \\ I_4 \ddot{\varphi}_4 &= -[C_{\varphi4}(\varphi_4 - \varphi_2) + \beta_{\varphi4}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_2) + rF_4(S_4)]; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 &= C_{\varphi3}(\varphi_3 - \varphi_2) + \beta_{\varphi3}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + C_{\varphi4}(\varphi_4 - \varphi_2) + \beta_{\varphi4}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_2) - uM'_t/2, \end{aligned}$$

where y, y_3, y_4 – linear movements of the locomotive and corresponding wheels; $\dot{y}, \dot{y}_3, \dot{y}_4$ – linear speeds; $\ddot{y}, \ddot{y}_3, \ddot{y}_4$ – linear accelerations; $F_3 = \psi_3(S_3)m_l g/8, F_4 = \psi_4(S_4)m_l g/8$ – forces of adhesion of the corresponding wheels; $\psi_3 = k_1 \left[th(k_2 S_3) - k_3 S_3 + k_4 S_3^3 \right], \psi_4 = k_1 \left[th(k_2 S_4) - k_3 S_4 + k_4 S_4^3 \right]$ – coefficients of coupling of the corresponding wheels (in the mode of braking accept negative values); k_1, k_2, k_3, k_4 – numerical coefficients of the mechanical characteristic of frictional couple; $S_3 = (\dot{\phi}_3 r - \dot{y}_3)/\dot{y}_3, S_4 = (\dot{\phi}_4 r - \dot{y}_4)/\dot{y}_4$ – relative slidings of the corresponding wheels; $\ddot{\phi}_2, \ddot{\phi}_3, \ddot{\phi}_4$ – angular accelerations of an output shaft of a reducer and the corresponding wheels; r – radius of a circle of swing of wheels; m_l – mass of the locomotive; g – acceleration of gravity; M'_t – the braking moment on an engine shaft.

When calculating we will use geometrical, weight, elastic and dissipative and rigid characteristics of elements of a mine electric locomotive of E10. Let's accept the mass of structure to be equal to the mass of the locomotive, i.e. $m_c = m_l = 10^4$ kg. Let's set the initial speed of the engine $v_0 = 1$ m/s. Numerical coefficients of the mechanical characteristic of frictional couple k_1, k_2, k_3, k_4 we will take for a case when rails are sanded [6]. Let's receive that failure of coupling in the course of braking will happen at $M'_0 \geq 766$ N·m. Thus, the maximum value of a constant component of the moment of braking on an engine shaft $M'_{0max} = 766$ N·m. The maximum instantaneous value of the necessary brake moment on an engine shaft

$$M'_{tmax} = M'_{0max} \left(1 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \right) \quad (\mu_1 > \mu_2).$$

At the chosen materials of sectors of a brake disk and frictional pads $M'_{tmax} = 867$ N·m.

Let's consider a disk brake with one brake disk. For constructive reasons we accept the internal radius of a working zone of a disk $R_1 = 9,3 \cdot 10^{-2}$ m. Let's determine the external radius of a working zone of a disk R_2 . The maximum pressure upon friction surfaces arising during creation of the maximum brake moment M'_{tmax}

$$p_{max} = \frac{M'_{tmax}}{2\mu_{naim} R_e F} = [p],$$

where μ_{naim} – the smallest possible value of coefficient of friction for couple of materials of a disk and frictional

pads under existing conditions works; $R_e = \frac{2(R_2^3 - R_1^3)\alpha}{3(R_2^2 - R_1^2)\sqrt{2(1 - \cos \alpha)}}$ – equivalent radius of friction [2];

$F = \alpha(R_2^2 - R_1^2)/2$ – area of contact of a pad and disk; $[p]$ – the maximum admissible pressure in disk brakes for the considered frictional couple.

After transformations we will receive:

$$R_2 = \sqrt[3]{\frac{6 M'_{tmax} \sqrt{2(1 - \cos \alpha)}}{\mu_{naim} \alpha [p] \pi} + R_1^3}.$$

We accept $\mu_{naim} = 0,38$ (taking into account the dependences given in work [7]); $[p] = 8,29 \cdot 10^5$ N/m² [2]. Then $R_2 = 1,8 \cdot 10^{-1}$ m.

In work [8] it is shown that the maximum temperature on a surface of friction of a disk reached at the end of braking is stabilized, since the third cycle including braking to a full stop and dispersal. Let's expect temperature surfaces of friction of a brake disk at the end of the third braking to a full stop. We will determine dimensionless temperature on a friction surface in the course of heating by a formula [8]

$$\theta_{1,2}(\rho, 0, Fo) = \frac{2\pi Bi_{1,2}}{Bi_{1,2}^2 + 1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{0,1,2}(v_n \rho) (2 + \pi \rho_1 V_{0,1,2}(\rho_1 v_n))}{v_n (4 - \pi^2 \rho_1^2 V_{0,1,2}(\rho_1 v_n))} \times \\ \times \int_0^{Fo} Ki(Fo - \tau) \varphi_{1,2}(v_n, \tau) d\tau,$$

where $\theta_{1,2} = (T_{1,2} - T_n) / (T_d - T_n)$ – dimensionless temperature (hereinafter the index 1 belongs to a disk, 2 – to frictional pads); $T_{1,2}$ – temperature; T_n – reference temperature of a disk and pads; T_d – admissible temperature on a friction surface; $\rho = r/R_2$; $\rho_1 = R_1/R_2$; $Fo = a_1 t / R_2^2$ – Fourier's criterion (dimensionless time); $a_{1,2} = \lambda_{1,2} / c_{1,2} \gamma_{1,2}$ – coefficients of heat diffusivity of a disk and frictional pads respectively; $\lambda_{1,2}$ – heat conductivity coefficients; $c_{1,2}$ – specific heat capacities; $\gamma_{1,2}$ – density; t – time; $Bi_{1,2} = \sigma_{1,2} R_2 / \lambda_{1,2}$ – Biot's criterion; $\sigma_{1,2}$ – heat emission coefficients; $V_{01,2}(v_n \rho) = (Bi_{1,2} Y_0(v_n) - v_n Y_1(v_n)) J_0(v_n \rho) + (v_n J_1(v_n) - Bi_{1,2} J_0(v_n)) Y_0(v_n \rho)$ – a kernel of final integral transformation of Hankel on a variable ρ ; Y_0, Y_1, J_0, J_1 – Bessel functions; v_n – the eigenvalues defined from the equation

$$(v_n J_1(v_n \rho_1) + Bi_{1,2} J_0(v_n \rho_1)) (v_n Y_1(v_n) - Bi_{1,2} Y_0(v_n)) - \\ - (v_n J_1(v_n) - Bi_{1,2} J_0(v_n)) (v_n Y_1(v_n \rho_1) + Bi_{1,2} Y_0(v_n \rho_1)) = 0;$$

$Ki = q(t) R_2 / (T_d - T_n) \lambda_1$ – Kirpichev's criterion; $q(t) = \frac{M'_t \omega_n}{t_t F} \int_0^t \left(1 - \frac{\tau}{t_t}\right) d\tau$ – thermal flow; ω_n – the angular speed of a disk in an initial instant; t_t – braking time;

$$\varphi_1 = \alpha_{tp} \kappa e^{-v_n^2 Fo} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi Fo}} - (1 - \kappa) Bi_1 e^{\kappa^2 Bi_1^2 Fo} \operatorname{erfc}((1 - \kappa) Bi_1 \sqrt{Fo}) \right); \quad \varphi_2 = \frac{(1 - \alpha_{tp}) \sqrt{a} e^{-a v_n^2 Fo}}{\lambda \sqrt{\pi Fo}};$$

$\alpha_{tp} = \sqrt{\lambda_1 c_1 \gamma_1} / (\sqrt{\lambda_1 c_1 \gamma_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \gamma_2})$ – the coefficient of distribution of thermal flows showing what part of heat generated at friction is taken away in a brake disk; $\kappa = \alpha / 2\pi$, $\operatorname{erfc} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\tau^2} d\tau = 1 - \operatorname{erf} x$;

$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau$ – integral of probabilities $a = a_2 / a_1$; $\lambda = \lambda_2 / \lambda_1$.

Dependence of dimensionless temperature on a surface of friction of a brake disk from dimensionless radius in a final instant has a maximum in a point $\rho_0 = 0,78$.

During cooling we will determine dimensionless temperature on a surface of friction from a ratio which conclusion is similar provided in the monograph [4]:

$$\theta_{1,2}(\rho, 0, Fo) = \frac{2\pi^2}{Bi_{1,2}^2 + 1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{0,1,2}(v_n \rho)}{4 - \pi^2 \rho_1^2 V_{0,1,2}(v_n \rho_1)} \int_0^{Fo} \eta_{1,2}(v_n, \tau) d\tau + U_{1,2}, \\ \eta_{1,2} = c_{1,2} \exp \left[- (d_{1,2} - Bi_{1,2}^2) \right] \left(\frac{\exp(-d_{1,2} Fo)}{\sqrt{\pi Fo}} - \sqrt{d_{1,2}} \exp(d_{1,2} Fo) - 1 \right),$$

where $c_1 = U_1 Bi_1$; $c_2 = \sqrt{a} U_2 Bi_2$; $U_{1,2} = (T_{k1,2} - T_n) / (T_d - T_n)$. At repeated heating instead of T_n it is necessary to substitute the maximum temperature on a surface of friction of a disk at the end of the cooling period. $T_{k1,2}$ – the maximum temperature at the end of the heating period on a friction surface; $d_1 = v_n^2$; $d_2 = a v_n^2$. Temperature is defined from a ratio

$$T_{1,2} = \theta_{1,2} (T_d - T_n) + T_n.$$

Calculation is feasible in the assumption that the disk is not broken into sectors and is made either of steel 45 HB 415, or of the CЧ 15-32 HB 200 gray cast iron at the following input datas: $\omega_n = 201,39$ rad/s (corresponds to the linear speed of the engine $\dot{y} = 5$ m/s); braking time $t_t = 21$ s; dispersal time $t_p = 29$ s; $T_n = 25$ °C; $T_d = 240$ °C. For the disk made of steel 45 HB 415, $a_1 = 1,3 \cdot 10^{-5}$ m²/s; $a_2 = 6,7 \cdot 10^{-8}$ m²/s; $\lambda_1 = 4,5 \cdot 10^1$ Wt/(m·°C); $\lambda_2 = 5,1 \cdot 10^{-1}$ Wt/(m·°C); $c_1 = 461$ J/(kg·°C); $c_2 = 963$ J/(kg·°C); $\sigma_1 = 44$ Wt/(m·°C); $\sigma_2 = 8$ Wt/(m·°C). For the disk made of the CЧ 15-32 HB 200 gray cast iron, $a_1 = 1,7 \cdot 10^{-5}$ m²/s; $\lambda_1 = 6,3 \cdot 10^1$ Wt/(m·°C); $c_1 = 502$ J/(kg·°C); $\sigma_1 = 44$ Wt/(m·°C). Then the maximum temperature at the end of the third braking on a surface of friction of a brake disk from steel 45 HB 415 $T_1 = 198$ °C, and on a surface of friction of a brake disk from the CЧ 15-32 HB 200 gray cast iron – $T_1 = 206$ °C. Thus, taking into account the dependences given in work [7] in specific mine conditions at the end of the third braking to a full stop the maximum temperature on a surface of friction of a multisector disk will not exceed admissible value.

Conclusions.

1. On the basis of mathematical modeling of rational parameters of basic elements of a disk brake of the mine locomotive with a multisector brake disk the maximum temperature and the largest pressure on its working surface are determined.
2. It is established that at the chosen parameters of a disk brake with a multisector disk in specific mine conditions at the end of the third braking to a full stop the maximum temperature on a surface of friction will make no more than 206 °C, i.e. will not exceed admissible value.

References

1. Тормозные устройства шахтных локомотивов: монография / И.А. Таран, А.В. Новицкий; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 205 с.
2. Александров М.П. Грузоподъемные машины: учебн. [для студ. высш. учебн. зав.] / М.П. Александров – М.: Высш. шк., 2000. – 552 с.
3. Проців В. В. Динамічна модель гальмівних систем, що реалізують гальмівну силу в контактї колеса та рейки / В. В. Проців, О. Є. Гончар // 36. наук. праць НГУ. – 2010. – № 34. – Т. 2. – С. 160 – 171.
4. Белобров В.И. Тормозные системы шахтных подъемных машин / В.И. Белобров, В.Ф. Абрамовский, В.И. Самуся – К.: Наук. думка, 1990. – 176 с.
5. Моня А.Г. Выбор рациональных параметров дискового тормоза шахтного локомотива на основе математического моделирования давления и температуры на поверхности трения / А.Г. Моня // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2006. – № 12. – С. 66-69.
6. Проців В.В. Экспериментальное определение характеристик сцепления шахтного локомотива в режиме торможения / В.В. Проців, А.Г. Моня // Геотехн. механіка: міжвід. зб. наук. праць. – 2002. – Вип. 40. – С. 231-236.
7. Сердюк А.А. Температурные и фрикционные характеристики дискового тормоза в условиях повышенного содержания пыли и влаги / А.А. Сердюк, А.Г. Моня // Сб. науч. тр. НГУ. – 2003. – Т. 2, №17. – С. 246–250.
8. Моня А.Г. Интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности для определения тепловой нагруженности дискового тормоза шахтного локомотива / А.Г. Моня // Наук. вісн. НГУ. – 2012. – №. 3. – С. 86–91.

АННОТАЦИЯ

Цель. Для выбранных путем математического моделирования рациональных параметров основных элементов дискового тормоза шахтного локомотива с многосекторным тормозным диском вычислить координаты максимальной температуры и наибольшее давление на рабочей поверхности.

Методика исследования. Для нахождения координат максимальной температуры и наибольшего давления на рабочей поверхности дискового тормоза с многосекторным тормозным диском при выбранных оптимальных параметрах было проведено математическое моделирование температуры и давления на поверхности трения.

Результаты исследования. На основе математического моделирования найдены максимальная температура и её координаты и наибольшее давление на рабочей поверхности дискового тормоза с многосекторным тормозным диском. Показано, что максимальная температура на поверхности трения основных элементов дискового тормоза с выбранными параметрами в специфических шахтных условиях при наиболее неблагоприятных условиях работы не превысит допустимое значение.

Научная новизна. Разработана математическая модель торможения шахтного локомотива дисковым тормозом, создающим на оси колесной пары пульсирующий тормозной момент, который зависит от ее угловой координаты, с учетом нелинейной зависимости коэффициента сцепления от относительного скольжения, на базе которой установлены параметры тормозного момента, позволяющие улучшить тормозные характеристики.

Практическое значение. Разработана научно обоснованная инженерная методика выбора рациональных параметров дискового тормоза шахтного локомотива и определения динамических и кинематических характеристик привода шахтного локомотива при торможении дисковым тормозом с многосекторным диском. Получено аналитическое решение задачи нестационарной теплопроводности о нахождении температурного поля, возникающего в тормозном диске и фрикционных накладках дискового тормоза шахтного локомотива при выполнении накладок в виде кольцевого сектора, на основании которого найдена зависимость относительной температуры на поверхности трения тормозного диска от времени при циклическом торможении.

Ключевые слова: *фрикционная пара, коэффициент сцепления, дисковый тормоз, тормозной момент, колесо локомотива, рельсовый путь.*

ABSTRACT

Objective. Calculate the coordinates of the maximum temperature and the maximum pressure on the working surface for the rational parameters of the main elements of the disc brake of a mine locomotive with a multi-sector brake disc selected by mathematical modeling.

Research Methodology. To find the coordinates of the maximum temperature and maximum pressure on the working surface of a disc brake with a multi-sector brake disc at the selected optimal parameters, mathematical modeling of temperature and pressure on the friction surface was carried out.

Research Results. On the basis of mathematical modeling, the maximum temperature and its coordinates and the highest pressure on the working surface of a disc brake with a multi-sector brake disc are found. It is shown that the maximum temperature on the friction surface of the main elements of the disc brake with the selected parameters in specific mine conditions under the most unfavorable operating conditions will not exceed the permissible value.

Scientific Novelty. A mathematical model has been developed for braking a mine locomotive with a disc brake, which creates a pulsating braking moment on the wheelset axis, which depends on its angular coordinate, taking into account the nonlinear dependence of the adhesion coefficient on relative slip, on the basis of which the parameters of the braking torque are specifications.

Practical Significance. A scientifically substantiated engineering method has been developed for selecting rational parameters of a disc brake for a mine locomotive and determining the dynamic and kinematic characteristics of a mine locomotive drive when braking with a disc brake with a multi-sector disc. An analytical solution to the problem of unsteady thermal conductivity is obtained on finding the temperature field arising in the brake disc and friction linings of a disc brake of a mine locomotive when linings are made in the form of an annular sector, on the basis of which the dependence of the relative temperature on the friction surface of the brake disc on time is found, with cyclic braking.

Keywords: *frictional couple, coupling coefficient, disk brake, brake moment, locomotive wheel, railway line.*

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доц. Ципленковим Д.В.

ПРОБЛЕМИ ТЕОРІЇ ТА МЕТОДИКИ ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ Й ВИХОВАННЯ

УДК 004.9:744

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИКЛАДАННЯ ГРАФІЧНИХ ДИСЦИПЛІН В УМОВАХ КОМП'ЮТЕРІЗАЦІЇ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ

Т.С. Савельєва¹, Д.С. Пустовой², І.М. Мацюк³

¹Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м.Дніпро, Україна
savelieva.t.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-6750-8675

²Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м.Дніпро, Україна
pustovoi.d.s@nmu.one, ORCID 0000-0002-7040-0005

³Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м.Дніпро, Україна
matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID 0000-0002-0861-0933

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF TEACHING GRAPHIC DISCIPLINES IN THE CONDITIONS OF COMPUTERIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS

T. Savelieva¹, D. Pustovoi², I. Matsyuk³

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
savelieva.t.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-6750-8675

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
pustovoi.d.s@nmu.one, ORCID 0000-0002-7040-0005

³Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID 0000-0002-0861-0933

Мета роботи. Дослідження можливостей поєднання традиційних та комп'ютерних методів викладання графічних дисциплін для підвищення рівня технічних знань студентів у процесі підготовки майбутніх фахівців з матеріалознавства.

Методика дослідження. У статті проаналізовані та розроблені теоретичні та методичні основи застосування інформаційних систем в ході вивчення дисципліни "Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка" в вищих технічних навчальних закладах.

Результати досліджень. Розроблено складові навчально-методичного комплексу з нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки для майбутніх фахівців технічної галузі механічних спеціальностей. Аналізуються існуючі проблеми при традиційному підході до викладання графічних дисциплін і обґрунтовується необхідність впровадження комп'ютерних технологій в навчальний процес. Показано, що використання сучасних комп'ютерних систем дозволяє студентам механічних спеціальностей легше і швидше засвоювати базові технічні знання і отримувати практичні навички комп'ютерного моделювання і графіки, в умовах обмеженого часу навчального процесу, більш свідомо і глибше розуміти правила класичної нарисної геометрії та інженерної графіки. Відзначено, що надмірна комп'ютеризація навчального процесу призводить до впевненості студентів в необмежені можливості комп'ютерів, що в свою чергу може привести їх до думки про відмову від самостійних зусиль для досягнення певних результатів у виконанні виробничих завдань у професійній діяльності після закінчення вузу. Тому, розумний компроміс між традиційним підходом до вивчення дисципліни та використанням комп'ютерних технологій є важливим завданням педагогів вищої школи.

Наукова новизна. Методологічно поєднані аналіз теоретичних досліджень сучасних методик викладання графічних дисциплін з практичними результатами набуття знань студентами механічних спеціальностей. Показано, що для студентів механічних спеціальностей графічні дисципліни необхідно викладати як традиційно, з акцентом на майбутню професію, так і всебічно застосування технології комп'ютерної освіти.

Практична значимість. Зміст робочих програм курсу "Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка", має бути скориговано в бік більшої уваги тривимірному моделюванню геометричних фігур із застосуванням комп'ютерних технологій. Необхідно враховувати міждисциплінарні зв'язку, розробляти

і впроваджувати єдиний методологічний підхід, придатний для викладання загально інженерних дисциплін з використанням комп'ютерних технологій в навчальному процесі.

Ключові слова: комп'ютерні технології, механічні спеціальності, міждисциплінарні зв'язки, фахівці технічних галузей.

Вступ. Сучасною тенденцією розвитку середньої та вищої освіти є комп'ютеризація навчального процесу, яка відображає ступінь насиченості освітніх програм апаратним забезпеченням і комп'ютерними технологіями. Однак тут головне не сама технологія, а саме розробка та ефективне використання програм комп'ютерного навчання. Комп'ютеризація навчання у вузькому розумінні - використання комп'ютера як навчального інструменту, в широкому сенсі багаторазове використання комп'ютерів у процесі навчання з метою набуття студентами практичного досвіду комп'ютерного проектування для подальшого використання цих знань у фаховій інженерній практиці.

На сьогоднішній день слід відзначити дві характерні тенденції навчання студентів графічним дисциплінам:

- виконання креслеників студентами традиційним способом на папері за допомогою креслярських інструментів;
- виконання креслеників на комп'ютері за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм (САПР).

Необхідність володіння майбутнім фахівцем обома прийомами виконання графічних завдань ставить запитання про оптимальне співвідношення кількості і складності індивідуальних завдань, які студенту слід виконувати традиційним способом або за допомогою комп'ютерних технологій.

Ряд авторів виклали у своїх роботах погляди, що підтверджують кожну з цих тенденцій [1-10]. Наприклад, в роботі [5] автор вважає, що навчати креслити рукою безглуздо і тому неприпустимо. Є заперечення: не навчитися креслити рукою - це те саме, що не навчитися писати. Де хто вважає, що оскільки у вищій школі студенти вчать готувати текстові файли на комп'ютерах, то і графічні файли також слід готувати лише за допомогою комп'ютерів.

На думку авторів [7], шлях повністю відмовитися від креслення вручну є неприпустимим. Деякі індивідуальні графічні завдання студенти мають виконувати спочатку традиційним способом, тобто "вручну" на папері, а потім за допомогою комп'ютера. Такий процес дозволяє їм швидко зрозуміти методи графічного проектування і креслення та порівняти якість отриманих двома способами креслеників, а деякі роботи (наприклад складний машинобудівний вузол) краще виконувати повністю автоматизовано з застосуванням сучасних САПР.

Комбінований метод викладання (креслення "вручну", а потім за допомогою комп'ютера) пов'язаний з різним рівнем підготовки студентів, технічними можливостями та викладацьким складом університетів, де кількість наявного сучасного комп'ютерного обладнання як правило не є достатньою. На основі багаторічного досвіду викладання інженерної графіки автор [8] зазначається, що питання комп'ютерної графіки слід викладати паралельно з традиційними методами інженерної графіки без виділення в окремому розділі. На думку авторів цієї статті, використовуючи креслярські інструменти для оволодіння методами нарисної геометрії та інженерної графіки студенти одночасно повинні вивчати основи комп'ютерної графіки, що дає можливість виконувати графічні завдання, але вже на основі сучасних комп'ютерних технологій.

Постановка задачі дослідження. Метою даної роботи є дослідження можливостей поєднання традиційних та комп'ютерних методів викладання графічних дисциплін для підвищення рівня технічних знань студентів у процесі підготовки майбутніх фахівців інженерних спеціальностей.

У дослідженні зазначеної проблеми спиралися на системний підхід, який дозволив зробити педагогічні нароби для використання у викладанні графічних дисциплін майбутнім фахівцям технічних галузей. Для досягнення мети роботи використано загальнонаукові методи дослідження: аналіз джерел, аналітичний метод, порівняння, зіставлення, класифікація, систематизація результатів навчання при викладанні дисципліни «Нарисна геометрія, інженерна і комп'ютерна графіка» студентам вишу. Це забезпечило пошук, обробку й інтерпретацію результатів навчання графічним дисциплінам. Аналіз викладання дисциплін з використанням комп'ютерних технологій дозволив визначити особливості, ефективність, методики викладання у навчальних закладах вищої освіти.

Викладення основного матеріалу. На кафедрі конструювання, технічної естетики і дизайну Національного технічного університету "Дніпровська Політехніка" розроблена і поступово впроваджується концепція наскрізної графічної підготовки студентів за допомогою комп'ютерних технологій. Дисципліна "Нарисна геометрія", "Інженерна та комп'ютерна графіка" не містить окремого розділу, який саме вивчає виключно комп'ютерну графіку. Комп'ютерна графіка охоплює весь предмет не лише як об'єкт навчання, а й як засіб для кращого засвоєння та ефективного виконання студентами навчальних завдань.

Цей курс став загальною професійною дисципліною для підготовки фахівців спеціальностей 131 “Прикладна механіка”, 132 “Матеріалознавство”, 133 “Галузеве машинобудування”.

Враховуючи, що на сьогоднішній день комп'ютеризований метод викладання базових інженерних дисциплін є одним із ключових питань у навчальному процесі вищих навчальних закладів, а загальна система автоматизованого проектування (САПР) потенційно має широкий викладацький потенціал, фахівці кафедри прийшли висновку щодо необхідності знайти спосіб використання цього потенціалу для ефективного навчання студентів графічним дисциплінам.

Використання САПР дозволяє студентам машинобудівних спеціальностей легше та швидше засвоїти базові технічні знання і отримати практичні навички з комп'ютерного моделювання та графіки, в умовах обмеженого часу учбового процесу, більш свідомо та глибше розуміти правила класичної нарисної геометрії та інженерної графіки. Однак застосування комп'ютеризації у професійній інженерній підготовці з застосуванням САПР повинно органічно поєднуватись з іншими “традиційними” методами навчання графічним дисциплінам [9].

Концепція професійного навчання базується на поєднанні традиційних і сучасних форм в рамках навчально-методичного комплексу.

Схема сучасного НМК, яка застосовується при викладанні графічних дисциплін для спеціальностей механічної інженерії наведена на рис. 1.

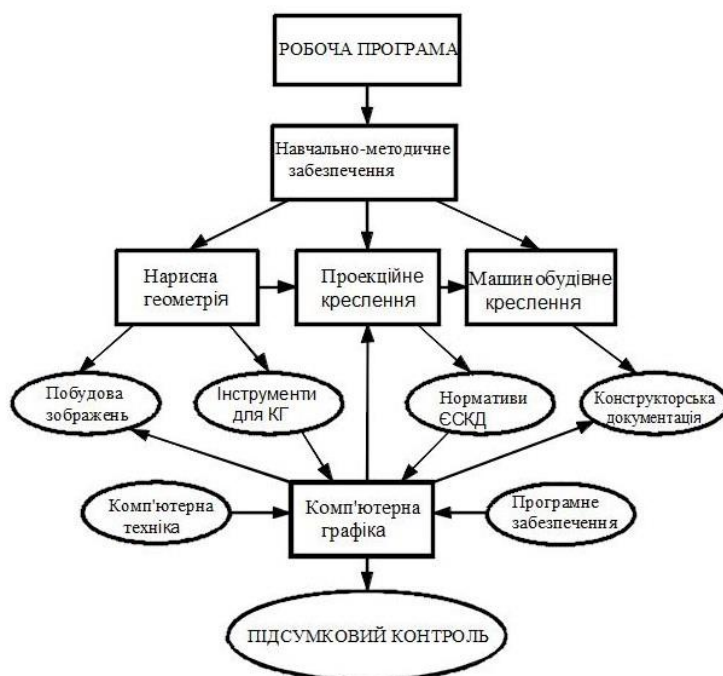


Рисунок 1 - Структура навчального процесу з дисципліни «Нарисна геометрія. Інженерна і комп'ютерна графіка»

З наведеної схеми видно, що основним елементом НМК є електронний підручник (навчальний посібник). Навчальний посібник надає можливість самостійного вивчення лекційного матеріалу. На підставі цього студент виконує практичні завдання різного рівня і комп'ютерне моделювання фізичних процесів і явищ.

До різних видів електронних видань відносяться такі навчальні комплекси:

- бібліотеки наочних посібників (фотографій, малюнків, анімацій, аудіо- та відеофайлів);
- віртуальні тренажери (наприклад, лабораторні завдання з поясненнями);
- електронні документи, які роздруковуються для використання в якості роздавальних матеріалів для студентів (завдання для креслення, методичні вказівки, тестові і контрольні матеріали і т. д.).

Комп'ютер - це лише інструмент, засіб, щоб людина змогла досягти бажаної мети в реалізації свого творчого потенціалу. Надмірна комп'ютеризація навчального процесу призводить до впевненості учнів у необмежених можливостях комп'ютерів, що в свою чергу може привести їх до думки щодо відмови від самостійних зусиль для досягнення певних результатів у виконанні виробничих завдань у професійній діяльності після закінчення вишу.

Ряд досліджень особливостей та результатів використання комп'ютерних технологій у навчальному процесі показує, що крім переваг комп'ютеризації, в наявності є і багато очевидних недоліків. Одним з

найбільших недоліків комп'ютеризації предметів графічної підготовки є мала кількість належним чином укомплектованих технічно забезпечених комп'ютерів (комп'ютерних класів). Поєднання комп'ютерних класів з великою кількістю студентів не дозволяє організувати якісне комп'ютерне навчання для всіх першокурсників. Звичайно, ця проблема вирішується і буде вирішена найближчим часом, але на даному етапі кінцева комп'ютеризація графічної освіти у більшості вищих навчальних закладів все ще є проблематичною.

Використання комп'ютерних технологій для викладання нарисної геометрії зводиться до двох основних питань:

- 1) розробка, обґрунтування та дослідження методів побудови креслеників просторових форм на площині;
- 2) вивчення способів розв'язання різних позиційних та просторових задач на площині за допомогою креслеників [10,11].

Комп'ютеризація нарисної геометрії має на меті звільнити студентів від виконання щоденних «одноразових» операцій, підняти і підтримати зацікавленість самою дисципліною. Звичайно, врешті-решт, студентам все одно доведеться виконувати всі звичайні операції як і при ручному кресленні, але якщо вони вже виконуються за допомогою комп'ютера, обсяг операцій значно менший, а також є можливість легко виправити помилку при проектуванні. Створений кресленик студенти все одно доопрацьовують, тобто проставляють точки, площини, лінії проєкційного зв'язку тощо. Без цих дій завдання не вважається повністю правильно виконаним.

Використання комп'ютерних технологій при викладанні графічних дисциплін дозволяє отримувати рішення складних задач нарисної геометрії в тривимірному просторі так би мовити «автоматично». Наприклад, в нарисній геометрії можливо знайти лінію перетину двох поверхонь «довільної» форми, що досить складно зробити майбутньому фахівцю на практиці «традиційним способом» на папері за допомогою креслярських інструментів через креслення (рис. 2, 3).

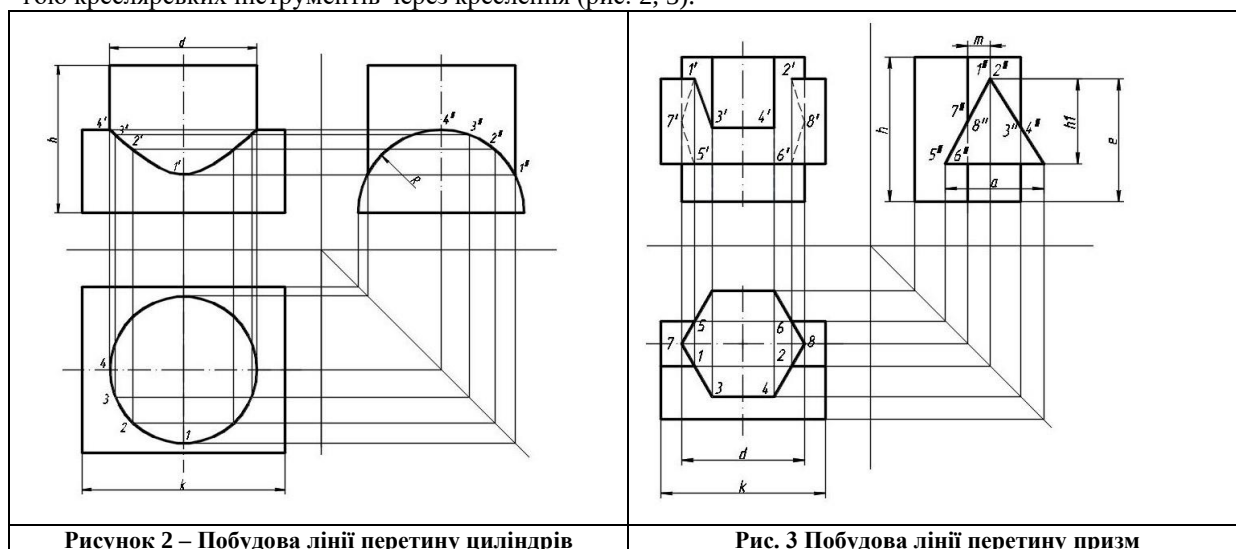


Рисунок 2 – Побудова лінії перетину циліндрів

Рис. 3 Побудова лінії перетину призм

На кафедрі КТЕД НТУ «Дніпровська політехніка» комп'ютерні технології впроваджені у навчальний процес наступним чином:

Комп'ютерна автоматизація передбачає попереднє вивчення і засвоєння студентом відповідних графічних пакетів. Для багатьох спеціальностей (наприклад, будівельні та машинобудівні спеціальності) дослідження графічної дисципліни має такі характеристики: у першому семестрі вивчається графічна дисципліна "Нарисна геометрія". Час навчання, відведений на засвоєння студентами програмного пакету інженерної графіки в розділі «Нарисна геометрія», потребує певного корегування з наступних причин: дефіцит часу на засвоєння дисципліни, складність самого процесу освоєння нарисної геометрії тощо.

Вивчення різноманітних графічних пакетів надається в розділі "Комп'ютерна графіка". Залежно від спеціальності, в цьому розділі може вивчатися один або декілька сучасних графічних редакторів або САПР: Autodesk AutoCAD, Inventor, Fusion, 3D Max та ін.. Тому наскрізна комп'ютеризація може бути досягнута лише за умови перерозподілу відведеного загального навчального часу між двома розділами "нарисної геометрії" та "комп'ютерної графіки". Іншими словами, оскільки частина вивчення курсу «Інженерна та комп'ютерна графіка» повинна поєднуватись в робочій програмі предмета з відведеним необхідним часом для вивчення частини «нарисної геометрії» було встановлено більше часу для використання програмних пакетів графіки і матеріалу з нарисної геометрії. Якщо основний курс не передбачає навчання в частині «комп'ютерної графіки», графічний пакет у частині «нарисної геометрії» можна ви-

вчити лише за рахунок зменшення кількості навчальних матеріалів, що також повинно бути відображено в робочій програмі та навчальному плані. У цьому випадку виникне інше не менш суперечливе питання: яким темам в розділі «Нарисна геометрія» можна приділити менше уваги? Це окреме питання що залежить від напрямку підготовки і спеціалізації майбутніх фахівців тому для подальшого дослідження в цій статті воно не розглядається.

Однією з функцій нарисної геометрії є розвиток просторової уяви та логічної здатності учнів вирішувати позиційні та метричні задачі. Існує думка, що використання комп'ютерних технологій не сприятиме розвитку просторової уяви студента, а навпаки, тільки заважає цьому розвитку. Це твердження також може бути суперечливим. За допомогою комп'ютерних технологій можна створити базу даних віртуальних тривимірних моделей, що допомагає студенту розвивати просторове уявлення, необхідне майбутньому інженеру. Наприклад, використання можливостей комп'ютера для вирішення проблеми побудови кінцевих перерізів через площини, дозволяє продемонструвати студентам різні типи отриманих ділянок відповідно до місця розташування січних площин. Цей матеріал використовується викладачами кафедри в лекційній презентації. Представляючи 3D-модель геометричної фігури з різних ракурсів, викладач може забезпечити найбільш всебічне розуміння та засвоєння студентами теми, що розглядається. Ефект анімації посилює увагу студентів до матеріалу найважливіших моментів теми, що вивчається та забезпечує більш краще запам'ятовування викладеного матеріалу [12].

За допомогою комп'ютерних програм потрібну лінію перетину поверхонь студенту можна отримати, просто побудувавши заздалегідь задані поверхні. Однак комп'ютеризація не повинна знецінювати роль і значення вивчення студентом основ нарисної геометрії та інженерної графіки. Нарисна геометрія повинна бути завжди самостійною частиною дисципліни «Інженерна і комп'ютерна графіка» як теоретична складова і дисципліна, що реально розвиває індивідуальне просторове уявлення у майбутнього фахівця, але відповідно до сучасних вимог епохи інформаційних технологій, існує наявна потреба внесення певних коректив до змісту даного курсу.

Якщо розглядати такі розділи графічних дисциплін, як «Машинобудівне креслення», «Будівельне креслення», «Електротехнічне креслення» передбачається, що викладання цих дисциплін доцільно проводити із застосуванням комп'ютерів.

З розвитком засобів САПР в програмі викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» з'явилася частина «Машинобудівне комп'ютерне креслення», що базується на використанні комп'ютерної технології для навчання студентів методам опису об'єктів та загальним правилам креслення [13,14]. Впроваджуючи комп'ютерну графіку в навчальний процес, викладачу слід зробити акцент на одному або двох базових графічних програмних продуктах. В основному це пов'язано з обмеженою кількістю навчальних годин, передбачених планами навчального процесу на курсі «Інженерна та комп'ютерна графіка». На кафедрі конструювання, технічної естетики і дизайну студенти вивчають такі програмні продукти як Autodesk AutoCAD, Inventor, 3D Max, Fusion 360.

Процес опанування дисципліни «Інженерна і комп'ютерна графіка» впроваджується з початку вивчення студентом курсу базових графічних навичок інженерної графіки. Процес навчання налаштовано на оволодіння більш сучасними інструментами, такими як комп'ютери та графічні редактори, що застосовуються для побудови і створення креслеників. В інженерній графіці студент повинен опановувати і вивчати не тільки команди графічного редактору, але і приділяти увагу правилам та дотриманню вимог ГОСТ ДСТУ, для правильного виконання креслеників. Рівень оволодіння студентами комп'ютерною графікою у цьому випадку досить високий.

Роботу за комп'ютером на протязі учбового процесу слід організовувати так, щоб студенти не лише вивчали графічні пакети, а й паралельно продовжували вивчати традиційну «ручну» інженерну графіку. В такому разі студенти виконують ті завдання на комп'ютері, які є досі складними для виконання на папері, що полегшує засвоєння навчальної дисципліни.

Процес виконання графічних робіт тут відрізняється від виконання простих плоских креслеників. Спочатку студенти створюють просторову модель деталі, після цього їм необхідно створити кресленик на основі 3D-моделі, що включає в себе необхідну кількість виглядів, розрізів, перерізів та виносних елементів, все це робиться в напівавтоматичному режимі. У зв'язку з появою великої кількості комп'ютерних інструментів для виконання конструкторських робіт створення об'єктів зазвичай починається не з самої графіки, а з віртуальних моделей [15]. Таким чином можна стверджувати, що принципи створення плоских креслеників змінилися. Такий кресленик є лише результатом, а не початковим етапом створення об'єкта.

Велику увагу при викладанні графічних дисциплін потрібно приділяти професійній підготовці інженера і тому вивчення сучасних пакетів графічного програмного забезпечення є важливою і необхідною умовою для якісної підготовки високопрофесійних фахівців і починається з вивчення інженерної графіки.

При вивченні нарисної геометрії та інженерної графіки обов'язково використання міждисциплінарних зв'язків. Так, вивчаючи площини проекцій у курсі нарисної геометрії та інженерної графіки ми роз-

глядаємо площини, що перетинають механічні деталі, виконуючи їх розрізи і перетини. При вивченні теми «Зображення – види, розрізи, перерізи» звертаємо увагу на види зображень деталей та окремих їх елементів. Вивчаючи тему «Складальні кресленики» розглядаємо, наприклад, питання «Види передач. Зубчасті передачі» і тісно пов'язуємо з машинами та механізмами.

Формування графічних знань та умінь сучасного фахівця інженерного профілю має бути забезпечено системою графічної підготовки, яка спрямована на становлення професійної компетентності майбутнього інженера-механіка.

Отже, один із способів підвищення інтересу студентів до предмета “Інженерна та комп'ютерна графіка” полягає в тому, щоб пов'язувати абстрактні, з точки зору студентів, завдання з їх застосуванням майбутніми фахівцями в реальній сфері діяльності.

Для забезпечення переходу учбового процесу до цілісної комп'ютеризації необхідно заздалегідь організувати матеріально-технічне якісне забезпечення навчального процесу, підготувати відповідні методи і методики викладання, що забезпечать ефективне засвоєння учбового матеріалу студентами у стислі часові терміни. Також слід зробити акцент на систематичну перепідготовку викладачів, оптимізацію предметної структури та внесення відповідних коректив у програми курсів професійної перепідготовки викладачів, стандарти та робочі програми викладання графічних дисциплін у вишах. Такий підхід дозволить підвищити якість викладання дисципліни і надасть змогу в повному обсязі використати переваги комп'ютеризації графічних дисциплін.

Висновки. На основі проведеного аналізу питань викладання дисципліни “Інженерна та комп'ютерна графіка” на кафедрі конструювання, технічної естетики і дизайну НТУ “Дніпровська Політехніка” рекомендується:

- скорегувати зміст курсу “Інженерна та комп'ютерна графіка”, приділивши більше уваги саме 3D моделюванню геометричних фігур;
- розробити для студентів спеціальностей механічної інженерії комплексні програми викладання курсу інженерної та комп'ютерної графіки на основі як традиційного викладання графічних дисциплін з акцентом на майбутню професію, так і з застосуванням технологій комп'ютерної освіти;
- враховуючи міждисциплінарні зв'язки, розробити і впровадити єдиний методологічний підхід, придатний для викладання загальнопрофесійних інженерних дисциплін з використанням комп'ютерних технологій у навчальному процесі.

Перелік посилань

1. Боровой, Г.Л. (2007) Совершенствование графической подготовки будущих инженеров-педагогов. *Образовательные технологии в преподавании графических дисциплин*: материалы II республ. науч.-практ. конф., Брест, 18-19 мая 2007 г.; Брестский гос. техн. ун-т; редкол.: В. В. Тур [и др.]. – 13-15.
2. Козачко, О. М., Козачко, А.О. (2016) Графічно-інформаційні технології формування професійної спрямованості студентів технічних ВНЗ в процесі вивчення інженерної та комп'ютерної графіки. *Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка. Педагогічні науки*. – Вип. 3, 68-72.
3. Виноградов, В. Н. (2001) Начертательная геометрия: учебник. – 3-е изд., перераб. И доп. – Минск: Амафей. – 368 с.
4. Малякова, І. А., Калина, Д.Ю. (2007) Диференціація підходів до викладання дисципліни „Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Збірник наукових праць КДПУ*. – Т.2. - №1/2007(42), 27-31
5. Карабчевский, В. В., Детюк, С.В. (2000) Компьютерные технологии в инженерной графике: опыт разработки и применения обучающих систем. *Образование и виртуальность-2000: сб. тр. 4-й междунар. конф.* – Харьков: УАДО, 165-169.
6. Кучер, З.С. (2016) Методичні аспекти використання інноваційних комп'ютерних програм у графічній підготовці студентів. *Збірник наукових праць “Професійна освіта: методологія, теорія та технології”*, - Педагогічні науки – Вип. 4, 131-144
7. Кравченя, Э. М. (2005) Технические средства обучения: учеб. пособие. – Минск: Выш. шк. – 304 с.
8. Козяр, М. М. (2013) Теоретико-методичні засади використання інформаційного середовища у вищих технічних закладах під час вивчення нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки. *Оновлення змісту, форм та методів навчання і виховання в закладах освіти*. Вип. 7, 73-78.
9. Прошкін, В. В. (2017) Формування проектно-конструкторської компетентності майбутніх інженерів засобами ІКТ. *Вісник Університету імені Альфреда Нобеля. Серія: Педагогіка і психологія*. - № 1, 247–252.
10. Кукушин, В.С. (2004) Педагогические технологии: учеб. пособие для студентов пед. спец.; под ред. В. С. Кукушина. – Серия “Педагогическое образование”. – Москва: ИКЦ “Март”; Ростов н/Д : Издат. центр “Март”. – 336.
11. Романычева, Э. Т., Яцюк, О.Г. (2007) Учебно-методический комплекс “Инженерная и компьютерная графика” на базе электронных средств обучения. *Актуальные вопросы графического образования молодежи: тез. докл. VII Всероссийской науч.-метод. конф.*, Рыбинск; Рыбинская гос. авиационная технолог. акад. им. П. А. Соловьева. – Рыбинск 49-54.

12. Рукавишников, В. А. (2009) Геометро-графическая подготовка инженера: роль и место в системе образования. Образование и наука: журнал теоретических и прикладных исследований. № 5 (62), 32-37.
13. Скоков, П. И. (2008) Опыт постановки учебного процесса на основе сквозной компьютеризации. Формирование творческой личности инженера в процессе графической подготовки: материалы республ. науч.-практ. конф., Витебск, 5 дек. 2008 г.; Витебский гос. технолог. ун-т; редкол. : В. В. Пятов [и др.]. – Витебск – 17-19.
14. Корнута, В. А. (2015) Шляхи покращення графічної підготовки майбутніх інженерів нафтогазового профілю. Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка. Вип. 1, 97-102.
15. Ярошевич, О. В. (2007) Инновации в графической подготовке студентов. Образовательные технологии в преподавании графических дисциплин: материалы II Республ. науч.-практ. конф., Брест, 18-19 мая 2007 г.; Брестский гос. техн. ун-т; редкол. : В. В. Тур [и др.]. Брест. 89-92

АННОТАЦИЯ

Цель работы. Исследование возможностей сочетания традиционных и компьютерных методов преподавания графических дисциплин для повышения уровня технических знаний студентов в процессе подготовки будущих специалистов по материаловедению.

Методика исследования. В статье проанализированы и разработаны теоретические и методические основы применения информационных систем в ходе изучения дисциплины "Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика" в высших технических учебных заведениях.

Результаты исследований. Разработаны составляющие учебно-методического комплекса по начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики для будущих специалистов технической отрасли механических специальностей. Анализируются существующие проблемы при традиционном подходе к преподаванию графических дисциплин и обосновывается необходимость внедрения компьютерных технологий в учебный процесс. Показано, что использование современных компьютерных систем позволяет студентам легче и быстрее усваивать базовые технические знания и получать практические навыки компьютерного моделирования и графики, в условиях ограниченного времени учебного процесса, более сознательно и глубже понимать правила классической начертательной геометрии и инженерной графики. Отмечено, что чрезмерная компьютеризация учебного процесса приводит к уверенности студентов в неограниченные возможности компьютеров, в свою очередь может привести их к мысли об отказе от самостоятельных усилий для достижения определенных результатов в выполнении производственных задач в профессиональной деятельности после окончания вуза. Поэтому, разумный компромисс между традиционным подходом к изучению дисциплины и использованием компьютерных технологий является важной задачей педагогов высшей школы.

Научная новизна. Методологически объединены анализ теоретических исследований современных методик преподавания графических дисциплин с практическими результатами приобретения знаний студентами механических специальностей. Показано, что для студентов механических специальностей графические дисциплины необходимо преподавать как обычно, с акцентом на будущей профессии, так и всесторонне применения технологии компьютерного образования.

Практическая значимость результатов работы. Содержание рабочих программ курса "Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика", должна быть скорректирована в сторону большего внимания трехмерному моделированию геометрических фигур с применением компьютерных технологий. Необходимо учитывать междисциплинарные связи, разрабатывать и внедрять единый методологический подход, пригодный для преподавания общих инженерных дисциплин с использованием компьютерных технологий в учебном процессе.

Ключевые слова: компьютерные технологии, механические специальности, междисциплинарные связи, специалисты технических отраслей.

ABSTRACT

Purpose of work. Investigation of the possibilities of combining traditional and computer methods of teaching graphic disciplines to improve the level of technical knowledge of students in the process of training future specialists in materials science.

Research methods. The article analyzes and developed the theoretical and methodological foundations for the use of information systems in the course of studying the discipline "Descriptive geometry, engineering and computer graphics" in higher technical educational institutions.

Research results. The components of the educational-methodical complex on descriptive geometry, engineering and computer graphics for future specialists of the technical branch of mechanical specialties have been developed. The existing problems in the traditional approach to teaching graphic disciplines are analyzed and the necessity of introducing computer technologies into the educational process is substantiated. It is shown that the use of modern computer systems allows students to more easily and quickly acquire basic technical knowledge and gain practical skills in computer modeling and graphics, in the limited time of the educational process, to

more consciously and deeper understand the rules of classical descriptive geometry and engineering graphics. It is noted that excessive computerization of the educational process leads to students' confidence in the unlimited possibilities of computers, in turn, can lead them to think about giving up independent efforts to achieve certain results in performing production tasks in professional activity after graduation. Therefore, a reasonable compromise between the traditional approach to the study of the discipline and the use of computer technology is an important task for higher education teachers.

Scientific novelty. Methodologically, the analysis of theoretical studies of modern methods of teaching graphic disciplines is combined with the practical results of the acquisition of knowledge by students of mechanical specialties. It is shown that for students of mechanical specialties, graphic disciplines must be taught as usual, with an emphasis on the future profession, and the comprehensive application of computer education technology.

Practical significance of work results. The content of the working programs of the course "Descriptive geometry, engineering and computer graphics" should be adjusted towards more attention to three-dimensional modeling of geometric shapes using computer technology. It is necessary to take into account interdisciplinary connections, develop and implement a unified methodological approach suitable for teaching general engineering disciplines using computer technologies in the educational process.

Key words: *computer technology, mechanical specialties, interdisciplinary communications, specialists in technical industries.*

ПСИХОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАВЧАННЯ ТА ІНСТРУКТАЖІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ В ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ

В.В.Гільперт¹, О.В.Столбченко²

¹ Український центр підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів лісового господарства, м. Боярка, Україна

² Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

PSYCHOLOGICAL ASPECTS IN TRAINING AND INSTRUCTIONS ON OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN FORESTRY

V.V.Gilpert¹, O.V.Stolbchenko²

¹Ukraine, Boiarka, Ukrainian Center for Training, Professional Conversion, and Continuous Education of Forestry Personnel "

²Ukraine, Dnipro, Dnipro University of Technology

Мета. Визначення важливості психологічних підходів при проведенні навчання та інструктажів з охорони праці.

Методика дослідження включає теоретичний аналіз та педагогічний експеримент.

Результати дослідження. Встановлено ряд аспектів, врахування яких дозволить усунути небезпечні й шкідливі чинники і створити нормальний психологічний клімат.

Наукова новизна. Розглянуто роль врахування психологічних особливостей при проведенні навчання та інструктажів з охорони праці.

Практичне значення. Запропоновано психологічні аспекти при проведенні навчання та інструктажів з охорони праці.

Ключові слова: психологічний аспект, навчання та інструктажі з охорони праці, безпека праці, ризикорієнтоване мислення, людський фактор, лісове господарство

Вступ.

Незважаючи на високий технічний рівень виробництва і науки щорічно в Україні та за її межами травмується і гине велика кількість людей. Щорічно у світі нещасні випадки відбуваються більш ніж з 10 млн людей, причому понад 600 тис. чоловік гине. У США від нещасних випадків щорічно гине понад 55 і більше людей, 8500 чоловік стають інвалідами. У Німеччині кожні 13 секунд відбувається нещасний випадок, кожні 3 хвилини одна людина стає інвалідом, кожні 2,5 години відбувається нещасний випадок зі смертельним результатом. Сьогодні щорічно на виробництві в Україні травмується близько 120 тис. чоловік, з яких 2,5 тис. гине, більше 10 тис. осіб отримують професійні захворювання. Настав час робити висновки – людство не може вирішити проблему збереження життя і здоров'я людей шляхом вдосконалення техніки та розвитку науки. Рішення цього питання пов'язане з людиною або, як прийнято сьогодні називати, людським фактором у виробництві, а тому необхідно зайнятися ним дуже серйозно [3].

Згідно із загальноприйнятим визначенням, виробничий травматизм – це явище, що характеризується сукупністю виробничих травм і нещасних випадків [1]. Питання профілактики виробничого травматизму зараз є актуальним, як ніколи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У вітчизняній психології поняття безпеки і загрози не було предметом самостійного психологічного дослідження. Українські науковці вивчали інформаційну безпеку, психологічні та психофізіологічні аспекти безпеки праці, життєдіяльності людини та особистої безпеки В.М. Богуш (2005), І.П. Пістун (2000, 2003), Ю.В. Кіт (2000), М.К. Хобзей (2003), Г.В. Сілін (2003), П.С. Перепелиця (2001), Г.Г. Почепцов (2000, 2008), В.В. Рибалка (2001), Н.Семенів (2005), О.К. Юдін (2005) та ін.

Вивченням психологічної безпеки особистості, пов'язаної з різними аспектами життєдіяльності та професійної діяльності людини, займалися й зарубіжні вчені R. Abramovitz (2003), A. Edmondson (1999), H.-T. Chang (2001), A.T. Lee (2001), T. Leahy (2008), K. Sarafyan (2004), M. Seager (2006), P.M. Senge (2003), C. Willing (2008) та ін.

Постановка завдання та його вирішення.

Згідно з міжнародною статистикою, головним винуватцем нещасних випадків і травматизму є, як правило, не техніка, не організація праці, а сам працівник, який за тих чи інших причин, не дотримувався

правил безпеки праці, порушував хід трудового процесу. Практика показує, що 60–90% нещасних випадків відбувається з вини самих потерпілих і, частіше за все, з психологічних причин [4]. Саме це і визначає актуальність і відповідно необхідність дослідження психологічних аспектів безпеки людини в процесі праці, а особливо на етапі навчання.

Важливе значення для поведінки кожного працівника і його безпеки праці мають його індивідуальні якості, які відображають сукупність психофізіологічних і соціально-психологічних властивостей (рис. 1, 2).

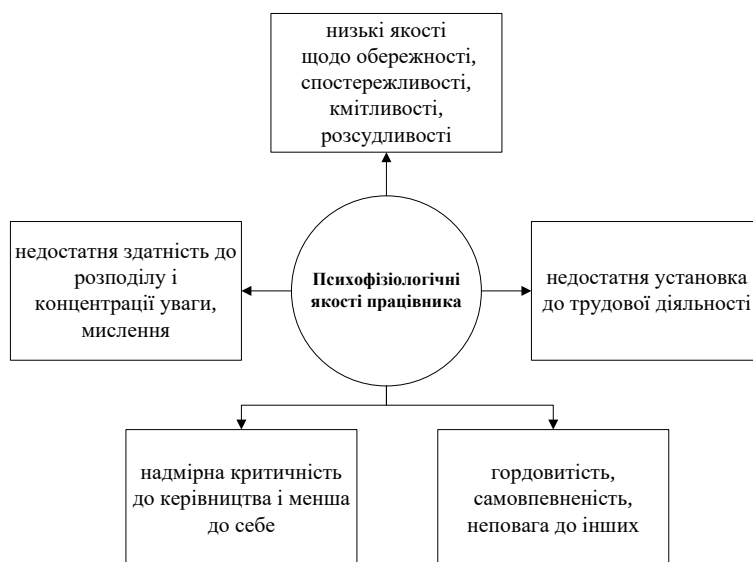


Рисунок 1 – Психофізіологічні якості працівника

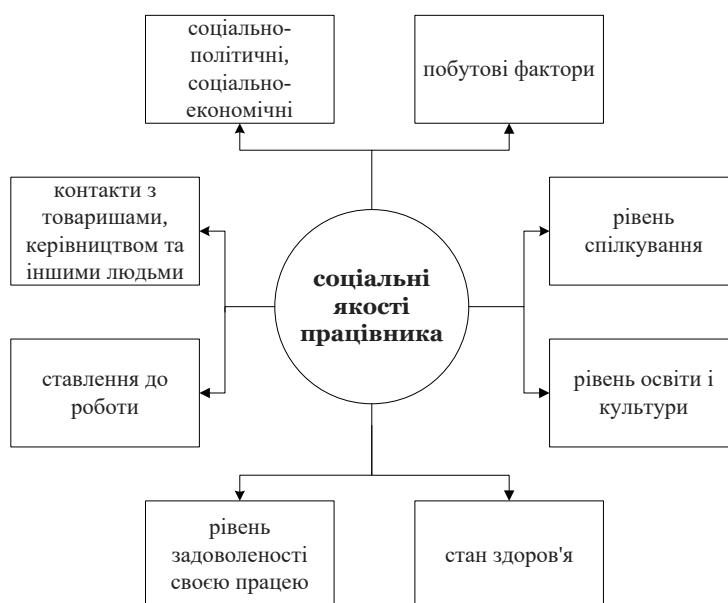


Рисунок 2 – Соціальні якості працівника

Між людьми існують досить значні індивідуальні відмінності в характеристиці процесів сприйняття, мислення, уваги, сенсомоторики тощо. Бувають люди, які викликають здивування в оточуючих своєю спостережливістю, інші навпаки, неуважні. Одні краще запам'ятовують на слух, іншим необхідно самому прочитати або побачити. Для одних характерні надзвичайно швидкі дії, реагування, інші ж реагують повільно, зате їх реакції точніші. Відрізняються люди і за темпераментом, проявом почуттів, волі тощо. Ці значні індивідуальні відмінності між людьми щодо психічних процесів і психофізіологічних особливостей не можуть не позначатися і дійсно позначаються на результатах і безпечності виконання

професійної діяльності. Внаслідок певних індивідуально-психологічних особливостей одна людина може виконувати ту чи іншу роботу успішно, а інший – ця робота не під силу. Однак цей же працівник, який погано справляється з однією роботою, може виявити дуже високі показники при виконанні іншої роботи. Досить часто ту індивідуально-психологічну якість, якої бракує людині у даній професії, вдається компенсувати через добре організоване спеціальне навчання. Існують такі професії, відносно яких навіть спеціальне навчання не зможе забезпечити потрібну надійність працівника, якщо його індивідуально-психологічні і психофізіологічні дані не відповідають вимогам професії. Це, передусім, професії, пов'язані зі значним ризиком, великим емоційно-вольовим напруженням і відповідальністю за життя людей, зі значними матеріальними цінностями. Саме стосовно таких професій і виникає необхідність професійного відбору [4].

Підвищення ефективності навчання чи професійної діяльності людини за рахунок оптимізації системи підготовки, раціоналізації режимів навчання і професійної діяльності визначає доцільність профвідбору.

При працевлаштуванні на роботу, незалежно від освіти, стажу, попереднього місця роботи, для кожного потенційного працівника проводиться вступний інструктаж. Зазвичай, вступний інструктаж проводить спеціаліст служби охорони праці на підприємстві. Передую цьому розроблення Програми вступного інструктажу. В більшості випадків, він носить характер монологу. З боку психології безпеки праці рекомендується проведення даного інструктажу в якості діалогу. Важливо це тому, що:

- ✓ в більшості випадків новоприйнятий працівник – це зовсім незнайома людина;
- ✓ в незнайомій обстановці людина старається максимально все почути, побачити, запам'ятати;
- ✓ спілкуючись з людиною, майбутнім працівником, можливо тільки так виявити його психофізіологічні якості, тим самим передбачити ризики або здібності, що стосується психофізіологічного стану відносно займаної майбутньої посади.

В Україні на підприємствах з високим ступенем травмувань, деякі робочі місця повинні відноситися до категорій з медоглядами, які охоплюють психофізіологічну експертизу. Нажаль, слід констатувати той факт, можливо це пов'язано з реформами в медичній сфері – напрям психофізіологічної експертизи багатьох професій просто загублений. Не виняток в цьому і лісова галузь України, яка нажалі і далі залишається вже декілька років підряд в антилідируючих позиціях за кількістю травмувань. Тому довіряти на даний час медоглядам, які проводяться в Україні, треба з застереженням і слід переймати досвід приватних фірм великого бізнесу, в яких ще на співбесіді через спілкування, заповнення форм, проходження тестів проводиться відбір кандидатів з позитивними психофізіологічними якостями.

Наступний психологічний аспект слід враховувати вже безпосередньо на робочому місці, при проведенні первинного інструктажу. В Типовому положенні про порядок проведення навчання і перевірку знань з питань охорони праці та Переліку робіт з підвищеною небезпекою (далі - Типове положення про навчання) [2], в пункті 6.8 буквою нормативно-правового акту написано:

«Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі проводить безпосередній керівник робіт (начальник структурного підрозділу, майстер) або фізична особа, яка використовує найману працю».

Нажалі, ми бачимо, що в Типовому положенні про навчання не конкретно прописано щодо посадової особи, яка повинна проводити інструктажі на робочому місці. Багато експертів в сфері безпеки праці, і в тому числі і я, як автор даної статті, схилиюсь до думки, що первинний інструктаж обов'язково повинен проводити саме керівник підрозділу. Чому? Пояснюється це наступними психологічними аспектами:

- ✓ перша посадова особа, після контори підприємства, хто повинен зустріти і познайомитись з новоприйнятим працівником - це керівник підрозділу;
- ✓ було б не правильно зі сторони керівника підрозділу, направляти до керівника робіт, як часто і буває, що той проведе інструктаж і введе в курс справи. Це виглядає не тільки психологічно неприємно, а ніби сприймається, не промовляючи в голос: «відчепися, нема часу!»;
- ✓ в незнайомій обстановці людина старається максимально все почути, побачити, запам'ятати.

Аналізуючи вищезазначені психологічні моменти, новоприйнятий працівник може зробити певний висновок, який може цілком ймовірно призвести до несерйозного відношення до своєї роботи, порушення дисципліни, що з рештою і до порушення, яке може обернутися травмуванням, або гіршим наслідком, що є категорично неприйнятно!

Заміна проведення інструктажів у формі монологу діалогом має ряд переваг. Якщо застосувати при навчанні з охорони праці та при проведенні інструктажів підхід, що передбачає постановку певних питань («Який найбільший ризик Ви бачите?», «Що Ви будете робити, щоб цей ризик запобігти?»), то працівник матиме змогу озвучувати фактори ризику. Таким чином, це не лише викликає зацікавленість, але й поступово допомагає формувати ризикорієнтовне мислення в працівника. Діалог дає можли-

вість визначити уважність працівників. Якщо працівник неуважний – є на то причина! Керівнику вкрай необхідно в'ясувати ту причину, що тривожить працівника. Причина може бути різною: психологічна, фізична, моральна, а може бути і в комплексі. В'ясувати причину можна тільки через спілкування. Якщо дійсно є причина, то керівник може тимчасово відсторонити працівника від роботи, яка в більшості випадків пов'язана з виконанням роботи з підвищеною небезпекою. При цьому слід врахувати, що працівник працює в ланцюгу технологічного процесу, де від виконання роботи залежить здоров'я і безпечність праці не тільки його самого, але й групи осіб. Неуважність може призвести до інцидентів, які матимуть плачевні наслідки. Паралельно перевіряються знання щодо вимог, які керівник намагається донести працівнику.

Особливої уваги заслуговує проведення цільового інструктажу. Однією із причин, коли він проводиться є ліквідація аварій або стихійного лиха. Нажаль, не поодинокими випадками на території лісогосподарських підприємств, є лісові пожежі. Тому важливість якості даного інструктажу є беззаперечною. Питання завжди залишається відкритим: де знайти той час на проведення якісного інструктажу. Відомостей про небезпеку стихійного лиха недостатньо, тому важливо для керівника робіт знайти правильні слова «настанови» для працівників, які залучаються до ліквідації пожежі. На перший погляд прості і так зрозумілі слова «Вас чекають вдома» (зазначивши імена членів родини), стають дієвим мотивом подумати про свою безпеку. Саме ці слова заставляють включити в підсвідомості працівника інстинкт самозбереження, що в свою чергу спровокує згадати все, що до того часу його вчили та інструктували! (рис. 3).

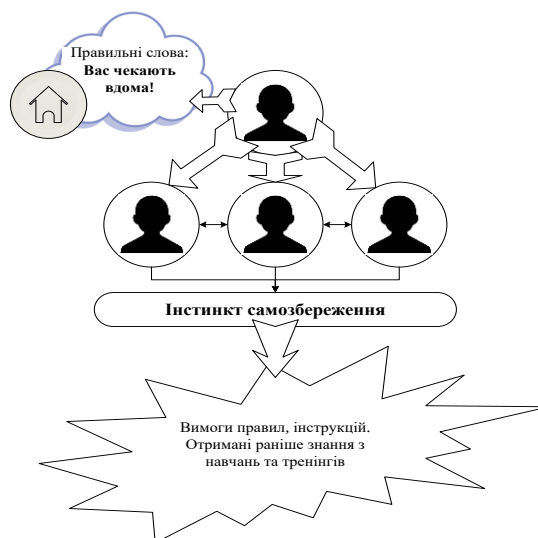


Рисунок 3 – Результат якісного проведення навчання та інструктажів з охорони праці

Окрім обов'язкових інструктажів, необхідно безперервно організовувати тематичні тренінги з можливістю працівникам вирішувати практичні ситуативні задачі, які дозволять отримати певні знання і відповідно забезпечать відповідність психофізіологічних особливостей працівника до вимог професії.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Резюмуючи вищезазначене, слід відмітити, що адаптація трудового процесу до можливостей працівника з урахуванням його здоров'я та психологічного стану, проведення навчання, професійної підготовки і підвищення кваліфікації працівників з питань охорони праці насамперед збереже йому життя і здоров'я, а в цілому дозволить вдосконалити систему охорони праці в Україні.

Перелік посилань

1. Закон України «Про охорону праці // Закон №2695-ХІІ від 14.10.92 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.
2. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці та Переліку робіт з підвищеною небезпекою (НПАОП 0.00-4.12-05) / Наказ Держнаглядохоронпраці України № 15 від 26.01.2005 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05#Text>.
3. Березуцький В.В., Адаменко М.І. Небезпечні виробничі ризики та надійність: навчальний посібник для студентів за напрямком підготовки 6.170202 «Цивільна безпека»/ В.В. Березуцький, М.І. Адаменко – Харків: ФОП Панов А. М., 2016. – 385 с.

4. Синявський В. Психологічні аспекти безпеки людини в процесі праці. JEcolHealth, vol. 15, nr 6, listopad-grudzień 2011.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Чеберячком С.І.
АННОТАЦІЯ

Цель. Определение важности психологических подходов при проведении обучения и инструктажей по охране труда.

Методика исследования включает теоретический анализ и педагогический эксперимент.

Результаты исследования. Установлено ряд аспектов, которые позволят устранить опасные и вредные факторы и создать нормальный психологический климат.

Научная новизна. Рассмотрены роль психологических особенностей при проведении обучения и инструктажей по охране труда.

Практическое значение. Предложено психологические аспекты при проведении обучения и инструктажей по охране труда.

Ключевые слова: психологический аспект, обучение и инструктажи по охране труда, безопасность труда, рискоориентованное мышление, человеческий фактор, лесное хозяйство.

ABSTRACT

Aim. Determining the importance of psychological approaches in training and instruction on labor safety.

Research methods. Research methods include theoretical analysis and pedagogical experiment.

Research results. A number of aspects have been identified, taking into account those to help eliminate dangerous and harmful factors and create a normal psychological climate.

Scientific novelty. The role considering the psychological peculiarities in conducting training and workshops on labor safety is considered.

Practical value. A range of psychological aspects review to be considered at training and workshops on labor safety are proposed.

Key words: psychological aspect, training and instruction on labor protection, labor safety, risk-oriented thinking, human factor, forestry.

ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПІДГОТОВКИ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ З ПИТАНЬ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ

Н.А.Бородіна¹, С.І.Чеберячко², Ю.І. Чеберячко³, О.В.Дерюгін⁴,

¹Білоцерківський інститут неперервної професійної освіти, м. Біла Церква, Україна
ignsborodina@gmail.com, ORCID 0000-0002-5942-5658

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна
sicheb@ukr.net, ORCID 0000-0003-3281-7157

³Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна
cheberiachkoyi@ukr.net, ORCID 0000-0001-7307-1553

⁴Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна
deryugin_o@ukr.net, ORCID 0000-0002-2456-7664

WAYS TO IMPROVE THE TRAINING SYSTEM OF STUDENTS IN THE FIELD OF OCCUPATIONAL SAFETY EDUCATION

N.A. Borodina¹, S.I. Cheberiachko², Yu.I. Cheberiachko³, O.V. Deryugin⁴

¹ Bilotserkivsky Institute of Continuous Professional Education, Bila Tserkva, Ukraine
borodinadorndi@gmail.com, ORCID 0000-0002-5942-5658

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
sicheb@ukr.net, ORCID 0000-0003-3281-7157

³Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
cheberiachkoyi@ukr.net, ORCID 0000-0001-7307-1553

⁴Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
deryugin_o@ukr.net, ORCID 0000-0002-2456-7664

Мета. Підготовка підгрунтя до зміни ставлення людини до власної безпеки на робочому місці і формування у неї відповідних навичок щодо виявлення та ідентифікації потенційних небезпек у виробничих процесах при виконанні трудової діяльності на основі формування ризик-орієнтованого світогляду.

Методика дослідження. Для вирішення завдань дослідження використано методи контент-аналізу, які базуються вивченні різноманітних документів, для обґрунтування висновків та зіставний метод, який за рахунок системного порівняння дозволить визначати подібності та відмінності технологічних змін у виробничому процесі.

Результати дослідження. Для формування компетенцій безпеки, необхідно стимулювання розвитку відповідних психічних процесів працівників за рахунок зміни особистого ставлення до них, підвищення сприйняття й мотивації, формування усвідомленого ставлення до безпеки на робочому місці. Для цього зручно застосувати ситуаційну обізнаність для формування навичок у робітників виявлення потенційних небезпек, розуміння розвитку ситуації та проєкції її на майбутнє. Рекомендовано запровадити систему кольорових кодів для визначення готовності людини до прийняття відповідних рішень при виникненні аварійних ситуацій.

Наукова новизна полягає у тому, що для зміни ставлення робітників к правилам безпеки на робочому місці, необхідно забезпечити формування усвідомленого ставлення їх к правилам безпеки на робочому місці за рахунок розвитку ситуаційної обізнаності з формуванням світогляду за рахунок застосування стоп-карт для визначення небезпек та розуміння їх проєкції в майбутньому.

Практичне значення результатів роботи. Представлено підхід до ситуаційної обізнаності для підготовки майбутніх фахівців на основі концепція полковника Д. Бойда - Цикл OODA: *Observe* – спостерігай; *Orient* – оцінюй; *Decide* – вирішуй; *Act* – дій, що дозволяє сформувати стоп-карти для зупинки небезпечних робіт та інформування про небезпечні ситуації, які виникають під час виконання професійної діяльності.

Ключові слова: ситуаційна обізнаність, компетенції, усвідомлення безпеки, мотивація

Вступ.

Зазвичай ми не задумуємося про безпеки, які нас оточують, і про те, що зустріч з ними одного дня може мати фатальні наслідки. Інша річ, коли йдеться про працівників, чиї професії пов'язані зі щоденним ризиком для життя. Вони розуміють, наскільки вразлива людина. Запобігти травмам і зберегти здоров'я

можливо тільки за умови формування культури безпечного виробництва на основі: знання інструкцій, правил, регламентів, законів, нормативно-правових актів з охорони праці, розпорядних документів; навичок безпечного користування засобами праці (інструментами, машинами, пристроями); відповідально-го ставлення до організації безпеки.

З першими «двома» начебто все гаразд. Регулярно проводяться навчання з питань охорони праці, організовуються тренінги, семінари, інструктажі тощо. Складно знайти «безграмотних» працівників. Стосовно навичок - вони також з кожним роком стають більш чіткими, злагодженими, відточеними - професійними. Але чому тоді виникають травми? Залишається наше ставлення – до безпеки з яким виникають певні складнощі.

Поширена проблема на багатьох підприємствах, – це **формальне ставлення до питань безпеки** на всіх рівнях компанії. Тому виникає задача у пошуку новітніх підходів щодо підготовки фахівців з охорони праці для зміни їх світогляду стосовно необхідності виконання вимог з охорони праці.

Постановка задачі дослідження.

Обґрунтування підґрунтя до зміни ставлення людини до власної безпеки.

Основна частина.

Працівники часто не усвідомлюють рівня загроз. Виконання правил безпеки, які вони здебільшого знають, вважають обтяжливою, непотрібною процедурою. Адже, на їхню думку, порушення правил не завжди призводить до травмування.

Отже, дотримання правил безпеки залежить від особистого ставлення до них, сприйняття й мотивації. Спробуємо пояснити від чого залежить вказаний компонент.

Від повного розуміння необхідності виконання правил до абсолютного нехтування навіть елементарними нормами – ставлення до безпеки буває різним. Воно залежить від переконань або світогляду, що формуються ще в дитинстві під час виховання основних рис характеру: у сім'ї, школі тощо. Також впливають думка оточення та психологічний стан людини в конкретний момент часу, що зумовлює позитивний чи негативний настрій та спонукає до відповідних дій.

Позитивне ставлення сприяє підвищенню концентрації уваги, зосередженості, відповідальності, допомагає уникати небезпеки, бути готовим до різних варіантів розвитку подій, підтримує дух взаємоповаги та взаємодопомоги в колективі. Тоді як негативне ставлення викликає, відповідно, такі самі емоції, спричиняє втому, спонукає до ризикованих дій, безрозсудності, егоїзму, самовпевненості, що часом призводить до фатальних наслідків.

Ще однією важливою компетенцією є сприйняття загроз. Це процес розуміння виробничих ризиків і тяжкості їх наслідків, що є формоутворюючим елементом поведінки, направленої на збереження здоров'я. Однак наскільки реально сприймає людина ті чи інші загрози – залежить від безлічі чинників: життєвого досвіду, переконань, віку, соціально-економічного статусу, роботи і зайнятості, расової та економічної структури суспільства тощо.

Що більший розрив між сприйняттям загрози та її реальністю, то менше шансів уникнути небезпеки. Нещасні випадки (далі – н/в) переважно настають унаслідок хибної оцінки ситуації, несприйняття реальної загрози через відчуття безпеки, що спотворює дійсність. Важливе значення має психологічний стан і настрої працівника, які можуть змінюватись протягом робочого часу через взаємини в колективі, особисті обставини і т. ін. Звідси витікає необхідність у формуванні ризик-орієнтованого мислення, яке дозволяє наблизити наше сприйняття дійсності з реальною картиною без ілюзій і прикрас. Змушує задуматись перш ніж прийняти рішення.

Рушійною силою необхідності виконання правил є мотивація. Вона може бути не тільки позитивною (людині щось дають, дякують, надсилають позитивний сигнал), а й негативною (критикують, накладають штрафи). Часто суб'єкти господарювання мотивують працівників до виконання певних дій штрафами. На думку фахівців, покарання дає швидкий ефект. Але він триває недовго, оскільки люди пристосовуються і вчаться уникати негативних наслідків, не змінюючи своєї поведінки.

Отже, небезпечні ситуації за зовнішнім контролем можна поділити на два типи: перший – коли є загроза покарання (начальник або фахівець з охорони праці); другий – коли загрози покарання немає. Залежно від ситуації працівники або намагатимуться демонстративно виконувати правила, або їх порушуватимуть.

Позитивне підкріплення, хоча й не дає такого миттєвого ефекту, як негативне, все ж таки формує більш стійкий і тривалий вплив на поведінку людини. Однак елементів позитивної мотивації має бути в кілька разів більше, ніж негативної. У цьому й полягає складність, адже забезпечення різноманітності і збереження цікавості до виконання роботи за правилами сприятиме гарному початку чи, навпаки, формалізації процедур для отримання додаткового ресурсу.

Аналізуючи роботи, присвячені визначенню причин виробничого травматизму, оцінці ризиків, формуванню безпечної поведінки та культури безпеки на виробництві, фахівці зазвичай вказують на необхідність **формування відповідного ставлення до безпеки у працівників через ситуаційну обізнаність**.

На будь-якому робочому місці є потенційні небезпеки. Травмуванню легко запобігти, якщо ми ро-

зуміємо й бачимо небезпеки та знаємо, що робити. Однак не варто бути занадто зосередженим, адже в досить динамічному середовищі можна не встигнути відреагувати на несподівану загрозу.

Ця методологія відома давно, її успішно застосовують у різних сферах життєдіяльності людини. Також на її основі побудована концепція полковника Д. Бойда (США) - **Цикл OODA**, яку успішно використовують у навчанні військових:

Observe – спостерігай;

Orient – оцінюй;

Decide – вирішуй;

Act – дій).

Зазначений метод також стане в пригоді під час *розроблення різних бізнес-процесів з урахуванням ризик-орієнтованих підходів*. Особливо актуальний він у сфері охорони праці, де тимчасова втрата або відсутність ситуаційної обізнаності є одним з чинників, що часто призводить до н/в.

У Національному інституті охорони праці США (NIOSH) ситуаційну обізнаність визначають гаслом: «Знати, що відбувається навколо вас» [2]. А відомий американський фахівець з питань безпеки життєдіяльності Джефф Купер заявляє, що ситуаційна обізнаність – це стан душі: «Будьте уважні до потенційних загроз і розумно на них реагуйте».

Фахівці наголошують на важливості ситуаційної обізнаності на виробництві, адже інколи там відбувається стільки «подій» або власні думки так захоплюють свідомість, що це заважає адекватно оцінити небезпечну ситуацію. Д. Купер класифікував *ситуаційну обізнаність людини* за допомогою кольорових кодів.

White - Розслаблений, не підготовлений, не усвідомлює небезпеку

Yellow - Розслаблений, але поінформований про небезпеку

Orange - Зосереджена настороженість

Red - Готовий до дії; адекватна реакція на небезпеку [1].

Управління з охорони праці у Великобританії (HSE) для підвищення ситуаційної обізнаності працівників на виробництві рекомендує впроваджувати - **метод SLAM**: (**Stop** – зупинити: привернути увагу; **Look** – подивитися: на робоче місце і знайти небезпеки; **Assess** – оцінка: наслідки небезпеки; **Manage** – управління: продовження роботи і зв'язку) [3].

Використовуючи метод SLAM, працівники зможуть частіше зупиняти роботу в разі виявлення небезпек, оцінювати вплив небезпек на здоров'я і планувати свою дальшу діяльність уже з усвідомленням наслідків

Висновки.

Для запобігання нещасних випадків і забезпечення ефективної роботи системи управління охороною праці на підприємствах важливо сформувати у майбутніх фахівців усвідомлене ставлення до безпеки. Встановлено, що для формування безпекових компетенцій потрібно, стимулювання розвитку відповідних психічних процесів працівників, що передбачає формування усвідомленого ставлення до безпеки на робочому місці; формування навичок у здобувачів виявлення потенційних небезпек.

Перелік посилань

1. Jeff Cooper's Commentaries, Volume Six, 1998. - [електронний ресурс] – режим доступу: <http://www.dvc.org.uk/jeff/jeff6.pdf>
2. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 5th Edition - [електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/default.html>
3. The SLAM technique - [електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.hse.gov.uk/construction/lwit/assets/downloads/slam.pdf>

Рекомендовано до друку: д.т.н. проф. Голінько В.І.

АННОТАЦИЯ

Цель работы. Подготовка основания к изменению отношения человека к собственной безопасности на рабочем месте и формирования у него соответствующих навыков по выявлению и идентификации потенциальных опасностей в производственных процессах при выполнении трудовой деятельности на основе формирования риск-ориентированного мировоззрения.

Методика исследования. Для решения задач исследования использованы методы контент-анализа, основанные на изучении различных документов, для обоснования выводов и метод сопоставлений, который за счет системного сравнения позволит определять сходства и различия технологических изменений в производственном процессе.

Результаты исследования. Для формирования компетенций безопасности, необходимо стимулирование развития соответствующих психических процессов работников за счет изменения личного отношения к ним, повышение восприятия и мотивации, формирование осознанного отношения к безопасности на рабочем месте во время выполнения профессиональной деятельности. Для этого удобно использовать ситуационную осведомленность для формирования навыков у рабочих выявления потенциальных опасностей, понимание развития ситуации и проекции ее на будущее. Рекомендуется ввести систему цветных кодов для определения готовности человека к принятию соответствующих решений при возникновении аварийных ситуаций.

Научная новизна заключается в том, что для изменения отношения работников к правилам безопасности на рабочем месте, необходимо обеспечить формирование осознанного отношения их к правилам безопасности на рабочем месте за счет развития ситуационной осведомленности с формированием мировоззрения за счет применения стоп-карт для определения опасностей и понимание их проекции в будущем.

Практическая значимость результатов работы. Представлен подход к ситуационной осведомленности для подготовки будущих специалистов на основе концепции полковника Д. Бойда - Цикл OODA: *Observe* - наблюдай; *Orient* - оценивай; *Decide* - решай; *Act* - действуй, что позволяет сформировать стоп-карты для остановки опасных работ и информирование про опасные ситуации, которые возникают во время выполнения профессиональной деятельности.

Ключевые слова: *ситуационная осведомленность, компетенции, осознание безопасности, мотивация*

ABSTRACT

Purpose of work. Preparation of the basis for changing a person's attitude to their own safety in the workplace and the formation of appropriate skills to identify and identify potential hazards in production processes in the performance of work activities based on the formation of risk-oriented worldview.

Research methods. To solve the research problems, content analysis methods are used, which are based on the study of various documents, to substantiate the conclusions and a comparative method, which through systematic comparison will determine the similarities and differences of technological changes in the production process.

Research results. To form safety competencies, it is necessary to stimulate the development of appropriate mental processes of employees by changing their personal attitude to them, increase perception and motivation, the formation of a conscious attitude to safety in the workplace. To do this, it is convenient to use situational awareness to develop skills in workers to identify potential hazards, understand the development of the situation and its projection into the future. It is recommended to introduce a system of color codes to determine a person's readiness to make appropriate decisions in case of emergencies.

The scientific novelty is that to change the attitude of workers to safety rules in the workplace, it is necessary to ensure the formation of a conscious attitude to safety rules in the workplace through the development of situational awareness with the formation of worldview through the use of stop cards to identify dangers and understand them. projections in the future.

Practical significance of work results. An approach to situational awareness for the training of future professionals based on the concept of Colonel D. Boyd - OODA Cycle: *Observe* - observe; *Orient* - evaluate; *Decide* - decide; *Act* - an action that allows you to create stop cards to stop dangerous work and inform about dangerous situations that arise during professional activities.

Key words: *situational awareness, competencies, safety awareness, motivation*

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



Абраменко Дмитро Сергійович

Здобувач Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна

130



Алексєєв Михайло Олександрович

Д-р техн. наук, професор, декан факультету Інформаційних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

44



Балійчук Олексій Юрійович

Канд. техн. наук, доцент кафедри Електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна

80



Бешта Дмитро Олександрович

Канд. техн. наук, Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

52



Беліков Анатолій Серафимович

Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри Безпеки життєдіяльності, Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», дійсний член Міжнародної академії наук нетрадиційних технологій, м. Дніпро, Україна

107



Білоус Олена Іванівна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Машинобудування Дніпровського державного технічного університету, м. Кам'янське, Україна

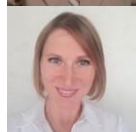
92



Бобришов Олександр Олексійович

Старший викладач кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна

143



Бородіна Наталія Анатоліївна

Д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, професор кафедри технологій навчання, охорони праці та дизайну, Білоцерківський інститут неперервної професійної освіти

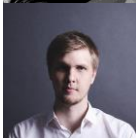
169



Випанасенко Станіслав Іванович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри Електроенергетики, Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

20



Власов Владислав Сергійович

Аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

44



Гільперт Віталій Володимирович

Аспірант, Український центр підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів лісового господарства, м. Боярка, Україна

164



Григоренко Володимир Устинович

Д-р техн. наук, професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

107



Давидов Сергій Олександрович

Д-р техн. наук, професор, декан фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна

130



Дерюгін Олег Валентинович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри управління на транспорті, Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

169



Дрешпак Наталія Станіславівна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

20



Дрешпак Олександр Станіславович

Канд. техн. наук, старший лаборант кафедри Збагачення корисних копалин Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

20



Жежеленко Ігор Володимирович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри Електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

26



Завалій Олександр Борисович

Співзасновник ТОВ «МОДІФІК»

107



Заславський Олександр Михайлович

Канд. техн. наук, доцент кафедри Кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

115



Іващенко Валерій Петрович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри Електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна

14



Карпенко Олег Вікторович

Асистент кафедри Кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

115



Качан Юрій Григорович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

3



Кириченко Євген Олексійович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна

143



Кожевников Антон В'ячеславович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

37, 52,
72



Козечко Вікторія Анатоліївна

Канд техн. наук, доцент кафедри Технологій машинобудування та матеріалознавства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

107



Колб Андрій Антонович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

14



Колосов Дмитро Леонідович

Д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри Будівельної, теоретичної та прикладної механіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

92



Костін Микола Олександрович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедр Електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна

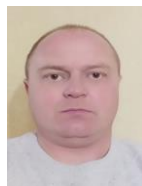
121



Котляр Михайло Валерійович

Студент групи АП01-16 спеціальності 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, Національної металургійної академії України м. Дніпро, Україна

87



Кравченко Олександр Геннадійович

Заступник начальника депо СП «Локомотивне депо Нижньодніпровськ-Вузол» Регіональна філія «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця», м. Дніпро, Україна

107



Краснов Роман Володимирович

Канд. техн. наук, доцент кафедри Електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна

80



Кузнецов Віталій Вадимович

Канд. техн. наук, доцент кафедри Електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна

3



Куриленко Олена Яківна

Старший викладач кафедри Електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна

80



Кучин Олександр Сергійович

Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри Маркшейдерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

44



Лисенко Олександра Геннадіївна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

26



Лихарев Микола Валентинович

Співзасновник ТОВ «МОДІФІК»

107



Луценко Іван Миколайович

Канд. техн. наук, доцент кафедри Електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

26



Малієнко Андрій Вікторович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Системного аналізу і управління Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

138



Мацук Захар Миколайович

Аспірант кафедри Безпеки життєдіяльності, Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», директор та співзасновник ТОВ «Модіфік», м. Дніпро, Україна 107



Мацюк Ірина Миколаївна

Канд. техн. наук, доцент кафедри Конструювання, технічної естетики і дизайну Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна 156



Мещеряков Леонід Іванович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри Програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна 37



Моня Андрій Григорович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Вищої математики Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна 150



Муха Андрій Миколайович

Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри Електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна 80



Новицький Ігор Валерійович

Д-р техн. наук., професор, професор кафедри Системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна 138



Онищенко Сергій Валерійович

Асистент кафедри Будівельної, теоретичної та прикладної механіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна 92



Павлюс Степан Григорович

Канд. техн. наук, с.н.с, доцент кафедри Енергетики Українського державного хіміко-технологічного університету, м. Дніпро, Україна 14



Паламарчук Ольга Олександрівна

Студентка групи АП01-16 спеціальності 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, Національної металургійної академії України м. Дніпро, Україна 87



Папайка Юрій Анатолійович

Д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри Електроенергетики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
м. Дніпро, Україна

26



Папанов Генадій Анатолійович

Старший викладач кафедри Вищої математики, Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, Дніпро, Україна

14



Папанова Ірина Іванівна

Канд. хім. наук, доцент кафедри Технології електрохімічних
виробництв та електротехніки Українського державного хіміко-
технологічного університету, м. Дніпро, Україна

14



Проценко Станіслав Миколайович

Старший викладач кафедри Кіберфізичних та інформаційно-
вимірювальних систем, Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

115



Проців Володимир Васильович

Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри Технологій
машинобудування та матеріалознавства Національного технічного
університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

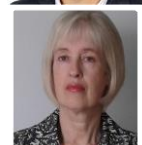
107



Пустовой Дмитро Сергійович

Канд. техн. наук, доцент кафедри Конструювання, технічної естетики і
дизайну Національний технічний університет «Дніпровська
політехніка», м. Дніпро, Україна

156



Савельсва Тамара Степанівна

Канд. техн. наук, доцент кафедри Конструювання, технічної естетики і
дизайну Національний технічний університет «Дніпровська
політехніка», м. Дніпро, Україна

16



Самуся Володимир Ілліч

Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри "Гірнична механіка"
Національного технічного університету "Дніпровська політехніка",
м. Дніпро, Україна

143



Слесарєв Володимир Вікторович

Д-р техн. наук., професор, завідувач кафедри Системного аналізу і
управління Національного технічного університету «Дніпровська
політехніка», м. Дніпро, Україна

138



Соборницький Володимир Іванович

Канд. хім. наук, доцент кафедри Енергетики Українського державного хіміко-технологічного університету, м. Дніпро, Україна

14



Столбченко Олена Володимирівна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» м. Дніпро, Україна

164



Стьопкін Василь Володимирович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України м. Дніпро, Україна

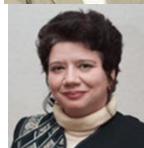
87



Танцура Ганна Іванівна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Теоретичної та прикладної механіки Дніпровського державного технічного університету, м. Кам'янське, Україна

92



Тимченко Світлана Євгенівна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Вищої математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

64



Ткачов Віктор Васильович

Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри Кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

115



Ткаченко Сергій Миколайович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

52, 72



Торопцев Григорій Ігорович

Студент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

64



Устименко Дмитро Володимирович

Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри Електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна

80



Хілов Віктор Сергійович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри Електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

32



Холоменюк Михайло Васильович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Гірничої механіки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
м. Дніпро, Україна

99



Ципленков Дмитро Володимирович

Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри Електротехніки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
м. Дніпро, Україна

14



Чеберячко Іван Михайлович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Гірнича механіка"
Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м.
Дніпро, Україна

143



Чеберячко Сергій Іванович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної
безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
м. Дніпро, Україна

169



Чеберячко Юрій Іванович

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної
безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
м. Дніпро, Україна

169



Шейкіна Ольга Григорівна

Канд. техн. наук, доцент кафедри Електротехніки та електромеханіки
Дніпровського національного університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна

121



Щербаков Петро Миколайович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Вищої математики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
м. Дніпро, Україна

64



Юдін Олександр Вячеславович

Студент групи АП01-16 спеціальності 141 – електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка, Національної металургійної академії
України м. Дніпро, Україна

87

З М І С Т

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

В.В. Кузнецов, Ю.Г. Качан

Покращення якості електроенергії в мережах живлення нетягових споживачів залізниць шляхом підключення до них відновлювальних джерел енергії 3

С.Г. Павлюс, В.П. Іващенко, І.І. Папанова, В.І. Соборницький, Г.А. Папанов, Д.В. Ципленков, А.А. Колб, Д.В. Галушко, М.А. Лобко, Д.О. Чернишов, О.О. Ровенський

Ефективність промислових систем електроспоживання з різним характером навантаження 14

Н.С. Дрешпак, С.І. Випанасенко, О.С. Дрешпак

Облік електричної енергії в системах контролю ефективності її використання. 20

І.В. Жежеленко, Ю.А. Папайка, І.М. Луценко, О.Г. Лисенко

Оцінка стану якості напруги у промислових системах електропостачання 26

В.С. Хілов

Аналіз ефективності компенсації ємнісних струмів при однополюсному торканні в мережі з ізольованою нейтраллю 32

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

А.В. Кожевников, Л.І. Мещеряков

Похибки чисельного методу інтегрування функцій комплексної змінної 37

М.О. Алексєєв, О.С. Кучин, В.С. Власов

Автоматизація геолого-маркшейдерського забезпечення для прогнозування гідроекологічних ризиків, які виникають при закритті вугільних шахт 44

С.М. Ткаченко, Д.О. Бешта, А.В.Кожевніков

Архітектура обчислювального вузла мехатронного пристрою 52

П.М. Щербаков, С.Є. Тимченко, Г.І. Торопцев

Устройство автоматического измерения естественной блочности массива скальной породы и кусковатости горной массы на карьерах. 64

А.В. Кожевников, С.М. Ткаченко

Чисельний метод визначення нулів функцій комплексної змінної 72

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

А.М. Муха, Д.В. Устименко, Р.В. Краснов, О.Ю. Балійчук, О.Я. Куриленко

Статистична модель для прогнозування зносостійкості контактних вставок струмоприймачів електрорухомого складу залізниць 80

В.В. Стьопкін, О.В. Юдін, М.В. Котляр, О.О. Паламарчук, А.Ю. Жеребцов, В.Б. Спирса,

П.В. Руснак, Е.С. Шкаран, И.В. Назаренк
Модель прямого керування моментом асинхронного двигуна у MATLAB 87

ТРАНСПОРТ ТА ГІРНИЧА МЕХАНІКА

Д.Л. Колосов, С.В. Онищенко, О.І. Білоус, Г.І. Танцура

Дослідження напруженого стану оболонки композитного тягового органа від дії дотичного навантаження 92

М.В. Холоменюк

Гідравлічний удар у головних водовідливних установках шахт з невеликою висотою водопідйому . 99

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

А.С. Беліков, О.Г. Кравченко, О.Б. Завалій, М.В. Лихарев, З.М. Мацук, В.В. Проців,

В.У. Григоренко, В.А. Козечко
Матеріали змащувальні рідкі і пластичні. Метод експрес відбору. 107

О.М. Заславський, В.В. Ткачов, С.М. Проценко, О.В.Карпенко Принципи побудови програмних засобів моніторингу неелектричних енергетичних та матеріальних потоків	115
М.О. Костін, О.Г. Шейкіна Енергетичні характеристики і показники рекуперуючих трамваїв	121
Д.С. Абраменко, С.О. Давидов Анализ существующих методов и средств по обеспечению промышленной чистоты пневмо-гидравлических и топливных систем крупногабаритных емкостей ракетно-космической техники ...	130
І.В. Новицький, В.В. Слесарєв, А.В. Малієнко Ідентифікаційний алгоритм екстремального управління барабанными млинами самоздрібнювання руд	138
В.І. Самуся, Є.О. Кириченко, І.М. Чеберячко, О.О. Бобришов Довгострокова стратегія проектування і регулювання глибоководних гідропідйомів в складі суднових видобувних комплексів	143
А.Г. Моня Обчислення найбільшого тиску та координат максимальної температури на робочій поверхні дискового гальма	150
<i>ПРОБЛЕМИ ТЕОРІЇ ТА МЕТОДИКИ ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ Й ВИХОВАННЯ</i>	
Т.С. Савельєва, Д.С. Пустовой, І.М. Мацюк Удосконалення методики викладання графічних дисциплін в умовах комп'ютеризації навчального процесу	156
В.В.Гільперт, О.В.Столбченко Психологічні аспекти при проведенні навчання та інструктажів з охорони праці в лісовому господарстві	164
Н.А.Бородіна, С.І.Чеберячко, Ю.І. Чеберячко, О.В.Дерюгін Шляхи удосконалення системи підготовки здобувачів освіти з питань безпеки праці	169
Відомості про авторів	173

Науково-технічний збірник

Гірнича електромеханіка та автоматика

Випуск 103

Технічний редактор
Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 17.02.20. Формат 30x42/4. Папір Captain.
Ризографія. Ум. друк. арк. 10,7. Обл.-вид. арк. 10,8.
Тираж 70 пр.

ISSN 0201-7814

Видано
у Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.