



ISSN 2224-0349

ВІСНИК
Національного технічного університету
«ХПІ». Серія:

Енергетика: надійність та енергоефективність



2 (3)
2021

Харків
2021

ISSN 2224-0349

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Енергетика:
надійність та
енергоефективність**

№ 2 (3) 2021

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: Energy:
Reliability and Energy
Efficiency**

No. 2 (3) 2021

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2021

Kharkiv
NTU "KhPI", 2021

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2021. — № 2 (3) 2021. — 154 с. — ISSN2224-0349.

Видання присвячене питанням теоретичних та практичних результатів досліджень і розробок, пов'язаних з проблемами надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування, а також електроенергетичної системи в цілому. Розглядаються проблеми електроспоживання, енергозбереження і підвищення якості електричної енергії.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі енергетики, надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування.

The publication is devoted to the issues of theoretical and practical results of research and development associated with problems of reliability and efficiency of power equipment and power system as a whole. The problems of electricity consumption, energy saving and improvement of the quality of electric energy are considered.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of energy, reliability and efficiency of power equipment.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 24523-14463Р від 6 липня 2020 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Наказом МОН України № 1017 від 27 вересня 2021 року «Про рішення з питань присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань та внесення змін до наказу Міністерства освіти і науки України від 29 червня 2021 року № 735» Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії».

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і CrossRef; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://erec.khpi.edu.ua/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Головний редактор:

Шевченко С. Ю., д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Безпрозванних Г. В., д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Говоров П. П., д.т.н., проф., ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, Україна

Гриб О. Г., д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Колкун М., д.т.н., проф., Технічний університет у Кошицях, Словаччина

Морва Д., д.т.н., проф., Університет Обуда, Угорщина

Данильченко Д. О., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Довгалюк О. М., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Лазуренко О. П., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шайда В. П., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шутенко О. В., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Кулик О. С., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial staff

Editor-in-chief

Shevchenko S. Yu., D.Tech.Sc., Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Bezprozvannykh G. V., D.Tech.Sc., Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Hovorov P. P., D.Tech.Sc., Prof., O.M. Beketov NUUE, Ukraine

Gryb O. G., D.Tech.Sc., Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kolcun M., D.Tech.Sc., Prof., Technical University of Košice, Slovakia

Morva G., D.Tech.Sc., Prof., Óbuda University, Hungary

Danylchenko D. O., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Dovgalyuk O. M., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Lazurenko O. P., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shaida V. P., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shutenko O. V., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Kulyk O. S., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 12 від 29 грудня 2021 р.

O. V. SHUTENKO, I. V. BARBASHOV, H. V. OMELIANENKO

ANALYSIS OF GAS CONTENT DYNAMICS IN POWER TRANSFORMERS DURING DEVELOPMENT OF SPARK DISCHARGE

The results of analysis of the dynamics of change in the values of diagnostic criteria used to recognise the type of defect based on the dissolved gas analysis results for five high-voltage transformers during the development of spark discharges are presented. In the course of the analysis the dynamics of changes in gas concentrations and defect nomograms were considered. There was also analysed the change of the defect type during the spark discharges development by means of diagnostic space determined by gas ratios values according to IEC 60599 and ETRA square, and by means of diagnostic space determined by gas percentage content according to Duval's triangle. According to the results of the analysis it was found that during the development of spark discharges in different transformers the values of diagnostic criteria correspond to the defects of different types, which makes it practically impossible to predict this defect based on the results of previous tests. At the same time the values of both gas ratios and gas percentage as well as defect nomograms obtained by dissolved gas analysis before the moment when gas concentrations exceeded their limit values correspond to the defects of different types, which enables to recognise spark discharges at an early stage. Analysis of correlation relations between values of concentrations and percentages of gases and the operation time as well as between the values of concentrations and percentages of individual gases shows that the development of spark discharges is accompanied not only by the growth of gas concentrations, which is known and widely used, but there is also a significant positive correlation between the values of concentrations of dissolved gases in oil and the operation time as well as between concentrations of individual gases. At the same time, the gases between which a significant correlation has been detected during the development of spark discharges in different transformers differ significantly. The analysis showed that the standards and criteria of IEC 60599, the ETRA square and the Duval triangle do not allow any spark discharges to be detected. The maximum recognition reliability was obtained using the nomogram method. The results show that an early detection of spark discharges is possible, which increases the reliability of nondestructive diagnostics and prolongs the service life of transformers.

Keywords: power transformers, diagnostics, dissolved gas analysis (DGA), spark discharges, defect type dynamics, correlation, gas concentrations, gas percentages, gas ratios, ETRA square, Duval triangle, defect nomograms.

O. B. ШУТЕНКО, І. В. БАРБАШОВ, Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ГАЗОВМІСТУ МАСЕЛ У СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ У ПРОЦЕСІ РОЗВИТКУ ІСКРОВИХ РОЗРЯДІВ

Наведено результати аналізу динаміки зміни значень діагностичних критеріїв, використовуваних для розпізнавання типу дефекту за результатами аналізу розчинених в маслі газів, для п'яти високовольтних трансформаторів в процесі розвитку іскрових розрядів. У процесі аналізу розглянуто динаміку зміни концентрацій газів, відсоткового вмісту газів, а також номограм дефектів. Також аналізувалася зміна типу дефекту в процесі розвитку іскрових розрядів з використанням діагностичного простору, що визначався значеннями відношень газів, регламентованих стандартом IEC 60599 і квадратом ЕТРА, та з використанням діагностичного простору, що визначався відсотковим вмістом газів, регламентованих трикутником Дюваля. За результатами аналізу встановлено, що при розвитку іскрових розрядів в різних трансформаторах значення діагностичних критеріїв відповідають дефектам різного типу, що практично не дозволяє прогнозувати даний дефект за результатами попередніх випробувань. У той же час значення і відношень газів, і їх відсотковий вміст, а також номограми дефектів, отримані за результатами аналізу розчинених в маслі ще до того моменту, коли концентрації газів перевищили свої граничні значення, відповідають дефектам різного типу, що дозволяє розпізнавати іскрові розряди на ранній стадії. За результатами аналізу кореляційних зв'язків між значеннями концентрацій і відсоткового вмісту газів та тривалістю експлуатації, а також між значеннями концентрацій і відсоткового вмісту окремих газів встановлено, що розвиток іскрових розрядів супроводжується не тільки зростанням концентрацій газів, що відомо і широко використовується, але і появою значущої позитивної кореляції між значеннями концентрацій розчинених в маслі газів і тривалістю експлуатації, а також між концентраціями окремих газів. При цьому газів, між якими виявлена значуща кореляція, в процесі розвитку іскрових розрядів в різних трансформаторах істотно розрізняються. Виконаний аналіз показав, що норми і критерії, регламентовані стандартом IEC 60599, квадратом ЕТРА і трикутником Дюваля не дозволяють розпізнавати іскрові розряди. Максимальна достовірність розпізнавання була отримана з використанням методу номограм. Отримані результати демонструють можливість раннього виявлення іскрових розрядів, що дозволяє підвищити достовірність неруйнівної діагностики і продовжити ресурс трансформаторів.

Ключові слова: силові трансформатори, діагностика, аналіз розчинених в маслі газів, іскрові розряди, динаміка зміни типу дефекту, кореляція, концентрації газів, відсотковий вміст газів, відношення газів, квадрат ЕТРА, трикутник Дюваля, номограми дефекту.

O. V. ШУТЕНКО, И. В. БАРБАШОВ, Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ГАЗСОДЕРЖАНИЯ МАСЕЛ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ

Приведены результаты анализа динамики изменения значений диагностических критериев, используемых для распознавания типа дефекта по результатам анализа растворенных в масле газов, для пяти высоковольтных трансформаторов в процессе развития искровых разрядов. В процессе анализа рассмотрена динамика изменения концентраций газов процентного содержания газов, а также номограмм дефектов. Также анализировалось изменение типа дефекта в процессе развития искровых разрядов с использованием диагностического пространства, определяемого значениями отношений газов, регламентируемых стандартом IEC 60599 и квадратом ЕТРА, и с использованием диагностического пространства, определяемого процентным содержанием газов, регламентируемых треугольником Дюваля. По результатам анализа установлено, что при развитии искровых разрядов в разных трансформаторах значения диагностических критериев соответствует дефектам разного типа, что практически не позволяет прогнозировать данный дефект по результатам предыдущих испытаний. В тоже время значения и отношений газов, и их процентного содержания, а также номограммы дефектов, полученные по результатам анализа растворенных в масле газов еще до того момента, когда концентрации газов превысили свои граничные значения, соответствуют дефектам разного типа, что

© O. V. Shutenko, I. V. Barbashov, H. V. Omelianenko, 2021

позволяет распознавать искровые разряды на ранней стадии. По результатам анализа корреляционных связей между значениями концентраций и процентного содержания газов и длительностью эксплуатации, а также между значениями концентраций и процентного содержания отдельных газов установлено, что развитие искровых разрядов сопровождается не только ростом концентраций газов, что известно и широко используется, но и появлением значимой положительной корреляции между значениями концентраций растворенных в масле газов и длительностью эксплуатации, а также между концентрациями отдельных газов. При этом газы, между которыми выявлена значимая корреляция, в процессе развития искровых разрядов в разных трансформаторах существенно различаются. Выполненный анализ показал, что нормы и критерии, регламентируемые стандартом IEC 60599, квадратом ETRA и треугольником Дюваля, не позволяют распознавать искровые разряды. Максимальная достоверность распознавания была получена с использованием метода номограмм. Полученные результаты демонстрируют наличие возможности раннего обнаружения искровых разрядов, что позволяет повысить достоверность неразрушающей диагностики и продлить ресурс трансформаторов.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, диагностика, анализ растворенных в масле газов, искровые разряды, динамика изменения типа дефекта, корреляция, концентрации газов, процентное содержание газов, отношения газов, квадрат ETRA, треугольник Дюваля, номограммы дефекта.

Statement of the problem. Deterioration of insulation properties of high-voltage power transformers during long-term operation occurs not only under the influence of processes of hydrolysis and pyrolysis of cellulose and oxidation of transformer oil, but also due to processes of ionization aging and thermal degradation, which are called developing defects. Just as in the case of medical diagnosis, untimely detected disease in the human body can lead to death, so the developing defects, if not detected in time, can lead to accidental damage to equipment, which is accompanied by serious economic losses. There is therefore an objective need for early detection and recognition of such defects. One of the most widespread methods of non-destructive diagnostics allowing to recognise developing defects of oil-filled equipment is the dissolved gases analysis (DGA). However, the use of traditional norms and criteria regulated in the majority of international and national standards and author's methods on interpretation of DGA results [1–10] allows to detect defects only if concentration of at least one of gases exceeds the limit values, which does not allow timely detection of fast-developing defects.

Spark discharges are one of the faults which, if not detected in time, can cause accidental damage to high-voltage transformers. Such defects include discharges caused by deposits of contaminants or products of oil degradation on the surfaces of insulating structures with subsequent growth of discharge channel (creeping discharges) and spark discharges between areas with different potentials, which are caused by sharp edges, violation of contact connections or appearance of "floating potential". The analysis [11–13] has shown that among all the known standards the surface or creeping discharges are singled out as a separate type of defect only in [3, 5, 7], which complicates the recognition of this defect significantly.

Publication analysis. In addition to the norms and criteria governed by known standards and author's methods, a rather large volume of publications is currently devoted to the issues of interpretation of DGA results. For example, in [14, 15] fuzzy logic apparatus is used to interpret DGA results. In [16, 17], support vector machine (SVM) is used for defect type recognition. Another direction to improve the reliability of defect type recognition is the use of neural networks [18, 19]. In [20, 21], Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System is used to interpret the results of oil dissolved gas analysis. In [22], a deep belief network is developed for defect type

recognition. In [23, 24], a Bayesian approach is used to interpret the DGA results. The Bayesian network developed in [23] uses the values of gas ratios regulated by the Dornenburg and Rogers methods, as well as the Duval triangle. In [25], the gene expression programming apparatus was used to interpret the DGA results. For the same purpose, deep transmission networks were used in [26] and fault interpretation matrices (FIM) were used in [27]. In [28], the use of statistical machine learning techniques and neural networks to generate a staircase model is proposed. In [29], two scenarios with different data transformation techniques are considered to improve the accuracy of the neural pattern recognition (NPR) method for predicting fault types and severity. In [30], a method for diagnosing transformer faults based on Stacked Contractive Auto-Encoder Net (SCAEN) is proposed. In [31], a multiple classifiers based information fusion (MCIF) method is proposed. In [32], a new method for power transformer fault diagnosis based on DGA using data transformation and six optimized machine learning (OML) techniques is presented.

The analysis has shown that most of the above papers recognised the defect using only one criterion, either the gas ratios or the gas percentages, and as a rule, the norms and criteria regulated in [1-10] were used. At the same time, the dynamics of changes in these criteria during the development of the defect were practically not investigated, which is the reason for preparing this article.

Purpose of the article. The aim of the article is to analyse the possibilities of early detection of spark discharges in power transformers. In order to achieve this goal, the dynamics of the criteria used for defect type recognition based on DGA results in power transformers during the development of spark discharges has been analysed.

Research method. The theoretical basis of the performed research is the use of technical genesis procedure ("genesis" is an origin, occurrence), that is, determination of technical condition of the object for the past moment of time. Given the diversity of diagnostic criteria for determining the condition of high-voltage oil-filled equipment based on DGA results, in the course of the research the dynamics of both gas concentration values and gas percentage values and the value of gas ratios were analysed.

At the first stage of research the values of gas concentrations were analysed for compliance with different levels characterising presence or absence of defect in oil-

filled equipment, according to the normative document in force in Ukraine [3]. The gas concentration levels are shown in Table 1.

Table 1 – Condition levels of 110 kV power transformers and shunt reactors according to dissolved gas concentrations in oil

Concentration levels	Gases				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Below the analytical recognition threshold	0.005	0.0015			0.0003
Level I	<0.01	<0.005		<0.0015	<0.00005
Level II	0.01-0.015	0.005-0.012	0.0015-0.01		0.00005-0.001
Level III	>0.015	>0.012	>0.01		>0.001

In contrast to the IEC 60599 methodology, the gas concentrations given in Table 1 are called limit and have three levels:

- Level 1 – no defect is suspected;
- when the lower limit of the gas concentration range corresponding to Level 2 is exceeded, a gas build-up rate is determined (a defect is considered "present" if this rate exceeds 30 ml/day);
- Level 3 (exceeding the upper limit of Level 2) – a defect is predicted without regard to the gas build-up rate.

The hydrogen and hydrocarbon gas percentages were then determined [33, 34]:

$$A_{i\%} = 100 \frac{A_i}{\Sigma}, \quad (1)$$

where $A_{i\%}$ is the percentage content of a given gas;

A_i is the concentration value of a given gas;

Σ is the sum of the concentrations of hydrogen and hydrocarbon gases in the oil sample.

For equipment with a sufficiently large sample size, the values of paired correlation coefficients between the values of concentrations and percentages of gases and the operation time as well as between the values of concentrations and percentages of individual gases were analysed. The value of the paired correlation coefficient [35] was used for this purpose:

$$r_{smp} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

where r_{smp} is the sample value of the paired correlation coefficient;

x_i and y_i are the current values of the indicators;

\bar{x} and \bar{y} are the values of the sample mean of the indicators;

n is the volume of sample values

To test the main hypothesis, the absolute value of the sample paired correlation coefficient was compared with the critical value. If the value of the sample paired correlation coefficient does not exceed the critical value with the number of degrees of freedom $f = n - 2$ and a given level of significance α (5% risk level was used), then the

main hypothesis is not rejected, that is, the relationship is considered to be not significant.

The gas pair ratios were then calculated. To reduce the error, the calculation was only carried out if the gas concentrations in the ratio exceeded the values corresponding to the "limit of gases in oil". These values depend on both the sensitivity of the chromatograph and the measuring technique and according to [3] are H₂=50, CH₄=C₂H₆=C₂H₄=15 and C₂H₂=3 µl/l. The dynamics of the defect was evaluated using the ratios of gases regulated by the IEC 60599 standard and the ETRA square. The character of the defect type change during the defect development was also analysed using Duval triangle and Nomogram method.

The proposed approach makes it possible not only to assess the nature of changes in defect types during its development, but also to analyse the possibilities of different methods for interpreting DGA results.

Research results. As an example, the following results show the dynamics of the gas content of high-voltage transformer oils during the development of spark discharges.

Example No. 1. A 330 MVA autotransformer was damaged by a spark discharge [33]. Dependences of gas concentrations and percentage of gases on the operation time during the development of the defect in this autotransformer are shown in Fig. 1.

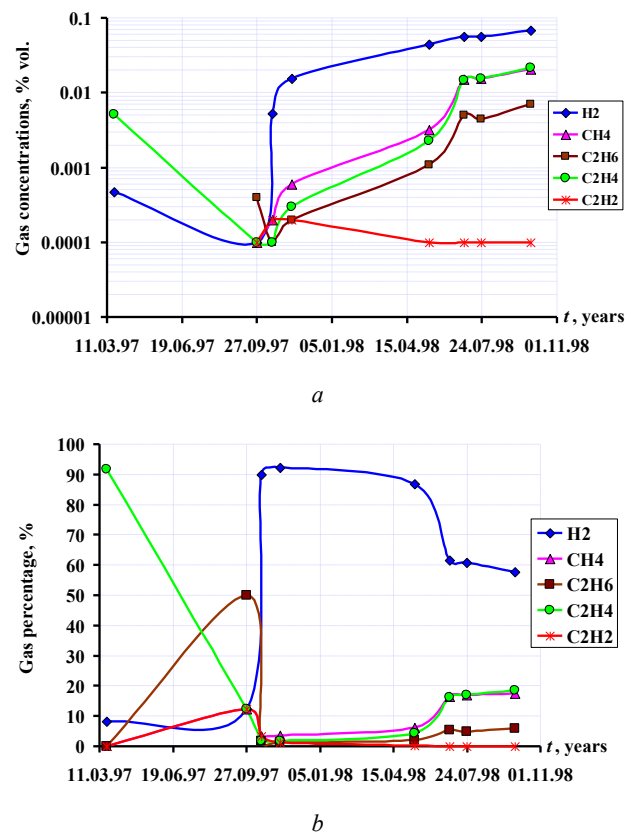


Figure 1 – Dependences of gas concentrations (a) and gas percentage (b) on operating time in a 330 kV autotransformer damaged by a spark discharge

As can be seen from the figure, during the development of the defect the gases with the maximum content were ethylene, ethane and hydrogen. The first excess of gas concentrations was recorded on 12.11.1997 for hydrogen. Then, a successive increase was observed in the concentrations of almost all gases, except for acetylene.

Table 2 shows the results of the correlation analysis between the values of concentrations and gas percentages and the operation time, as well as between the values of concentrations and percentages of individual gases.

Table 2 – Results of correlation analysis between values of concentrations and gas percentages and operation time, as well as between values of concentrations and percentages of individual gases in a 330 kV autotransformer damaged by a spark discharge

Gas	Operation time	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Gas concentrations						
H ₂	0.952	1.000	0.917	0.906	0.847	-0.083
CH ₄	0.858	0.917	1.000	0.995	0.974	-0.158
C ₂ H ₆	0.854	0.906	0.995	1.000	0.969	-0.160
C ₂ H ₄	0.733	0.847	0.974	0.969	1.000	-0.320
C ₂ H ₂	0.148	-0.083	-0.158	-0.160	-0.320	1.000
Gas percentages						
H ₂	0.441	1.000	-0.067	-0.555	-0.719	-0.429
CH ₄	0.812	-0.067	1.000	0.292	-0.336	0.046
C ₂ H ₆	-0.160	-0.555	0.292	1.000	-0.156	0.943
C ₂ H ₄	-0.543	-0.719	-0.336	-0.156	1.000	-0.213
C ₂ H ₂	-0.353	-0.429	0.046	0.943	-0.213	1.000

Table 2 shows that the results of the correlation analysis for the gas concentrations and percentage content differ significantly. A significant positive correlation between operation time and gas concentration values is found for all gases except acetylene. At the same time, a significant positive correlation between the gas percentage and the operation time was found only for methane. Hydrogen has the highest value of the paired correlation coefficient between gas concentrations and operation time. Methane has the highest value of the paired correlation coefficient between the gas percentage and the operation time. Despite increasing concentration values, the percentage of ethane, ethylene and acetylene decreases as the defect progresses. A significant correlation between the individual gases was found between all gases except acetylene. A significant correlation between the gas percentage contents was found between acetylene and ethane and between hydrogen and ethane as well as hydrogen and ethylene. At the same time with increasing of hydrogen percentage the ethane and ethylene percentage decreases, which is proved by the negative values of pair correlation coefficients. The results obtained are in good agreement with the findings given in [36], according to which the presence of a significant correlation between the concentrations of gases dissolved in oil and the operation time, as well as between individual gases, is one of the first indications of the presence of a defect. The dynamics of the defect type derived from the values of gas ratios recommended by IEC 60599 [1] in the analysed autotransformer is shown in Fig. 2.

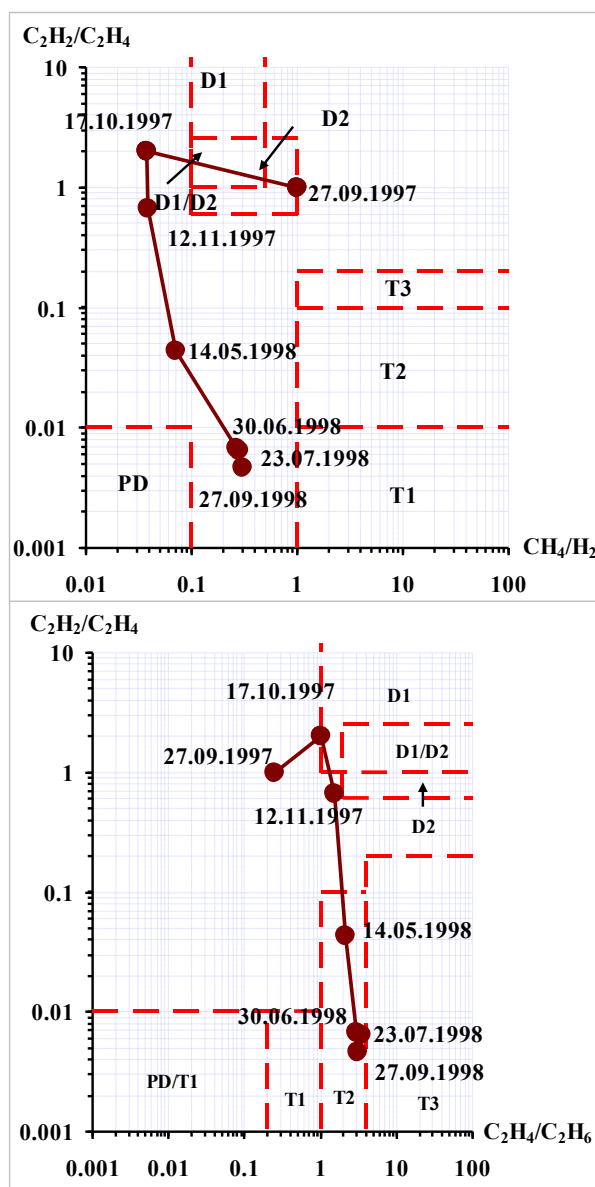


Figure 2 – Dynamics of the defect type in a 330 kV autotransformer damaged by spark discharge according to the values of the gas ratios recommended by IEC 60599

Figure 2 shows that during the development of the defect, the point values showing the diagnosis of the autotransformer shifted from one area to another. At the same time, practically for none of the measurements the diagnosis was established. According to the ETRA square [9] (Fig. 3) the defect started as partial discharges, then transformed into discharges with low energy density, after which it turned into high-temperature overheating accompanied by discharges.

However, during diagnostics of this autotransformer using Duval triangle [8] (see Fig.4) the dynamics of defect type changing was as follows: discharges with high energy density (27.09.1997), discharges with low energy density (17.10.1997), discharges with high energy density (12.11.1997), overheating with temperature 300–700 °C (from 14.05.1998 to 23.07.1998) and high-temperature overheating (27.09.1998).

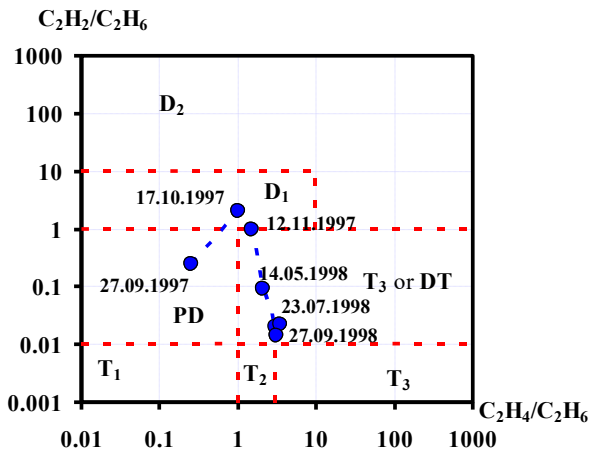


Figure 3 – Dynamics of the defect type in a 330 kV autotransformer damaged by spark discharge according to the values of the gas ratios recommended by the ETRA square

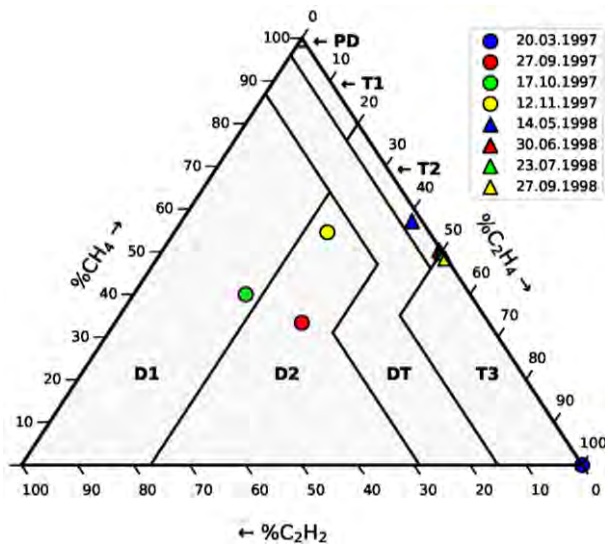


Figure 4 – Dynamics of defect type change in a 330 kV autotransformer damaged by spark discharge during diagnosis using Duval triangle

By analogy with [37, 38], analysis of the dynamics of changes in defect nomograms was also carried out (Fig. 5). Only 5 nomograms out of 8 shown in the figure were regulated by the normative document, valid in Ukraine (based on results of tests of 12.11.1997, 30.06.1998, 23.07.1998 and 23.07.1998). To determine the type of defect based on the results of tests of 23.03.1997 and 27.09.1997 the results of studies given in papers [39–42] were used. Nomogram based on the DGA results of 20.03.1997 corresponds to the combined defect – high-temperature overheating and partial discharges [39]. Nomogram based on the DGA results of 27.09.1997 corresponds to the combined defect – overheating with temperature 150–300 °C and discharges [40–42]. Nomograms made according to DGA results of 17.10.1997 and 12.11.1997 correspond to partial discharges [3, 39]. The nomogram based on the DGA results of 14.05.1998 corresponds to the combined defect of partial discharge and

high-temperature overheating [39]. The last three nomograms correspond to spark discharges [3, 34, 39].

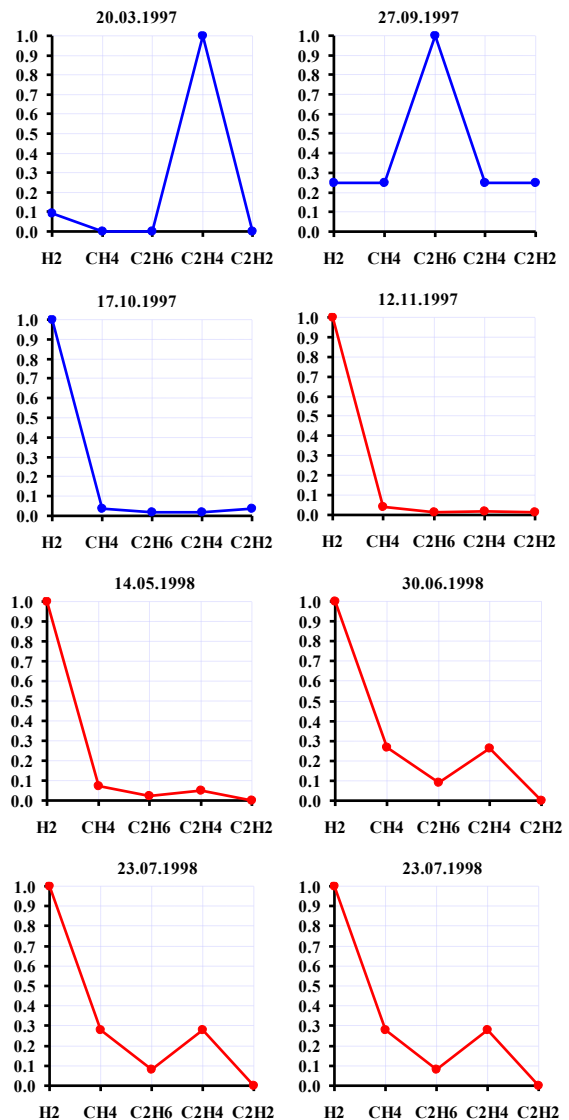
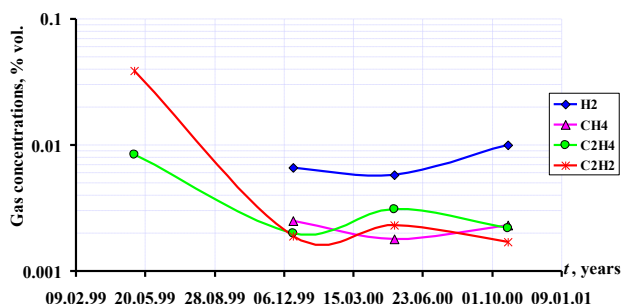


Figure 5 – Dynamics of defect nomograms in a 330 kV autotransformer damaged by spark discharge

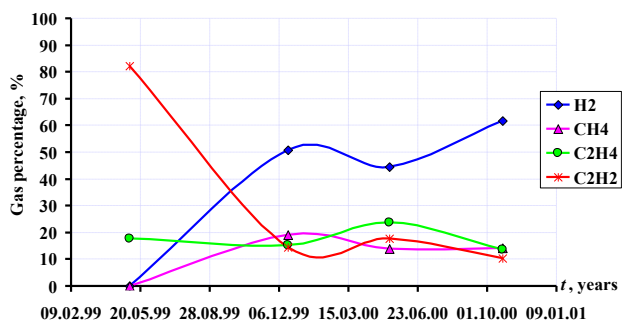
Thus, the defect type changed several times during the development of the spark discharges. But the damage to the autotransformer could have been prevented as early as the results of the DGA of 12.11.1997.

Example No. 2. Spark discharges were also detected in the 220 kV autotransformer of Buran substation [37], but this autotransformer was timely taken out for repair. Fig. 6 shows the dependences of gas concentrations and gas percentage on the operation time during the defect development. The first analysis of 04.05.1999 showed that the concentration of acetylene exceeded nearly 40 times the limit value regulated in [3], the concentration of ethylene was 0.0084 % vol. that corresponded to Level 2 in accordance with [3], but the concentration of other gases did not exceed the detection limit of the chromatograph. The next analysis, dated 19.12.1999, showed a decrease in concentrations of acetylene and ethylene, but an increase in concentrations of hydrogen and methane (Fig. 6). This

trend was observed until the autotransformer was taken out of service, but the ethane concentration never exceeded the detection limit of the chromatograph.



a



b

Figure 6 – Dependences of gas concentrations (a) and gas percentage (b) on operation time in the 220 kV autotransformer of Buran substation during spark discharge development

The results of the correlation analysis shown in Table 3 between the values of concentrations and percentages of gases and the operation duration, as well as between the values of concentrations and percentages of individual gases in the 220 kV autotransformer of Buran substation, differ from the similar results from Table 2. In particular, a significant positive correlation between the operation duration and the values of gas concentrations is found only for hydrogen and methane, for ethylene and acetylene the values of pair correlation coefficients are negative. A significant correlation is detected between the concentrations of all four gases, with a positive correlation (with increasing concentration of one gas, the concentration of the other increases) detected between methane and hydrogen as well as ethylene and acetylene, for all other gas combinations the correlation is negative. Table 3 shows that a significant positive correlation is found between the percentage of hydrogen and operation time, the percentage of acetylene decreases significantly as the defect progresses, and the percentage of methane and ethylene increases but not significantly. It is noteworthy that even though the decrease in ethylene concentration decreases during the defect development its percentage content increases insignificantly. A significant positive correlation was found between the percentage of hydrogen and methane, and a significant negative correlation between the percentage of acetylene and hydrogen as well as acetylene and methane.

Table 3 – Results of correlation analysis between values of concentrations and gas percentages and operation time, as well as between values of concentrations and percentages of individual gases in a 220 kV autotransformer of Buran substation

Gas	Operation time	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Gas concentrations						
H ₂	0.939	1.000	0.915	–	–0.923	–0.904
CH ₄	0.770	0.915	1.000	–	–0.995	–0.969
C ₂ H ₆	–	–	–	1.000	–	–
C ₂ H ₄	–0.811	–0.923	–0.995	–	1.000	0.989
C ₂ H ₂	–0.836	–0.904	–0.969	–	0.989	1.000
Gas percentages						
H ₂	0.833	1.000	0.929	–	0.457	–0.968
CH ₄	0.571	0.929	1.000	–	0.523	–0.848
C ₂ H ₆	–	–	–	1.000	–	–
C ₂ H ₄	0.240	0.457	0.523	–	1.000	–0.228
C ₂ H ₂	–0.883	–0.968	–0.848	–	–0.228	1.000

Since during the development of the defect the values of ethane concentrations did not exceed the detection limit of the chromatograph, it is not possible to determine the values of C₂H₄/C₂H₆ ratio, which does not allow to analyse the dynamics of the defect character change using gas ratios regulated by IEC 60599 and the ETRA square. Dynamics of change of defect nature in 220 kV autotransformer of Buran substation using Duval triangle is shown in Fig. 7. The figure shows that the use of Duval triangle for DGA results of the analysed autotransformer, at different stages of defect development, allowed to establish the diagnosis of discharges with high energy density (D2).

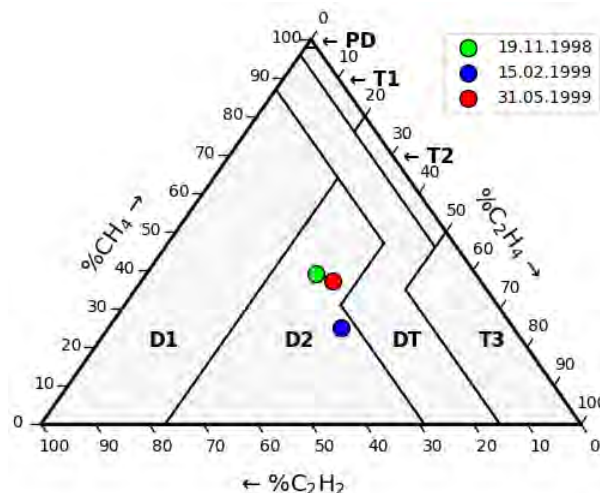


Figure 7 – Dynamics of defect type change in 220 kV autotransformer of Buran substation during diagnostics using Duval triangle

Dynamics of changes of defect nomograms in 220 kV autotransformer of Buran substation is shown in Fig. 8. The nomogram plotted by the DGA results dated 04.05.1999 is not regulated in [3]; however, according to [34, 38, 39], such a nomogram corresponds to discharges with high energy density. The last three nomograms are regulated in [3] and correspond to spark discharges.

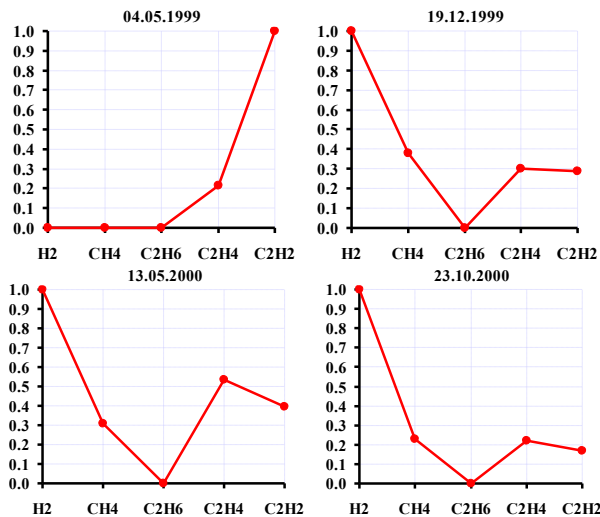


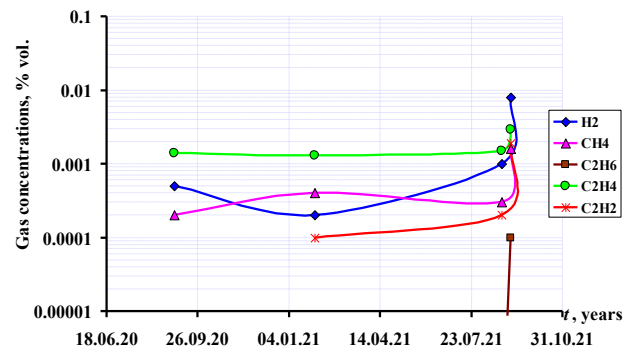
Figure 8 – Dynamics of defect nomograms change in 220 kV autotransformer of Buran substation during spark discharge development

Analysis of the results shows that in the above example, the content of saturated hydrocarbons and hydrogen increased while the content of unsaturated hydrocarbons decreased during the development of the defect. In this case, the presence of the defect could be judged from the test results of 04.05.1999.

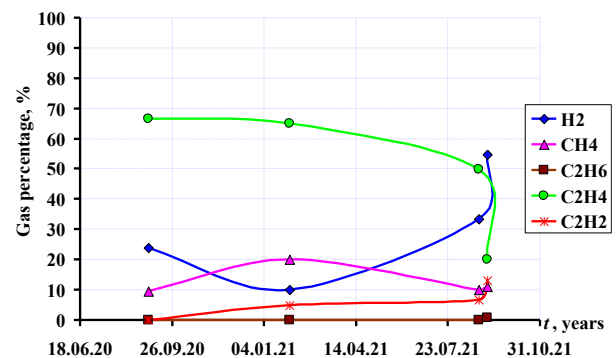
Example No. 3. The 40 MVA 110/10/6 kV TDTN (three-phase three-winding transformer with Oil Natural Air Forced cooling and on-load tap-changer) transformer was taken out of service due to "fire in the magnetic core" caused by spark discharges. Of all 5 gases analysed, only acetylene exceeded the concentration limit values and that at the time of the last test. The dependences of gas concentrations and percentage of gases on the operation time in a 40 MVA TDTN transformer are shown in Fig. 9. Table 4 shows the results of the correlation analysis between the values of concentrations and percentages of gases and the operation time, as well as between the values of concentrations and percentages of individual gases.

Comparison of the results shown in Table 4 with the similar results from Tables 2 and 3 shows that in the development of defects of the same type, the dynamics of changes in both gas concentrations and the percentage content are significantly different. In a 40 MVA TDTN transformer the values of the pair correlation coefficients between operation time and gas concentrations are lower than the values of the pair correlation coefficients between operation time and gas percentage content. In contrast, the situation in the 330 kV autotransformer (see Table 2) is reversed. Table 4 shows that acetylene, ethylene and hydrogen have the most significant correlation with operation time. A significant correlation is found between the concentrations of all gases, and a significant correlation between the gases percentage is found for all gases except methane.

The dynamics of changing the defect type in a 40 MVA TDTN transformer according to the gas ratios recommended by IEC 60599 [1] is shown in Fig. 10.



a



b

Figure 9 – Dependences of gas concentrations (a) and gas percentage (b) on operation time in a 40 MVA 110/10/6 kV TDTN transformer during spark discharge development

Table 4 – Results of correlation analysis between values of concentrations and gas percentages and operation time, as well as between values of concentrations and percentages of individual gases in 40 MVA and 110/10/6 kV transformer

Gas	Operation time	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Gas concentrations						
H ₂	0.607	1.000	0.984	0.996	1.000	0.997
CH ₄	0.598	0.984	1.000	0.992	0.980	0.994
C ₂ H ₆	0.559	0.996	0.992	1.000	0.994	0.996
C ₂ H ₄	0.606	1.000	0.980	0.994	1.000	0.995
C ₂ H ₂	0.631	0.997	0.994	0.996	0.995	1.000
Gas percentages						
H ₂	0.891	1.000	-0.626	0.863	-0.940	0.772
CH ₄	-0.248	-0.626	1.000	-0.211	0.326	-0.018
C ₂ H ₆	0.998	0.863	-0.211	1.000	-0.939	0.856
C ₂ H ₄	-0.960	-0.940	0.326	-0.939	1.000	-0.938
C ₂ H ₂	0.876	0.772	-0.018	0.856	-0.938	1.000

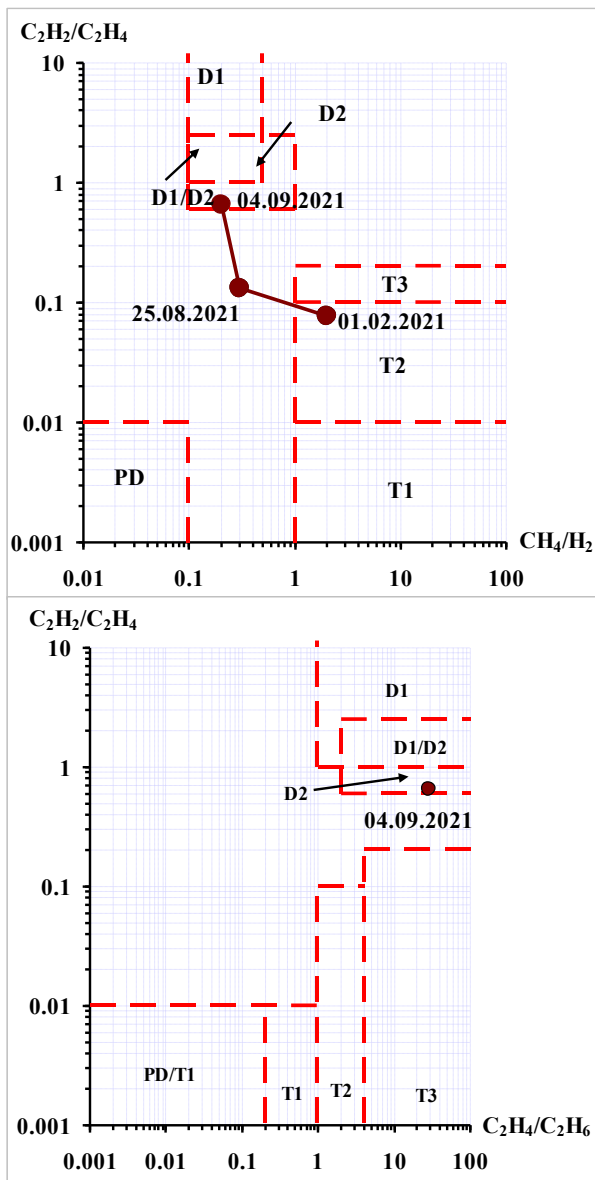


Figure 10 – Dynamics of defect type change in a TDTN 40 MVA transformer during spark discharge development according to the values of gas ratios recommended in IEC 60599

The figure shows that the values of gas ratios varied over a fairly wide range during the development of the defect, but it was not possible to establish a diagnosis for any of the measurements.

Using the Duval triangle (Fig. 11), the presence of high-temperature overheating was established for the DGA results of 31.08.2020, 01.02.2021 and 25.08.2021. However, for the test results of 04.09.2021, corresponded to a combined defect (DT) passing into high energy density discharges.

As the ethane content in the first three oil samples was below the detection limit of the chromatograph during the development of the defect, the use of the ETRA square did not allow analysing the dynamics of the defect type in a given diagnostic space. However, for the last test results of 04.09.2021, the diagnosis was high energy density discharges (Fig. 12).

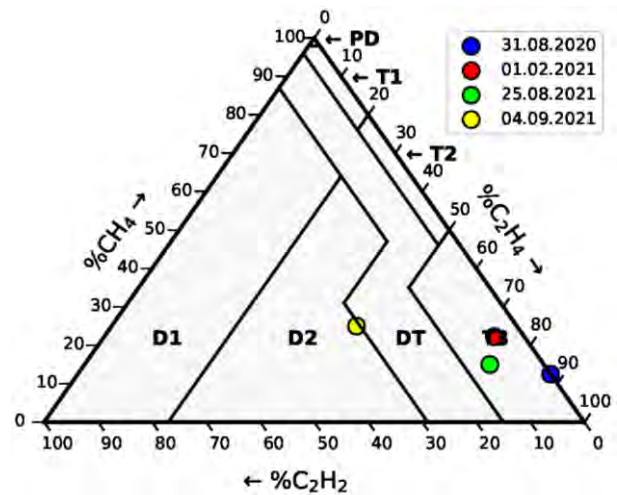


Figure 11 – Dynamics of defect type change in a 40 MVA TDTN transformer using Duval triangle diagnostics

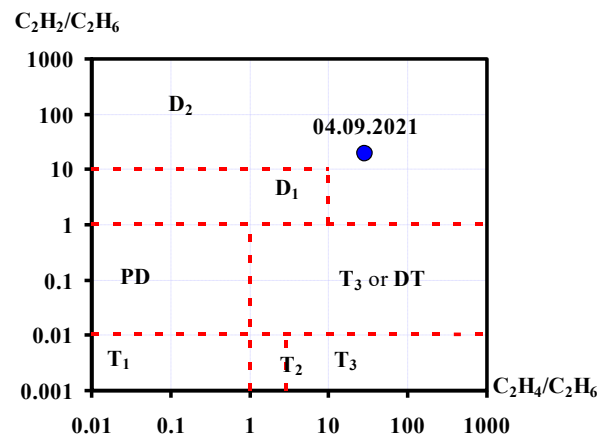


Figure 12 – Diagnostic results of the defect type in a 40 MVA TDTN transformer according to the values of the gas ratios recommended by the ETRA square

The dynamics of changes in nomograms in the process of spark discharges development is shown in Fig. 13. According to the figure the nomograms plotted by DGA results of 31.08.2020 and 25.08.2021 correspond to the presence of high-temperature overheating and spark discharges [39], the nomogram of 01.02.2021 is typical for high-temperature overheating and the nomogram of 04.09.2021 corresponds to spark discharges [3, 26, 34].

It is noteworthy that in the DGA results of this transformer dated 31.08.2020 and 25.08.2021, the hydrogen content exceeds the methane content, which is not typical for non-sealed transformers. As shown in [43], the hydrogen content is usually lower than the methane content due to the diffusion of hydrogen into the atmosphere due to its low solubility in oil in non-sealed equipment. This circumstance (excess of hydrogen content over methane content) can be used as an initial indication of the presence of electrical discharges in non-sealed oil-filled equipment.

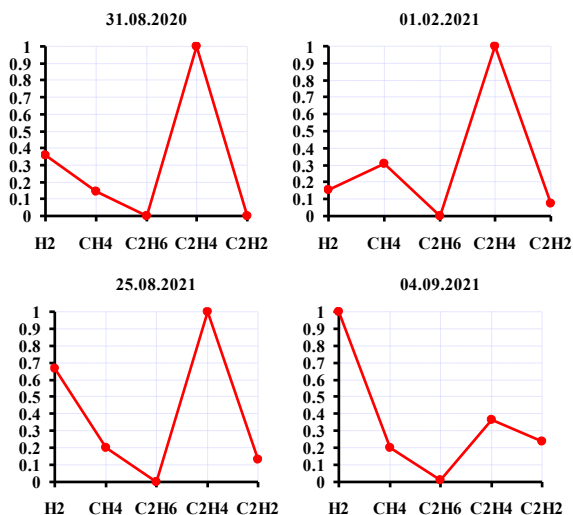


Figure 13 – Dynamics of defect nomograms in a 40 MVA TDTN transformer during spark discharge development

Example No. 4. The DGA results of an autotransformer 125 MVA 220/110 kV dated 17.03.2003 revealed spark discharges [44]. Since the authors have available DGA results only for the last three tests, no analysis of correlation relationships between values of concentrations and percentages of gases and operation time, as well as between values of concentrations and percentages of individual gases was performed for this autotransformer. The evolution of the type of defect in the analysed autotransformer in the diagnostic space regulated by the IEC 60599 standard is shown in Fig. 14. The figure shows that the use of the gas ratios recommended by IEC 60599 allowed a diagnosis to be made in only one case out of three. In particular, for the first analysis from 28.08.2002, the values of gas ratios corresponded to overheating with a temperature above 700 °C, while the value of ethylene concentration corresponded to Level 2, which, according to [3], indicates the possible presence of a defect. For measurements from 24.01.2003 and 17.03.2003 no diagnosis was established, because, according to the figure, the points representing transformer conditions do not fall into any of the diagnosis areas. In the oil sample from 24.01.2003 the concentration of ethylene exceeds the limit value of Level 2, and concentrations of other gases correspond to Level 1. In the oil sample from 17.03.2003 the concentration values of hydrogen and acetylene exceed the limit value of Level 2, concentrations of ethylene and methane correspond to Level 2 and concentrations of ethane correspond to Level 1.

The use of the ETRA square (Fig. 15) enabled a diagnosis to be made on the results of all three tests. So for the results of DGA of 28.08.2002 a diagnosis of overheating with temperature above 700 °C was given, and for the results of DGA of 24.01.2003 and 17.03.2003 a combined defect was diagnosed – overheating with temperature above 700 °C accompanied by discharges.

The diagnosis of this autotransformer using Duval triangle (Fig. 16) produced opposite diagnoses. Thus, the DGA results of 28.08.2002 were interpreted as a combined defect, while the DGA results of 24.01.2003 and

17.03.2003 were interpreted as overheating with a temperature above 700 °C.

This example clearly illustrates that the use of different methods and criteria for interpreting DGA results for the same data can lead to different diagnoses.

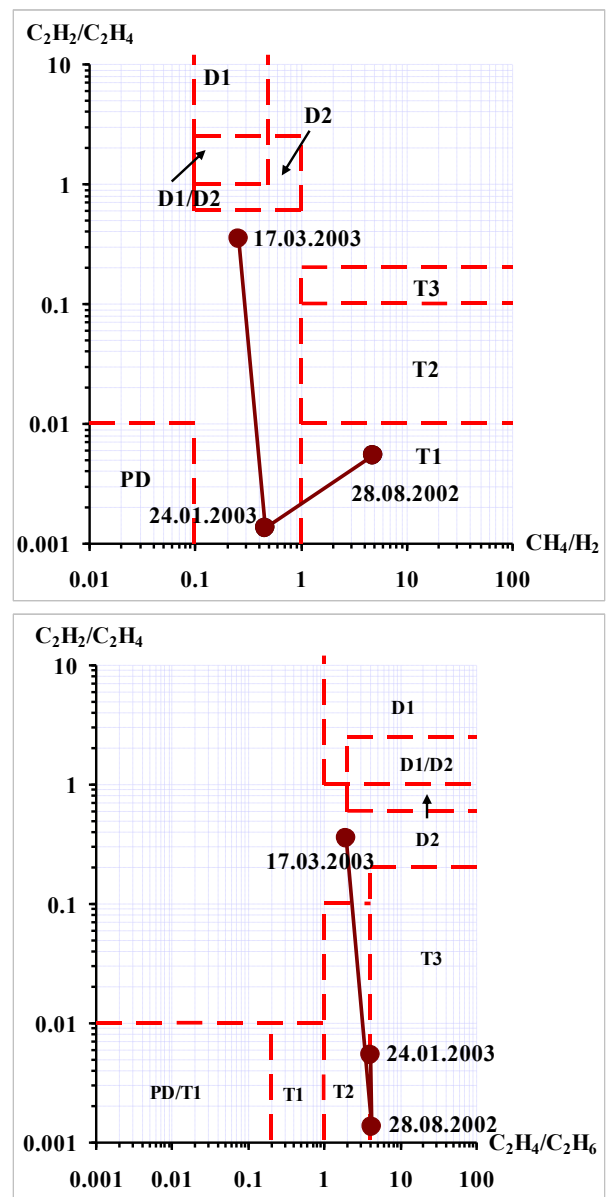


Figure 14 – Dynamics of change of defect type in a 125 MVA 220/110 kV autotransformer during spark discharge development according to the values of gas ratios recommended in IEC 60599

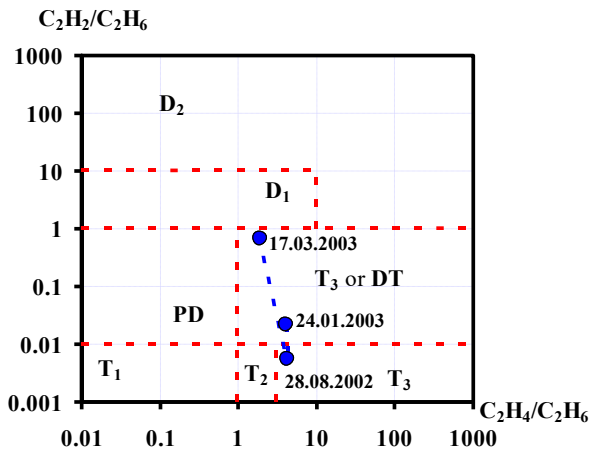


Figure 15 – Dynamics of change in defect type in a 125 MVA 220/110 kV autotransformer according to the values of the gas ratios recommended by the ETRA square

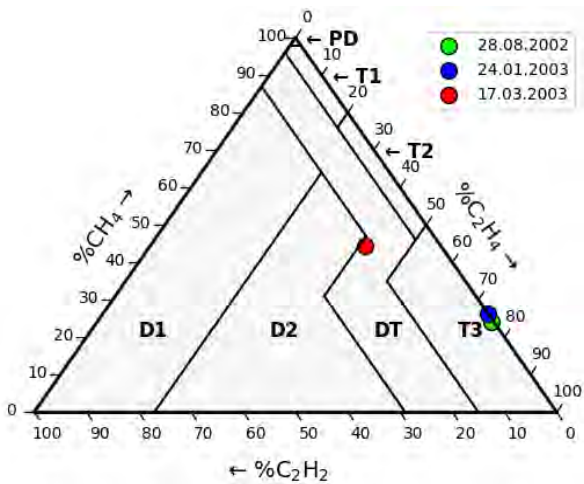


Figure 16 – Dynamics of change in defect type in a 125 MVA 220/110 kV autotransformer using Duval triangle diagnosis

Dynamics of nomogram change in autotransformer 125 MVA 220/110 kV is shown on Fig. 17. Nomogram based on DGA results from 28.08.2002 corresponds to overheating with temperature above 700 °C [3]. The nomogram based on DGA results from 24.01.2003 corresponds to overheating with temperature above 700 °C accompanied by spark discharges [39], and the nomogram based on DGA results from 17.03.2003 corresponds to spark discharges [3, 34, 39].

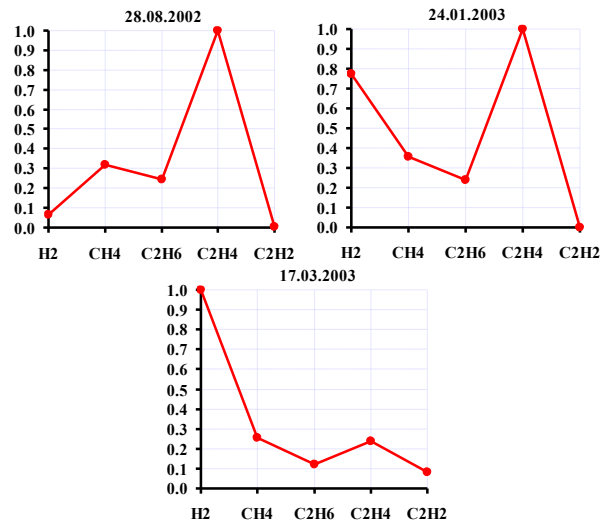


Figure 17 – Dynamics of defect nomograms in a 125 MVA 220/110 kV autotransformer during spark discharge development

Example No. 5. In the 35 kV transformer the spark discharge was detected by the DGA results of 31.05.1999, at that out of 5 analysed gases the limit value was exceeded only by acetylene concentration, ethylene concentration corresponded to Level 2, and concentration of other gases - to Level 1. It should be noted that in two previous oil samples dated 19.11.1998 and 15.02.1999 the gas concentration values corresponded to Level 1, that is, the serviceable condition. Due to the small sample size of this transformer, no correlation analysis was carried out between the values of concentrations and percentages of gases and the operation time as well as between the values of concentrations and percentages of individual gases.

The results of diagnostics of this transformer using the values of gas ratios recommended by IEC 60599 at different stages of defect development are shown in Fig. 18. The figure shows that of the three DGA results the use of the IEC 60599 standard allowed to establish a diagnosis only for the results of the first analysis of 19.11.1998 with overheating with a temperature of 300-700 °C. For the DGA results of 15.02.1999 and 31.05.1999 no diagnosis was made, since the figure shows that the points representing the condition of the transformer do not fall into any of the diagnosis areas.

Using the ETRA to diagnose this transformer allowed a diagnosis to be made for all three test results (Fig. 19).

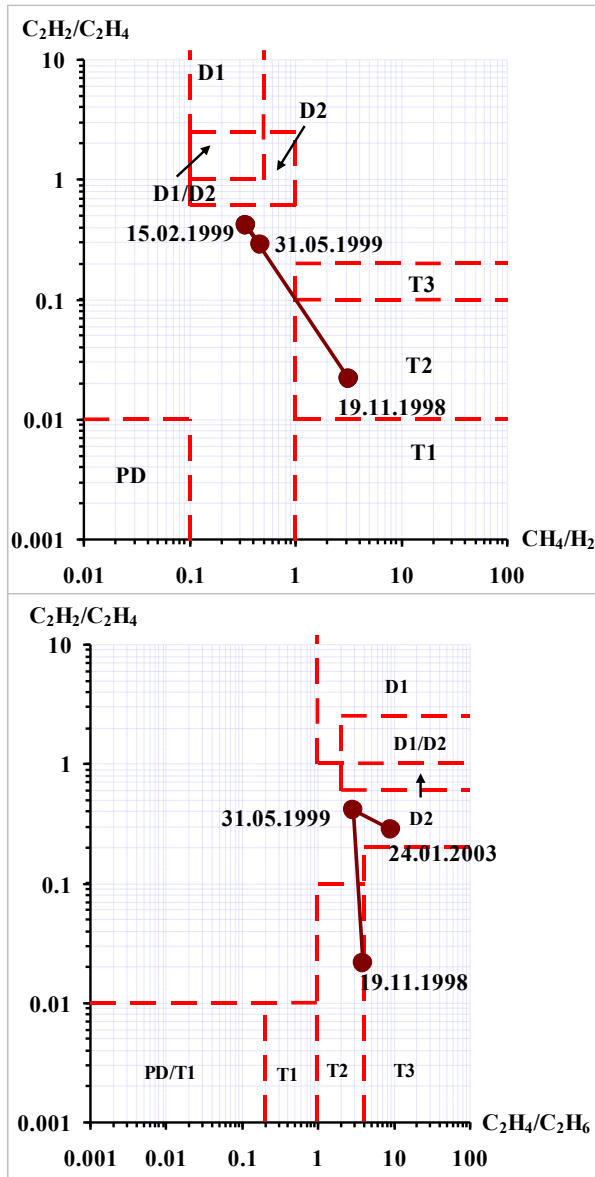


Figure 18 – Dynamics of change of defect type in a 35 kV transformer during spark discharge development according to the values of gas ratios recommended in IEC 60599

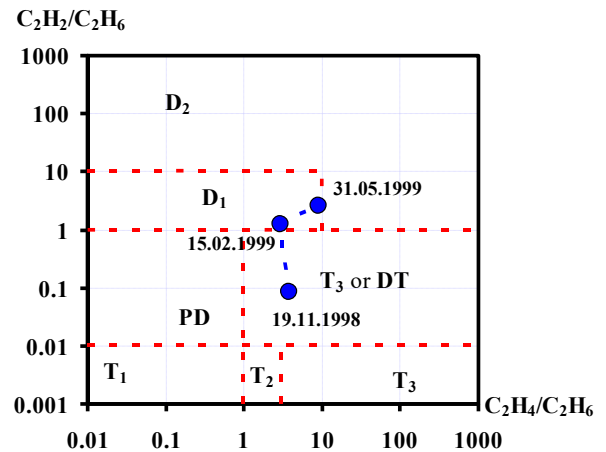


Figure 19 – Dynamics of the defect type in a 35 kV transformer, according to the values of the gas ratios recommended by the ETRA square

The figure shows that the DGA result of 19.11.98 diagnosed overheating with a temperature above 700 °C accompanied by discharges. The DGA results of 15.02.1999 and 31.05.1999 diagnosed low energy density discharges.

Diagnostics with Duval triangle (Fig. 20), DGA result of 19.11.98 were interpreted as overheating with temperature above 700 °C, and DGA results of 15.02.1999 and 31.05.1999 diagnosed a combined defect (discharges accompanied by heating).

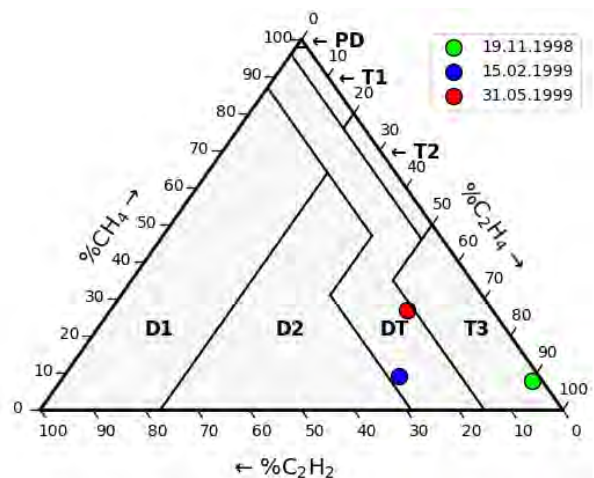


Figure 20 – Dynamics of change in defect type in a 35 kV transformer with Duval triangle diagnosis

According to the Nomogram method (Fig. 21) the DGA result of 19.11.98 correspond to a high-temperature overheating accompanied by discharges [3, 39].

The DGA result obtained on 15.02.99 also correspond to a combined defect, namely, high-temperature overheating accompanied by spark discharges [39]. The result of 31.05.1999 correspond to spark discharges [3, 34, 39].

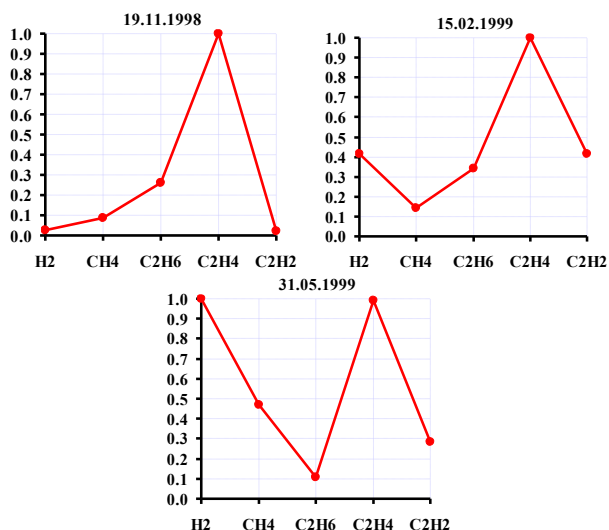


Figure 21 – Dynamics of defect nomograms in 35 kV autotransformer during spark discharge development

Conclusions. The analysis shows that in the five transformers analysed the values of diagnostic criteria at different stages of the defect development correspond to defects of different types, which does not allow predicting this defect based on the results of previous tests. At the same time the examples illustrate that the defect development takes place before the gas concentration values exceed their limit values, which enables early detection of spark discharges in high-voltage power transformers based on the DGA results. It was found that the standards and criteria regulated by IEC 60599, ETRA square and Duval triangle do not allow spark discharges to be detected as these methods do not have the areas characteristic for this type of defect and the highest number of correct diagnoses was made using the nomogram method. For all five examples given, the change of the defect type in the course of its development is observed, and consequently, when assessing the possibility of further operation of transformers, besides the degree of danger of the defect and the speed of its development, the possibility of transformation of the defect from less to more "dangerous" and fast-developing one must be taken into account. The obtained results demonstrate the possibility of early detection of spark discharges, which allows increasing the reliability of nondestructive diagnostics and prolonging the service life of transformers.

References

- IEC 60599:2015. *Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015. 78 p.
- IEEE Std C57.104-2019. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 98 p.
- COУ-Н ЕЕ 46.501:2006. *Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. Методичні вказівки*. Київ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. 91 с.

- Dornenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis. *Brown Boveri Review*. 1974. Vol. 61. P. 238–274.
- Rogers R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1978. Vol. EI-13, no. 5. P. 349–354. doi: 10.1109/TEI.1978.298141.
- Müller R., Schliesing H., Soldner K. Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft*. 1977. No. 76. P. 345–349.
- РД 153-34.0-46.302-00. *Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле*. Москва: НИЦ ЭНАС, 2001. 41 с.
- Duval M. The Duval Triangle for load tap changers non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. Vol. 24, no. 6. P. 22–29. doi: 10.1109/MEI.2008.4665347.
- Guideline for the refurbishment of Electric Power Transformers. *Electrical Cooperative Research Association*. 2009. Vol. 65, no. 1. (японською).
- Kawamura T., Kawada N., Ando K., Yamaoka M., Maeda T., Takatsu T. Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems: Session Report 12–05*. Paris, 1986. P. 1–5.
- Kulyk O. Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2020. № 1. С. 15–25. doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.
- Shutenko O., Kulyk O., Ponomarenko S. *Comparative analysis of existing standards and methodologies for interpreting DGA results: study guide for individual computational and graphical tasks*. Kharkiv: Typography Madrid, 2021. 121 p.
- Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240911
- Mharakurwa E. T., Nyakoe G. N., Akumu A. O. Power Transformer Fault Severity Estimation Based on Dissolved Gas Analysis and Energy of Fault Formation Technique. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 1–10. doi: 10.1155/2019/9674054.
- Mohamad F., Hosny K., Barakat T. Incipient Fault Detection of Electric Power Transformers Using Fuzzy Logic Based on Roger's and IEC Method. *2019 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. 2019. P. 303–309. doi: 10.1109/icc48960.2019.9068132.
- Li J., Zhang Q., Wang K., Wang J., Zhou T., Zhang Y. Optimal dissolved gas ratios selected by genetic algorithm for power transformer fault diagnosis based on support vector machine. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. Vol. 23, no. 2. P. 1198–1206. doi: 10.1109/TDEI.2015.005277.
- Illias H., Zhao Liang W. Identification of transformer fault based on dissolved gas analysis using hybrid support vector machine-modified evolutionary particle swarm optimisation. *PLOS ONE*. 2018. Vol. 13, no. 1. P. e0191366. doi: 10.1371/journal.pone.0191366.
- Zade R. S., Kudkelwar S. Analysis of DGA Methods for the Incipient Fault Diagnosis in Power Transformer Using ANN. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2018. Vol. 7, iss. 6. P. 1818–1822. doi: 10.21275/ART20183678.
- Bankar R., Desai P. Dissolved Gas Analysis in Power Transformer using Artificial Neural Network. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*. 2016. Vol. 3, no. 4. P. 322–326.
- Kulkarni A., Swami P. S., Thosar A. G. Dissolved Gas Analysis of Transformer oil using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Vol. 7, iss. 5. P. 1487–1491.
- Dai J., Song H., Sheng G., Jiang X. Dissolved gas analysis of insulating oil for power transformer fault diagnosis with deep belief network. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24, no. 5. P. 2828–2835. doi: 10.1109/TDEI.2017.006727.

22. Pamuk N. Diagnosis of Fault Type by Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil Using Petri Net Technology. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt.* 2014. Vol. 2. P. 79–86.
23. Wanjare S. B., Swami P. S., Thosar A. G. DGA Interpretation for Increasing the Percent of Accuracy by Bayesian Network Method Comparing IEC TC 10 Database. *International Journal of Engineering Trends and Technology.* 2018. Vol. 62, no. 1. P. 46–51. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V62P208.
24. Aizpurua J. I., Catterson V. M., Stewart B. G., McArthur S. D. J., Lambert B., Ampofo B., Pereira G., Cross J. G. Power transformer dissolved gas analysis through Bayesian networks and hypothesis testing. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* 2018. Vol. 25, no. 2. P. 494–506. doi: 10.1109/TDEI.2018.006766.
25. Abu-Siada A. Improved Consistent Interpretation Approach of Fault Type within Power Transformers Using Dissolved Gas Analysis and Gene Expression Programming. *Energies.* 2019. Vol. 12, no. 4. P. 730. doi: 10.3390/en12040730.
26. Zhai S., Chen X., Wei L., Chen D., Zhang L., Wang X., Wang E., Chen Z., Chen W., Deng T. Research on identification methods of gas content in transformer insulation oil based on deep transfer network. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* 2020. Vol. 31, no. 18. P. 15764–15772. doi: 10.1007/s10854-020-04138-4.
27. Wani S., Khan S., Prashal G., Gupta D. Smart Diagnosis of Incipient Faults Using Dissolved Gas Analysis-Based Fault Interpretation Matrix (FIM). *Arabian Journal for Science and Engineering.* 2019. Vol. 44, no. 8. P. 6977–6985. doi: 10.1007/s13369-019-03739-4.
28. Gomes G. et al. A Stairway Statistical Neural Model for DGA Analysis. *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.* 2020. doi: 10.48011/sbse.v1i1.2287.
29. Taha I., Dessouky S., Ghoneim S. Transformer fault types and severity class prediction based on neural pattern-recognition techniques. *Electric Power Systems Research.* 2021. Vol. 191. P. 106899. doi: 10.1016/j.epsr.2020.106899.
30. Zhong Y., Hu C., Lu Y., Wang S. Transformer Fault Diagnosis Based on Stacked Contractive Auto-Encoder Net. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2020. Vol. 1274. P. 514–522. doi: 10.1007/978-981-15-8462-6_57.
31. Huang Z., Zhou J., Huang W., Liu Y., Zhu G., Zhang K. Multiple Classifiers Based Information Fusion for Power Transformer Fault Diagnosis. *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).* 2020. P. 2971–2975. doi: 10.1109/ei250167.2020.9346733.
32. Taha I. B. M., Mansour D. A. Novel Power Transformer Fault Diagnosis Using Optimized Machine Learning Methods. *Intelligent Automation & Soft Computing.* 2021. Vol. 28, no. 3. P. 739–752. doi: 10.32604/iasc.2021.017703.
33. Shutenko O. Faults diagnostics of high-voltage equipment based on the analysis of the dynamics of changing of the content of gases. *Energetika.* 2018. Vol. 64, no. 1. P. 11–22. doi: 10.6001/energetika.v64i1.3724.
34. Kulyk O. S., Shutenko O. V. Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Spark Discharges and Discharges with High Energy Density. *Transactions on Electrical and Electronic Materials.* 2019. Vol. 20, iss. 5. P. 437–447. doi: 10.1007/s42341-019-00124-8.
35. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика.* Москва: Высшая школа, 1977. 479 с.
36. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. *Acta Electrotechnica et Informatica.* 2018. Vol. 18, no. 1. P. 11–18. doi: 10.15546/aei-2018-0002.
37. Шутенко О. В. Особенности динамики изменения критериев используемых для интерпретации результатов ХАРГ в силовых трансформаторах с разными типами дефектов. *Новое в Российской электроэнергетике.* 2017. № 9. С. 30–49.
38. Shutenko O. Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas. *Energetika.* 2019. Vol. 65, no. 1. P. 21–38. doi: 10.6001/energetika.v65i1.3973.
39. Шутенко О. В. Анализ графических образцов построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов для высоковольтных силовых трансформаторов с различными типами дефектов. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ»: зб. наук. пр. Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність.* Харків: НТУ «ХПИ», 2017. № 31 (1253). С. 97–121.
40. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of Overheating with Temperatures of 150-300 °C by Analysis of Dissolved Gases in Oil. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS).* Istanbul, Turkey, 2020. P. 71–76. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263145.
41. Shutenko O., Kulyk O. Analysis of gas content in oil-filled equipment with defects for which ethane is the key gas. *Lighting Engineering & Power Engineering.* 2020. Vol. 2, no. 58. P. 33–42. doi: 10.33042/2079-424X-2020-2-58-33-42.
42. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of discharges that are accompanied by low-temperature overheating based on the analysis of gases dissolved in the oil of high-voltage transformers. *Енергозбереження, Енергетика, Енергоаудит.* 2021. №3-4 (157–158). С. 20–33. doi: 10.20998/2313-8890.2021.03.02.
43. Шутенко О. В. Анализ графических образцов, построенных по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов с различными типами дефектов. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність.* 2017. № 31 (1253). С. 97–121.
44. Давиденко И. В. *Оценка технического состояния силовых трансформаторов по результатам традиционных испытаний и измерений: учебно-методическое пособие.* Екатеринбург: УрФУ, 2015. 96 с.

References (transliterated)

1. IEC 60599:2015. *Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis.* Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015. 78 p.
2. IEEE Std C57.104–2019. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers.* Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 98 p.
3. *SOU-N EE 46.501:2006. Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornoho obladnannya za rezul'tatamy khromatohrafichnoho analizu vil'nykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izolyatsynomu masli. Metodichni vkazivky* [Company Standard 46.501:2006. Diagnosis of oil-filled transformer equipment by chromatographic analysis of free gases sampled from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil. Methodological guidelines]. Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2007. 91 p.
4. Dornenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis. *Brown Boveri Review.* 1974, vol. 61, pp. 238–274.
5. Rogers R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Trans. on Electrical Insulation.* 1978, Vol. EI-13, no. 5, pp. 349–354. doi: 10.1109/TEL.1978.298141.
6. Müller R., Schliesing H., Soldner K. Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft.* 1977, no. 76, pp. 345–349.
7. *RD 153-34.0-46.302-00. Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivayushchikhsya defektov transformatornogo oborudovaniya po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorennykh v masle* [Guiding Document 153-34.0-46.302-00. Procedural Guidelines for Diagnostics of Defects Developing in Transformer Equipment Using the Results of Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in the Oil]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2001, 41 p.
8. Duval M. The Duval Triangle for load tap changers non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine.* 2008. vol. 24, no. 6, pp. 22–29. doi: 10.1109/MEI.2008.4665347.
9. Guideline for the refurbishment of Electric Power Transformers. *Electrical Cooperative Research Association.* 2009, vol. 65, no. 1. (in Japanese).
10. Kawamura T., Kawada N., Ando K., Yamaoka M., Maeda T., Takatsu T. Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems: SIGRE Session Report 12–05.* Paris, 1986, pp. 1–5.
11. Kulyk O. Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy:*

- Reliability and Energy Efficiency*. 2020, no. 1, pp. 15–25. doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.
12. Shutenko O. V., Kulyk O. S., Ponomarenko S. H. Porivnyal'nyy analiz diyuchykh standartiv i metodykh z interpretatsiyi rezul'tativ ARH: navchal'no-metodychnyy posibnyk dlya vykonannya indyvidual'nykh rozrakhunkovo-hrafichnykh zavdan' [Comparative analysis of existing standards and methodologies for interpreting DGA results: study guide for individual computational and graphical tasks]. Kharkiv, Typography Madrid Publ., 2021. 126 p.
 13. Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240911.
 14. Mharakurwa E. T., Nyakoe G. N., Akumu A. O. Power Transformer Fault Severity Estimation Based on Dissolved Gas Analysis and Energy of Fault Formation Technique. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019, vol. 2019, pp. 1–10. doi: 10.1155/2019/9674054.
 15. Mohamad F., Hosny K., Barakat T. Incipient Fault Detection of Electric Power Transformers Using Fuzzy Logic Based on Roger's and IEC Method. *2019 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. 2019, pp. 303–309. doi: 10.1109/icc48960.2019.9068132.
 16. Li J., Zhang Q., Wang K., Wang J., Zhou T., Zhang Y. Optimal dissolved gas ratios selected by genetic algorithm for power transformer fault diagnosis based on support vector machine. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016, vol. 23, no. 2, pp. 1198–1206. doi: 10.1109/TDEI.2015.005277.
 17. Illias H., Zhao Liang W. Identification of transformer fault based on dissolved gas analysis using hybrid support vector machine-modified evolutionary particle swarm optimisation. *PLOS ONE*. 2018, vol. 13, no. 1, pp. e0191366. doi: 10.1371/journal.pone.0191366.
 18. Zade R. S., Kudkelwar S. Analysis of DGA Methods for the Incipient Fault Diagnosis in Power Transformer Using ANN. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2018, vol. 7, iss. 6, pp. 1818–1822. doi: 10.21275/ART20183678.
 19. Bankar R., Desai P. Dissolved Gas Analysis in Power Transformer using Artificial Neural Network. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*. 2016, vol. 3, no. 4, pp. 322–326.
 20. Kulkarni A., Swami P. S., Thosar A. G. Dissolved Gas Analysis of Transformer oil using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 1487–1491.
 21. Dai J., Song H., Sheng G., Jiang X. Dissolved gas analysis of insulating oil for power transformer fault diagnosis with deep belief network. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017, vol. 24, no. 5, pp. 2828–2835. doi: 10.1109/TDEI.2017.006727.
 22. Pamuk N. Diagnosis of Fault Type by Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil Using Petri Net Technology. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt*. 2014, vol. 2, pp. 79–86.
 23. Wanjare S. B., Swami P. S., Thosar A. G. DGA Interpretation for Increasing the Percent of Accuracy by Bayesian Network Method Comparing IEC TC 10 Database. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2018, vol. 62, no. 1, pp. 46–51. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V62P208.
 24. Aizpurua J. I., Catterson V. M., Stewart B. G., McArthur S. D. J., Lambert B., Ampofo B., Pereira G., Cross J. G. Power transformer dissolved gas analysis through Bayesian networks and hypothesis testing. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018, vol. 25, no. 2, pp. 494–506. doi: 10.1109/TDEI.2018.006766.
 25. Abu-Siada A. Improved Consistent Interpretation Approach of Fault Type within Power Transformers Using Dissolved Gas Analysis and Gene Expression Programming. *Energies*. 2019, vol. 12, no. 4, pp. 730. doi: 10.3390/en12040730.
 26. Zhai S., Chen X., Wei L., Chen D., Zhang L., Wang X., Wang E., Chen Z., Chen W., Deng T. Research on identification methods of gas content in transformer insulation oil based on deep transfer network. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, vol. 31, no. 18, pp. 15764–15772. doi: 10.1007/s10854-020-04138-4.
 27. Wani S., Khan S., Prashal G., Gupta D. Smart Diagnosis of Incipient Faults Using Dissolved Gas Analysis-Based Fault Interpretation Matrix (FIM). *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019, vol. 44, no. 8, pp. 6977–6985. doi: 10.1007/s13369-019-03739-4.
 28. Gomes G. et al. A Stairway Statistical Neural Model for DGA Analysis. *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. 2020, doi: 10.48011/sbse.v1i1.2287.
 29. Taha I., Dessouky S., Ghoneim S. Transformer fault types and severity class prediction based on neural pattern-recognition techniques. *Electric Power Systems Research*. 2021, vol. 191, pp. 106899. doi: 10.1016/j.epr.2020.106899.
 30. Zhong Y., Hu C., Lu Y., Wang S. Transformer Fault Diagnosis Based on Stacked Contractive Auto-Encoder Net. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 1274, pp. 514–522. doi: 10.1007/978-981-15-8462-6_57.
 31. Huang Z., Zhou J., Huang W., Liu Y., Zhu G., Zhang K. Multiple Classifiers Based Information Fusion for Power Transformer Fault Diagnosis. *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2020, pp. 2971–2975. doi: 10.1109/ei250167.2020.9346733.
 32. Taha I. B. M., Mansour D. A. Novel Power Transformer Fault Diagnosis Using Optimized Machine Learning Methods. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2021, vol. 28, no. 3, pp. 739–752. doi: 10.32604/iasc.2021.017703.
 33. Shutenko O. Faults diagnostics of high-voltage equipment based on the analysis of the dynamics of changing of the content of gases. *Energetika*. 2018, vol. 64, no. 1, pp. 11–22. doi: 10.6001/energetika.v64i1.3724.
 34. Kulyk O. S., Shutenko O. V. Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Spark Discharges and Discharges with High Energy Density. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. 2019, vol. 20, no. 5, pp. 437–447. doi: 10.1007/s42341-019-00124-8.
 35. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaja statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, High School Publ., 1977. 479 p.
 36. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2018, Vol. 18, no. 1, pp. 11–18. doi: 10.15546/aei-2018-0002.
 37. Shutenko O. V. Osobennosti dinamiki izmenenija kriteriev ispol'zuemyh dlja interpretacii rezul'tatov HARG v silovykh transformatorah s raznymi tipami defektov [Peculiarities of Dynamics of Change of Criteria Used for Interpretation of DGA Results in Power Transformers with Different Types of Defects]. *New in Russian Electric Power Industry*. 2017, no. 9, pp. 30–49.
 38. Shutenko O. Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas. *Energetika*. 2019, vol. 65, no. 1, pp. 21–38. doi: 10.6001/energetika.v65i1.3973.
 39. Shutenko O. V. Analiz graficheskikh obraztsov postroennykh po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza rastvorenykh v masle gazov dlya vysokovol'tnykh silovykh transformatorov s razlichnymi tipami defektov [Analysis of graphical samples of gases constructed for chromatographic analysis of gases dissolved in oil for high-voltage power transformers with various types of defects]. *Visnyk Natstekhn. un-tu «KhPI»: zb. nauk. pr. Ser.: Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoeffektyvnist'* [Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Energetics: reliability and energy efficiency]. Kharkiv, NTU “KhPI” Publ., 2017, no. 31 (1253), pp. 97–121.
 40. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of Overheating with Temperatures of 150–300 °C by Analysis of Dissolved Gases in Oil. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey. 2020, pp. 71–76. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263145.
 41. Shutenko O., Kulyk O. Analysis of gas content in oil-filled equipment with defects for which ethane is the key gas. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2020, vol. 2, no. 58, pp. 33–42. doi: 10.33042/2079-424X-2020-2-58-33-42.
 42. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of discharges that are accompanied by low-temperature overheating based on the analysis of gases dissolved in the oil of high-voltage transformers. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2021, no. 3–4 (157–158), pp. 20–33. doi: 10.20998/2313-8890.2021.03.02.
 43. Shutenko O. V. Analiz graficheskikh obrazov, postroennykh po rezul'tatam KhARG dlya vysokovol'tnykh silovykh transformatorov s razlichnymi tipami defektov [Analysis of graphical samples of gases constructed for chromatographic analysis of gases dissolved in oil for high-voltage power transformers with various types of defects].

Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency. 2017, no. 31 (1253), pp. 97–121.

44. Davidenko I. V. Ocenka tehničeskogo sostojanija silovyh transformatorov po rezul'tatam tradicionnyh ispytanij i izmerenij: uchebno-metodicheskoe posobie [Assessing the technical condition

of power transformers based on the results of traditional tests and measurements: Training manual]. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2015. 96 p.

Надійшла (received) 26.09.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шутенко Олег Володимирович (Шутенко Олег Владимирович, Oleg Volodymyrovych Shutenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3141-7709>; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com

Барбашов Ігор Володимирович (Барбашов Игорь Владимирович, Igor Volodymyrovych Barbashov) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7074-4115>; e-mail: i.v.barbashov@gmail.com.

Омельяненко Галина Вікторівна (Омельяненко Галина Викторовна, Halyna Viktorivna Omelianenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: halyna.omelianenko@khpri.edu.ua.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, Р. І. ДЕМ'ЯНЕНКО, Г. І. КАРПАЛЮК

ВПЛИВ НИЗЬКОЇ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Розглядається один із параметрів якості електричної енергії – провали напруги. Описується вплив провалів напруги в мережах промислових підприємств і їх вплив на обладнання промислових підприємств. Саме технологічні процеси дуже залежні від впливу провалів напруги, для яких короточасні зупинки, перерви та зміни швидкості технологічних циклів призводять до незворотних втрат і тривалого часу для повторних запусків. Наведені причини провалів напруги, що зазвичай відбуваються через несправності в мережах загального доступу або електроустановках споживачів. Провали напруги є показниками якості електроенергії, що найчастіше зустрічаються, які впливають на роботу саме промислового обладнання. Також вразливими для провалів напруги є потужні силові напівпровідникові пристрої, забезпечені мікропроцесорами, такі як інвертори, зарядні пристрої батарей та джерела живлення, які погано переносять короточасні (50–200 мс) провали та відключення напруги живлення з подальшим його поверненням. Для можливості проведення дослідження впливу було проведено групування обладнання по чутливості до провалів напруги. Показано типи обладнання за максимально допустимою тривалістю провалу. За результатами проведення досліджень було запропоновано заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг у мережах промислових підприємств. Особливо визначено, що провали напруги призводять до кидків пускового струму, що також негативно впливає на мережу живлення, приводячи до ще більших провалів напруги, що позначається на стійкості роботи інших споживачів. І як рекомендація для механізмів електродвигунів з легкими умовами пуску рекомендовано застосовувати систему імпульсно-фазового керування, що дозволяє регулювати уставки струмообмеження, а для виконавчих механізмів приводів з важкими умовами пуску рекомендовано застосовувати частотний пуск синхронних електродвигунів, здатний автоматично підтримувати необхідний момент на валу двигуна та струм споживання.

Ключові слова: електрична мережа промислового підприємства, показник якості електроенергії, електрична енергія, провали напруги, електроспоживачі чутливі до провалів напруги, втрата потужності.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, Р. І. ДЕМ'ЯНЕНКО, А. І. КАРПАЛЮК

ВЛИЯНИЕ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Рассматривается один из параметров качества электрической энергии – провалы напряжения. Описывается влияние провалов напряжения в сетях промышленных предприятий и их влияние на оборудование промышленных предприятий. Именно технологические процессы очень зависимы от воздействия провалов напряжения, для которых кратковременные остановки, перерывы и изменения скорости технологических циклов приводят к необратимым потерям и длительному времени для повторных запусков. Приведены причины провалов напряжения, обычно происходящие из-за неисправностей в сетях общего доступа или электроустановках потребителей. Провалы напряжения являются наиболее часто встречающимися показателями качества электроэнергии, которые влияют на работу именно промышленного оборудования. Также уязвимыми для провалов напряжения мощные силовые полупроводниковые устройства, снабженные микропроцессорами, такие как инверторы, зарядные устройства батарей и источники питания, плохо переносящие кратковременные (50–200 мс) провалы и отключение напряжения питания с последующим его возвратом. Для возможности проведения исследования воздействия была проведена группировка оборудования по чувствительности к провалам напряжения. Показаны типы оборудования по максимально допустимой продолжительности провала. По результатам проведения исследований были предложены меры, минимизирующие последствия провалов напряжений в сетях промышленных предприятий. Отдельно определено, что провалы напряжения приводят к броскам пускового тока, что также негативно влияет на питающую сеть, приводя к еще большим провалам напряжения, что сказывается на устойчивости работы других потребителей. И в качестве рекомендации для механизмов электродвигателей с легкими условиями пуска рекомендуется применять систему импульсно-фазового управления, позволяющую регулировать уставки токоограничения, а для исполнительных механизмов приводов с тяжелыми условиями пуска рекомендуется применять частотный пуск синхронных электродвигателей, способный автоматически поддерживать необходимый момент на валу двигателя и ток потребления.

Ключевые слова: электрическая сеть промышленного предприятия, показатель качества электроэнергии, электрическая энергия, провалы напряжения, электропотребители чувствительны к провалам напряжения, потеря мощности.

Y. S. BEDERAK, O. G. GRIB, I. T. KARPALIUK, R. I. DEMIANENKO, H. I. KARPALIUK

EFFECT OF LOW QUALITY OF ELECTRIC POWER ON THE OPERATION OF ELECTRIC POWER SUPPLY

One of the parameters of the quality of electrical energy is considered are voltage dips. The article describes the influence of voltage dips in the networks of industrial enterprises and their influence on the equipment of industrial enterprises. It is the technological processes that are very dependent on the impact of voltage dips. For which short-term stops, breaks and changes in the speed of technological cycles lead to irreversible losses and a long time for repeated starts. The reasons for voltage dips are given, usually due to faults in public networks or electrical installations of consumers. Voltage dips are the most common power quality indicators that affect the performance of industrial equipment. Power semiconductors equipped with microprocessors, such as inverters, battery chargers and power supplies, which are also vulnerable to voltage sags, cannot tolerate short-term (50–200 ms) sags and power failure followed by voltage reconnection. To make it possible to study the impact, the equipment was grouped according to its sensitivity to voltage dips. The types of equipment are shown according to the maximum allowable duration of the dip. Based on the results of the research, measures were proposed to minimize the consequences of voltage dips in the networks of industrial enterprises. Separately, it was determined that voltage dips lead to inrush current surges, which also negatively affects the supply network, leading to even larger voltage dips, which affects the stability of the operation of other consumers. And as a recommendation for mechanisms of electric motors with light starting conditions, it is recommended to use a pulse-phase control system that allows you to adjust the current limiting settings, and for actuators of drives with severe starting conditions, it is recommended to use a frequency start of synchronous electric motors that can automatically maintain the required torque on the motor shaft and current consumption.

Keywords: electrical energy, power quality indicator, voltage dips, consequences of voltage dips, economic damage.

© Я. С. Бедерак, О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, Р. І. Дем'яненко, Г. І. Карпалюк, 2021

Постановка проблеми. Один із очевидних наслідків провалів напруги в мережах промислових підприємств є вихід з ладу відповідального обладнання і як наслідок брак та/або недовипуск продукції.

Технологічні процеси дуже залежні від впливу провалів напруги, що може призводити до різних за характером втрат. Особливо відчутний вплив провали напруги надають на такі технологічні процеси із безперервними виробництвами. Які характерні для хімічних виробництв, машинобудуванні, та ін. галузях. Для яких короточасні зупинки, перерви та зміни швидкості технологічних циклів призводять до незворотних втрат і тривалого часу для повторних запусків. Технологічний ланцюг випуску продукції на таких виробництвах зазвичай складний і включає безліч апаратів. Процеси виробництва де технологічний процес відбувається при певних значеннях температури, тиску, при певних об'ємних або вагових співвідношеннях реагентів, де зміна в пропорціях параметрів обов'язково призводить до повторного налаштування, а це не тільки час але й витрати енергії і часу.

Деякі електроприводи великої одиничної потужності не підлягають самозапуску, що призводить до відключення їх під час роботи автоматичного вмикання резерву (АВР). До відключень обладнання призводить також і спрацювання захисних апаратів та реле в ланцюгах контролю, сигналізації та блокування технологічних агрегатів. У деяких випадках достатньо одному з механізмів технологічного ланцюжка зупинитися або навіть знизити свою продуктивність, як параметри технологічного процесу перевищать критичні значення і його буде зупинено системою протиаварійної автоматики. Шкода, що виникає при цьому, у кращому випадку виявляється у псуванні частини продукції, а в гіршому – потрібна повна зупинка технологічного процесу.

Причини провалів напруги зазвичай відбуваються через несправності в мережах загального доступу або електроустановках споживачів. Визначення провалу напруги наведено в стандарті [1] де зазначено, що провал напруги це тимчасове зменшення напруги у конкретній точці електричної системи нижче встановленого граничного значення. Порогове значення початку провалу вважається рівним 90 % опорної напруги.

Провал напруги, як правило, пов'язаний із виникненням та закінченням короткого замикання або іншого різкого зростання струму в системі або електроустановці, підключеної до електричної мережі. У трифазних системах електропостачання за початок провалу напруги приймають момент, коли напруга в одній з фаз падає нижче за порогове значення початку провалу напруги, за закінчення провалу напруги приймають момент, коли напруга у всіх фазах зростає вище порогового значення закінчення провалу напруги. Тривалість провалу напруги може бути змінена від 10 мс до 1 хв. Це може бути викликано також наявністю підживлення від потужних

синхронних двигунів, підключених до електричної мережі.

У стандарті [2] наведено визначення такого поняття як переривання напруги як ситуація, за якої напруга в точці передачі електричної енергії менше 5 % опорної напруги. Переривання напруги відносять до створюваних навмисно, якщо користувач електричної мережі поінформований про майбутнє переривання напруги, і до випадкових, що викликаються тривалими або короточасними несправностями, зумовленими, в основному, зовнішніми впливами, відмови обладнання або впливом електромагнітних перешкод.

Створювані навмисно переривання напруги, зазвичай, обумовлені проведенням запланованих робіт у електричних мережах. Випадкові переривання напруги поділяються на тривалі (тривалість понад 3 хв) та короточасні (тривалість не більше 3 хв).

Щорічна частота тривалих переривань напруги (тривалістю понад 3 хв) значною мірою залежить від особливостей системи електропостачання (насамперед застосування кабельних або повітряних ліній) та кліматичних умов. Короточасні переривання напруги найімовірніше за її тривалості менше кількох секунд. У трифазних системах електропостачання до переривання напруги відносять ситуацію, при якій напруга менше 5 % опорної напруги у всіх фазах. Якщо напруга менше 5 % опорної напруги не у всіх фазах, ситуацію розглядають як провал напруги [2].

Одним із показників якості електроенергії є провал напруги. Він дуже часто зустрічається при живленні промислового обладнання і впливає на його роботу. В наслідок чого, через провали напруги, відбувається понад 30 зупинок виробництва за рік і 2–3 зупинки на рік через відключення.

Електродвигуни, включаючи вироби з регульованим приводом, особливо вразливі перед провалами напруги, оскільки навантаження все ще вимагає енергії, якої, за винятком інерції частин, що рухаються, вже недостатньо. За відсутності напруги на асинхронних електродвигунах протягом 300–500 мс вектори залишкової електрорушійної сили навантажених електродвигунів можуть залишитися у протифазі з вектором напруги мережі. В результаті, в момент відновлення живлення в ланцюзі електродвигунів виникає імпульс струму з такою амплітудою, яку можна порівняти зі струмом короткого замикання (КЗ), який може викликати глибокі провали напруги, відключення розчіплювачів захисних пристроїв та відключення електродвигунів. Короточасні провали напруги тривалістю менше 300 мс (найпоширеніші в мережі) не завдають особливої шкоди електродвигунам.

Провали напруги в мережі 0,4 кВ на промислових підприємствах можуть викликати серйозні порушення виробничого циклу, пов'язані з масовим відключенням (через відпадання магнітних пускатів або контакторів), з самозапуском великої кількості електродвигунів, що саме по собі викликає значне зниження напруги в мережі.

Особливістю низьковольтних мереж змінного струму власних потреб підстанцій є те, що вони не містять технологічного обладнання, що не допускає перерв живлення, а всі найбільш відповідальні споживачі електроенергії (релейний захист, реєстратори аварійних режимів, системи зв'язку, сигналізації та телеуправління) підключені, як правило, від потужної акумуляторної батареї. Водночас, від ланцюгів власних потреб змінного струму підстанцій отримують живлення потужні силові напівпровідникові пристрої, забезпечені мікропроцесорами, такі як інвертори, зарядні пристрої батарей та джерела живлення. Практичний досвід експлуатації таких пристроїв показує, що вони погано переносять короткочасні (50–200 мс) провали та відключення напруги живлення з подальшим його поверненням.

Іноді такі пристрої встигають зависнути навіть під час автоматичного швидкодіючого перемикавання з основного на резервне джерело живлення. Ще однією «хворобою» потужних зарядних пристроїв, що містять потужні силові трансформатори живлення на вході, є дуже великі пускові струми, що виникають при раптовому зникненні та подальшому поверненні живлення, що викликає відключення такого пристрою електромагнітним розчіплювачем вступного автомата. Стан справ у ланцюгах власних потреб підстанцій значно посилюється в деяких випадках, коли навіть одиночні зареєстровані провали напруги тривалістю 100–200 мс викликають багаторазові спрацьовування та відпускання потужних електромагнітних контакторів у ланцюги перемикавання з основного на резервне джерело живлення.

У системах з декількома електроприводами керуючі елементи, визначивши зниження напруги, можуть подати сигнал на відключення двигуна при різних фактичних значеннях зменшеної напруги та застосувати різні величини уповільнення порівняно один з одним, що призведе до повної втрати контролю над таким швидкоплинним процесом [3].

Групування обладнання по чутливості до провалів напруги. Обладнання загального призначення визначається меншою чутливістю до якості електроенергії, порівняно з іншими видами електроприймачів, і може працювати без збоїв при значній глибині та тривалості провалів.

Найбільш чутливим обладнанням до провалів напруги є двигуни з електронним управлінням, різноманітна обчислювальна техніка, що має широке розповсюдження. Таке обладнання чутливе до провалів близько 10 % тривалістю менше 0,05, що значно підвищує вимоги до якості електропостачання [4]. За ступенем чутливості до провалів напруги розрізняють сім видів електроприймачів (за даними Electric Power Research Institute (EPRI) – Інституту дослідження електроенергетики США) (наведені за чутливістю до провалів):

- реле захисту;
- контактори;

- джерела постійного струму (блоки живлення персональних комп'ютерів, контролери);
- трифазні джерела живлення;
- вакуумні насоси;
- турбонасоси;
- електроприводи змінного струму.

Відповідно, що кількість зупинок обладнання буде більшою для обладнання із більшою чутливістю до провалів тому таке обладнання потребує відповідної уваги. Вкрай важливо визначити поріг чутливості тих елементів, які відповідають за виконання всього технологічного процесу на промислових підприємствах, щоб запобігти зупинкам (табл. 1).

Таблиця 1 – Поріг чутливості для кожного виду електроприймача або елемента керування системами електропостачання (за даними EPRI)

Тип обладнання	Залишкова напруга, %	Максимально допустима тривалість провалу, коли обладнання залишається в роботі, мс
Пускач електродвигуна	50	40
Двигун зі змінною частотою обертання	85	10
Контролер із програмованою логікою	50	8–20
Частотний перетворювач	82	1,5
Регульовані електроприводи	50–80	2–3
Контролер технологічного процесу	70	<8
Верстати з числовим програмним управлінням	70	<8
Контролер електроприводу постійного струму	88	<8
Персональні комп'ютери	50–70	60–160
Контактори	50–60	20–30
Електромагнітний вимикач	50	10
Електромагнітне реле	50–60	15–40
Медичне обладнання	60	130

Тільки за наявності стаціонарного контролю якості, а також інформації від переносних вимірювальних комплексів, можливо проводити аналіз та готувати заходи щодо покращення якості електроенергії. Для цього успішно можуть використовуватися реєстратори з високим класом точності. Вимірювання необхідно проводити в характерних точках мережі, наприклад, в центрах живлення, в точках загального приєднання споживачів. Споживач, маючи ці відомості, вирішує питання забезпечення безперебійності електропостачання, встановлених у його системі електропостачання шляхом резервування живлення, підвищення швидкодії засобів автоматизації, застосування

автономних джерел живлення та різних систем безперебійного живлення [5].

Після встановлення захисного обладнання, також потрібно контролювати ефективність його роботи. Для промислових підприємств потрібна система контролю провалів та переривань напруги, для якої функції контролю інших показників якості електричної енергії є другорядними, має мінімальну вартість і не потребує високої кваліфікації користувачів та обслуговуючого персоналу [6].

Отримані в результаті розрахунків дані щодо тривалості та глибини провалів сортуються за тривалістю та зображуються графічно у просторі параметрів потоку провалів з координатами реально виявлених поєднань [7]: тривалості провалу (t_{np} , сек); остаточної напруги ($U_{ост}$, %); частоти (w , 1/год).

Ці дані є характеристикою системи електропостачання.

Заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг у мережах промислових підприємств. Заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг, систематизовані В. С. Фішманом [8] та В. І. Гуревичем [9].

1. Розробка таких схем роботи синхронного двигуна (СД), при яких досягається стійкість його роботи за рахунок надійного живлення систем збудження. Бажано виконувати їх так, щоб збуджуючі пристрої жилися від джерела, напруга якого не залежить від напруги основного джерела живлення електродвигуна. У практиці експлуатації трапляються випадки відключення систем збудження (СД) при відновленні живлення після провалу напруги, що пов'язано з кидком струму збудження та спрацьовуванням захисту тиристорів. Але в цьому випадку є інша небезпека: коли відбувається провал напруги у такого джерела, можливе відключення СД щодо втрати збудження. Якщо на СД встановлені мікропроцесорні збудники, то вони можуть зробити так, щоб протягом $0,5 \div 1$ с при зникненні (або зниженні) напруги в мережі живлення збудників 380 В, вони б не видавали аварійний сигнал на відключення вимикача 6 кВ і при відновленні робочого рівня напруги продовжили роботу з форсованим струмом збудження.

2. Створення схем, що приводять до зменшення ймовірності відключення магнітних пускатів відповідальних електродвигунів при найчастіших видах пошкоджень – однофазних коротких замикань в мережах 110 кВ за рахунок підключення котушок управління магнітними пускатями із групою з'єднання обмоток силового трансформатора 10 (6)/0,4 кВ [10].

3. Використання схем із застосуванням контакторів керування із можливістю утримання у включеному положенні. Однак такі схеми можна застосовувати тільки тоді, коли це допустимо як з міркувань техніки безпеки, так і за умовами технології, оскільки можливість повторного включення не обмежується за часом.

4. Створення умов швидкого відключення контактора живлення власних потреб (за проміжок часу 10–12 мс) на підстанціях в момент зниження рівня

напруги в мережі нижче 160 В. Забезпечення технічної можливості повернення контактора у початковий стан при відновленні рівня напруги при значеннях вище 185 В (витримка часу має становити 5–10 с).

Підключення і відключення ланцюгів потреб до трансформаторів потреб здійснюється зазвичай за допомогою потужних електромагнітних контакторів на струми 200–400 А з котушками управління змінного струму. Ці контактори є найважливішими елементами системи живлення власних потреб, від властивостей яких залежить надійна робота всієї підстанції.

Аналіз отриманих осцилограм показує, що повний час відключення контактора (тобто час від моменту подачі напруги на котушку до моменту замикання його головних контакторів) становить близько 20 мс (20–40 мс за паспортними даними), а час повного вимкнення (тобто час від моменту вимкнення напруги на котушці до моменту розриву головних контактів) становить близько 15–18 мс (10–30 мс для номінальної напруги та 10–15 мс для напруги 0,8 від номінальної за паспортними даними). Такі невеликі для такого великого та важкого апарату часу спрацьовування та відпускання свідчать про те, що при типових за часом, а також при переміжних провалах та відновлення напруги контактор встигатиме відключати та повторно включати головні ланцюги живлення кілька разів. Більше того, реакція контактора на провали напруги на 75 % номінального значення складніша, ніж на 100 % провали, при цьому час відпадання контактора в першому випадку приблизно на 40–50 % менше, ніж у другому, і може становити 10 мс навіть для великого апарату. Аналіз поведінки контактора при зниженні та збільшенні напруги живлення його котушки управління показав, що при зниженні напруги змінного струму на котушці контактора від номінального значення до 150–135 В його магнітна система починає сильно вібрувати, а амплітуда вібрацій така, що його головні контакти замикаються та розмикаються. Такий же режим роботи виникає при збільшенні змінної напруги на котушці від нуля до 160–185 В. Можливість роботи контактора в такому режимі спільно з його високою швидкістю означає, що навіть при одноразовому, стійкому протягом 100–200 мс провалі напруги до величини 135–150 В контактор перетворюється на потужний генератор глибоких багаторазових провалів напруги в ланцюгах власних потреб підстанції, викликаючи сильний негативний вплив на силову електронну апаратуру. Такий же результат може призвести до спроби увімкнення контактора при нарузі 150–170 В.

Одноразова перерва в 5–10 с у мережі потреб змінного струму підстанцій не викликає серйозних порушень роботи підстанції, що має потужну акумуляторну батарею, від якої живляться найбільш відповідальні споживачі. Водночас, такий алгоритм роботи контакторів може запобігти серйозним збоєм у роботі потужного електронного обладнання.

5. Використання додаткових проміжних реле в схемах керування електродвигунами. Таке реле має низьку напругу повернення (близько $0,05 U_{ном}$) у

поєднанні з витримкою часу на повернення $0,5 \div 1,1$ с, завдяки чому електродвигун відновить свою роботу навіть після глибоких короточасних провалів напруги. При відключенні живлення завдяки підживленню від синхронних та асинхронних електродвигунів напруга зникає не відразу, тому фактична витримка часу буде значно більшою за $0,5 \div 1,1$ с [11].

6. Створення схем, що дозволяють використовувати декілька послідовних черг при повторному включенні електродвигунів. Окремі черги можуть запускатися через задані проміжки часу, або в міру підвищення напруги або зниження струму самозапуску електродвигунів попереднього ступеня. Подібні схеми розробляються та впроваджуються спеціалізованими пусконаладжувальними організаціями.

7. Використання релейних захистів із використанням мікропроцесорних пристроїв. Такі сучасні захисти мають показники збільшеної швидкодії захисту; скороченого рівня селективності за часом. За допомогою мікропроцесорного пристрою можна застосовувати логічну селективність. Тобто є можливість відмовитися від селективності за часом і запобігати можливим аваріям використовуючи діагностику стану електрообладнання.

8. Створення схем АВР. Звичайне АВР забезпечує включення резервного живлення після відключення вступного вимикача і після згасання напруги на секції, що резервується. На промислових підприємствах необхідно забезпечувати безвідмовну роботу схем АВР на напрузі 10 (6) та 0,4 кВ.

9. Застосування схем, що дозволяють підтримувати напругу в інтервалі 35–60 % від номінальної напруги мережі $U_{ном}$ для забезпечення рівня напруги відпадання пускачів і контакторів при зниженні напруги. Необхідно контролювати цю величину і за необхідності проводити налаштування або регулювання пускачів та контакторів.

10. Застосування схем відключення електродвигунів 6 і 0,4 кВ із витримкою часу на відключення при самозапуску електродвигунів.

11. Використання заходів із контролю струму збудження синхронних електродвигунів та контролю їх коефіцієнта завантаження. Перевантажені СД легко випадають із синхронізму при невеликих провалах напруги. В експлуатації доцільно підтримувати струм збудження близьким до номінального. Одним із засобів підвищення результуючої стійкості синхронних двигунів є «...робота в нормальних режимах з номінальними струмами збудження. Робота з номінальним струмом збудження забезпечує найбільший можливий синхронний момент та прискорює досягнення стельового значення струму при форсуванні збудження. Це найпростіший засіб знизити чутливість двигунів до коливань напруги. Робота зі зниженим струмом збудження, особливо з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці, виправдана лише у випадках, де протиаварійні заходи не потрібні...» [13].

12. Застосування схем швидкодіючого АВР на напрузі 10 (6) кВ [10]. Швидкодіюче АВР забезпечує можливість включення резервного живлення до того, як загасне напруга на секції, що резервується, завдяки контролю за величиною ΔU – різницею напруг на резервованих та резервуючих секціях. Швидкодіючий АВР характеризується надзвичайно малим (від кількох часток періоду до кількох періодів змінного струму) часом перерви живлення, протягом якого синхронні електродвигуни не встигають вийти з синхронізму, а асинхронні практично не знижують швидкість обертання. Однак швидкодіючий АВР має істотний недолік: напруга на секції, що резервується, знижується так само глибоко, як і на резервованій, тільки на менший час. При цьому на секції, що резервує, можуть мати місце самовідключення електроприймачів. Також при використанні швидкодіючого АВР збільшується струм КЗ, який має розірвати вимикач на введенні. Застосування швидкодіючого АВР може призвести до тяжких наслідків у разі відмови у вимкненні вхідного вимикача.

13. Створення схем для використання пристроїв плавного пуску потужних високовольтних електродвигунів.

Прямий пуск високовольтного електродвигуна супроводжується $6 \div 8$ -кратним кидком пускового струму, що створює ударний електромагнітний момент, що передається через вал двигуна на механізм, що наводиться в рух. Виникаючі великі знакозмінні електродинамічні зусилля в статорній обмотці призводять до погіршення ізоляції секцій і вигину лобових частин обмотки внаслідок зміщення провідників один до одного. Знакозмінний момент викликає вібрацію як самого електродвигуна, так і механізму, що приводиться в рух. В результаті ударні навантаження призводять до руйнування та пробую ізоляції обмоток статора електродвигунів, перегорання міжкатушкових з'єднань, обгорання вивідних кінців, полумок валів, сполучних муфт, редукторів та інших неполадок. Також несприятливо позначаються кидки пускового струму на мережу живлення, приводячи до великих провалів напруги, що негативно позначається на стійкості роботи інших споживачів.

Тому доцільно застосовувати пристрої плавного пуску, які забезпечують протягом заданого часу розгону електродвигуна плавне наростання напруги на обмотках статора від нуля до номінального значення та збільшення пускового струму плавно із заданим струмообмеженням.

Причому необхідно звертати увагу, що для механізмів електродвигунів з легкими умовами пуску та «вентиляторною» (квадратичною залежністю від швидкості) характеристикою навантажувального моменту (відцентрові компресори, насоси, вентилятори, димососи та інші аналогічні механізми) необхідно застосовувати систему імпульсно-фазового керування, що дозволяє регулювати уставки струмообмеження від 1,0 до 4,0 $I_{ном}$. Для виконавчих механізмів приводів з важкими умовами пуску, таких

як шарові млини, конвеєри, вентилятори з великими інерційними масами, необхідно застосовувати частотний пуск синхронних електродвигунів, здатний автоматично підтримувати необхідний момент на валу двигуна та струм споживання не більше $1,5 I_{ном}$. Така система плавного пуску ідеально підходить для систем електропостачання з обмеженою потужністю (наприклад, для блоків трансформатор-двигун, де потужності трансформатора недостатньо для пуску електродвигуна).

Висновки. Розглянуто проблему впливу провалів напруги на обладнанні промислових підприємств. Згруповано споживачів по чутливості до величин провалів напруги, що дозволило сконцентруватися на найефективніших заходах із захисту від провалів напруги. Проведено аналіз літератури із видів захисту і виходячи із практичних наробок, запропоновано перелік заходів щодо захисту електрообладнання промислових підприємств від провалів напруги. Результат проведеної роботи потребує створення автоматичного приладу із захисту обладнання, тому роботу по вивченню впливу провалів напруги буде продовжено.

Список літератури

1. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 56 с.
2. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруження в системах електропостачання загального призначення (EN 50160:2010, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 32 с.
3. Карташев І. І. Провали напруження. Реальність прогнозів і схемні рішення захисту. *Новості ЕлектроТехніки*. 2004. № 5 (29).
4. Сокол Е. І., Жаркін А. Ф., Васильченко В. І., і др. *Качество электрической энергии. Том 3. Методы и средства повышения качества электрической энергии*. Харків: ПП «Граф-Ікс», 2014. 292 с.
5. Сокол Е. І. та ін. *Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення*. Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. 330 с.
6. Сокол Е. І., Гриб О. Г., Баженов В. М. та ін. *Проективання електроенергетичних і електромеханічних систем та пристроїв. Релейний захист: Навчальний посібник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 128 с.
7. Гуров А. А., Сергунов Ю. А. Обоснование методики статистического исследования провалов напруження в системах електропостачання загального призначення. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2009. № 1. С. 15–20.
8. В. Фишман. Провали напруження в сетях промислових підприємств. Причини и влияние на электрооборудование. *Новості ЕлектроТехніки*. 2004. № 5 (29).
9. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Окли А. А. *Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах*. Москва: Энергоиздат, 1990. 390 с.
10. Гулага М. А. Средства для повышения надежности электропостачання промислових підприємств. *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2010. № 2. С. 52–60.
11. Бедерак Я. С., Волков В. І. Виявлення і дослідження джерел вищих гармонік «неелектричного походження» в системі електропостачання промислового підприємства. *«Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб.*. 2019. №1. С. 8–11.
12. Victor A. Ramos Jr. *Treating Harmonics in Electrical Distribution System*. URL: <https://www.cpccorp.com/harmonic.htm> (дата звернення: 30.10.2021).
13. Бедерак Я. С., Бородин Д. В., Михайлов В. П. Сети промислових підприємств. Устройства защиты от провалов напружений. *Новості ЕлектроТехніки*. 2012. №1. С. 24–32.

References (transliterated)

1. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010. *Elektromagnitna sumisnist'. Chastyna 4-30. Metody vyprobuvannya ta vymiryuvannya. Vymiryuvannya pokaznykiv yakosti elektrychnoyi enerhiyi (IEC 61000-4-30:2008, IDT)* [State Standard IEC 61000-4-30:2010. Electromagnetic comparability. Part 4-30. Test and measurement methods. Measurement of electrical energy quality parameters]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 56 p.
2. ДСТУ EN 50160:2014. *Kharakterystyky napryazheniya v systemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya (EN 50160:2010, IDT)* [State Standard EN 50160:2014. Voltage characteristics in electricity supply systems.]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 32 p.
3. Kartashev I. I. Provaly napryazheniya. Real'nost' prognozov i skhemnye resheniya zashchity [Voltage dips. Reality of predictions and protection schemes]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
4. Sokol E. I., Zharkin A. F., Vasilchenko V. I., i dr. *Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 3. Metody i sredstva povysheniya kachestva elektricheskoy energii* [Quality of electrical energy. Volume 3. Methods and means to improve the quality of electrical energy]. Kharkiv, PP «Graf-Iks» Publ., 2014. 292 p.
5. Sokol Ye. I. et al. *Tsyfrovyi oblik elektrychnoyi enerhiyi z urakhuvannya pokaznykiv yiyi yakosti ta vyznachenniam vidpovidal'nosti za pohirshennya* [Digital metering of electricity, taking into account quality indicators and determining responsibility for deterioration]. Kharkiv, FOP Brovin O.V. Publ., 2021. 330 p.
6. Sokol Ye. I., Gryb O. H., Bazhenov V. M. et al. *Proektuvannya elektroenergetychnykh i elektromekhanichnykh sistem ta prystroyiv. Releynyy zakhyst: Navchal'nyy posibnyk dlya studentiv zi spetsial'nosti elektroenergetyka, elektrotehnika ta elektromekhanika* [Design of electric power and electromechanical systems and devices. Relay protection: Textbook for students of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv, FOP Brovin O. V. Publ., 2020. 128 p.
7. Gurov A. A., Sergunov Yu. A. Obosnovanie metodiki statisticheskogo issledovaniya provalov napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Rationale for a statistical study of voltage dips in general-purpose power supply systems]. *Energy security and energy saving*. 2009, no. 1, pp. 15–20.
8. Fishman V. Provaly napryazheniya v setyakh prompredpriyatiy. Prichiny i vliyanie na elektrooborudovanie [Voltage dips in industrial networks. Causes and effects on electrical equipment]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
9. Gurevich Yu. E., Libova L. E., Okli A. A. *Raschety ustoychivosti i protivovariynoy avtomatiki v energosistemakh* [Stability and emergency control calculations in power systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1990. 390 p.
10. Gulaga M. A. Sredstva dlya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley [Means to improve the reliability of electricity supply to industrial consumers]. *Electrical equipment: Operation and repair*. 2010, no. 2, pp. 52–60.
11. Bederak Ya. S., Volkov V. I. Vyyavlennya i doslidzhennya dzhерel vishchykh harmonik "neelektrychno pokhodzhennya" v systemi elektropostachannya promyslovoho pidpryyemstva [Identification and investigation of sources of higher harmonics of "non-electrical origin" in the power supply system of an industrial enterprise]. *"Industrial Electricity and Electrical Engineering". Promelectro: information bulletin*. 2019, no. 1, pp. 8–11.
12. Victor A. Ramos Jr. *Treating Harmonics in Electrical Distribution System*. Available at: <https://www.cpccorp.com/harmonic.htm> (accessed 30.10.2021).
13. Bederak Ya. S., Borodin D. V., Mikhaylov V. P. *Seti prompredpriyatiy. Ustroystva zashchity ot provalov napryazheniy* [Industrial networks. Voltage dips protection devices]. *Electrical Engineering News*. 2012, no. 1, p. 24–32.

Надійшло (received) 16.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бедерак Ярослав Семенович (Бедерак Ярослав Семенович, Yaroslav Bederak) – кандидат технічних наук, Приватне акціонерне товариство «АЗОТ», керівник лабораторії, м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-0965>; e-mail: yaroslav0768@gmail.com.

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Oleg Gryb) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>. e-mail: oleg47gryb@gmail.com.

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Ігорь Тимофеевич, Igor Karpaliuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>. e-mail: humpway@gmail.com.

Дем'яненко Роман Ігорович (Демяненко Роман Игоревич, Roman Demianenko) – аспірант кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0902-2607>; e-mail: romandemianenko192@gmail.com.

Карпалюк Ганна Ігорівна (Карпалюк Анна Игоревна, Hanna Karpaliuk) – магістрантка кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: hanna.persimmon@gmail.com.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, О. В. ДЯЧЕНКО, Н. С. ЗАХАРЕНКО

ЕКОНОМІЧНІ ЗБИТКИ ВІД НИЗЬКОЇ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Розглядаються проблеми підтримання якісних показників електричної енергії і, зокрема, провали напруги, а також наслідки провалів напруги у електричних мережах промислових підприємств. Наведено класифікацію електроприймачів за критичними ділянками з чутливості до провалів напруги. Описані основні заходи із запобігання технічним наслідкам впливу провалів напруги. Для забезпечення прогнозованого функціонування систем захисту необхідно проводити аналіз та готувати заходи щодо покращення якості електроенергії. Для цього успішно можуть використовуватися реєстратори з високим класом точності, вимірювання мають проводитися в характерних точках мережі, в центрах живлення, в точках загального приєднання споживачів. Наслідки від провалів напруги були розподілені за економічним збитком на підприємствах. Без загального урахування збитків від низької якості електроенергії неможливо коректно підрахувати економічний ефект від підвищення надійності технічних систем як при проектуванні, так і в експлуатації. Тому запропоновано використовувати контекстуальні фактори енергетичної ефективності. Звідси отримано підхід до вибору заходів захисту від провалів напруг, що потребує урахування перевірки економічної ефективності технічних заходів. Таким чином, для вибору будь-якого з заходів захисту від провалів напруг, спочатку необхідно проаналізувати статистичні дані, розібратися з причиною відключення обладнання, а потім прийняти технічно і економічно обгрунтоване рішення щодо підвищення надійності електропостачання. Не виключено, що найбільш просте та ефективне рішення щодо захисту від провалів напруги може виявитися не в електричній, а в технологічній частині або в системі контрольно-вимірювальних приладів.

Ключові слова: електрична енергія, показник якості електроенергії, провали напруги, наслідки від провалів напруги, економічні збитки, ефективне рішення, економічний ефект.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, И. Т. КАРПАЛЮК, А. В. ДЯЧЕНКО, Н. С. ЗАХАРЕНКО

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ УЩЕРБЫ ОТ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассматриваются проблемы поддержания качественных показателей электрической энергии и, в частности, провалов напряжения, а также последствия провалов напряжения в электрических сетях промышленных предприятий. Приведена классификация электроприемников по критическим участкам по чувствительности к провалам напряжения. Описаны основные меры по предотвращению технических последствий влияния провалов напряжения. Для обеспечения прогнозируемого функционирования систем защиты необходимо проводить анализ и готовить меры по улучшению качества электроэнергии. Для этого успешно могут использоваться регистраторы с высоким классом точности, измерения должны производиться в характерных точках сети, центрах питания, в точках общего присоединения потребителей. Последствия от провалов напряжения были распределены по экономическому ущербу на предприятиях. Без общего учета ущерба от низкого качества электроэнергии невозможно корректно подсчитать экономический эффект от повышения надежности технических систем как при проектировании, так и в эксплуатации. Поэтому предлагается использовать контекстуальные факторы энергетической эффективности. Отсюда получен подход к выбору мер защиты от провалов напряжений, который требует учета проверки экономической эффективности технических мер. Таким образом, для выбора любой из мер защиты от провалов напряжений сначала необходимо проанализировать статистические данные, разобраться с причиной отключения оборудования, а затем принять технически и экономически обоснованное решение по повышению надежности электроснабжения. Не исключено, что наиболее простое и эффективное решение защиты от провалов напряжения может оказаться не в электрической, а в технологической части или в системе контрольно-измерительных приборов.

Ключевые слова: электрическая энергия, показатель качества электроэнергии, провалы напряжения, последствия от провалов напряжения, экономический ущерб.

Y. S. BEDERAK, O. G. GRIB, I. T. KARPALIUK, O. V. DIACHENKO, N. S. ZAKHARENKO

ECONOMIC DAMAGES FROM LOW-QUALITY ELECTRIC ENERGY

The problems of maintaining the quality indicators of electrical energy and, in particular, voltage dips as well as the consequences of voltage dips in electrical networks of industrial enterprises are considered. A classification of electrical consumers according to their sensitivity to voltage dips in critical areas is given. The main measures to prevent technical consequences of voltage dips are described. In order to ensure predictable operation of protection systems, it is necessary to analyse and prepare measures to improve power quality. To this end, high accuracy class recorders can be successfully used and measurements should be made at characteristic points of the network, power centres and at the common connection points of consumers. The consequences of voltage dips have been allocated to economic damage at companies. Without a general account of the damage caused by poor power quality, it is not possible to correctly calculate the economic effect of improving the reliability of technical systems, both in design and in operation. Therefore, it is proposed to use contextual factors of energy efficiency. Hence, an approach to the selection of surge protection measures is derived which requires consideration of the cost-benefit test of the technical measures. Thus, in order to select any of the surge protection measures, it is first necessary to analyse the statistical data, to understand the cause of the equipment outage and then to make a technically and economically sound decision to improve the reliability of the electricity supply. It is possible that the simplest and most effective solution for surge protection may not be in the electrical part but in the process or instrumentation system.

Keywords: electrical energy, power quality indicator, voltage dips, consequences of voltage dips, economic damage.

Постановка проблеми: Наслідками провалів напруги у мережах промислових підприємств є вихід відповідального обладнання з ладу, розлад технологічних процесів, брак продукції, зниження її якості, недовипуск продукції.

Вплив провалів напруги перебіг технологічного процесу великою мірою залежить від його характеру. Особливо відчутний вплив провали напруги надають так звані «безперервні технологічні процеси» в хімії, нафтохімії, нафтопереробці, машинобудуванні та

© Я. С. Бедерак, О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, О. В. Дяченко, Н. С. Захаренко, 2021

інших галузях. Такі технологічні процеси для зупинки та повторного пуску вимагають тривалого часу – від кількох годин до кількох діб. Складний технологічний ланцюжок випуску продукції на таких виробництвах зазвичай включає безліч апаратів, у кожному з яких технологічний процес відбувається при певних значеннях температури, тиску, при певних об'ємних або вагових співвідношеннях реагентів, що беруть участь.

Провали напруги є показниками якості електроенергії, що найчастіше зустрічаються, які впливають на роботу промислового обладнання. Як показує накопичена статистика, за рік відбувається 25–30 зупинок виробництва через провали і 2–3 зупинки через відключення [1].

Промислове обладнання вразливе до провалів і результат дії внаслідок провалів може бути не тільки в припиненні роботи обладнання, а наприклад і в так званому «зависанні» і це може статися навіть під час автоматичного швидкодіючого перемикачів з основного на резервне джерело живлення. До того ж обладнання із потужними силовими трансформаторами живлення можуть мати значні пускові струми, що виникають внаслідок зникнення та подальшого відновлення живлення. В такому разі автоматичні вимикачі спрацьовують на відключення такого пристрою електромагнітним розчіплювачем. Такі явища характерні для потужних зарядних пристроїв і іншого обладнання із переважною індуктивною складовою навантаження. Що можна спостерігати в колах власних потреб підстанцій де навіть одиночні провали напруги тривалістю понад 200 мілісекунд призводять до багаторазового спрацьовування на відключення та увімкнення електромагнітних контакторів.

Устаткування для обробки цифрових даних дуже чутливе до провалів напруги, оскільки ця подія може призвести і до втрати даних, і знижує загальну ефективність системи обробки цифрових даних [2–4].

Класифікація електроприймачів на критичні ділянки з чутливості до провалів напруги. Устаткування загального призначення, менш чутливе до якості електроенергії в порівнянні з іншими видами електроприймачів, може працювати без збоїв при глибині провалів до 60 %. 0,5 с.

Обладнання можна розподілити за чутливістю до провалів. При такому розподілі найчутливішими можна вважати двигуни з електронним управлінням зокрема такі що підключені до електронних перетворювачів енергії, до яких можна віднести блоки живлення комп'ютерної техніки. Тому різноманітну комп'ютерну техніку також можна віднести до обладнання чутливого до провалів напруги. Величини провалів до якого чутливе таке обладнання становить близько 10% тривалістю менше 0,05. Зазначені величини значно підвищують вимоги до якості електропостачання [5]. За даними Інституту дослідження електроенергетики США (Electric Power Research Institute (EPRI)) розрізняють сім видів

електроприймачів за ступенем чутливості до провалів напруги:

- реле захисту;
- контактори;
- джерела постійного струму (блоки живлення персональних комп'ютерів, контролери);
- трифазні джерела живлення;
- вакуумні насоси;
- турбонасоси;
- електроприводи змінного струму.

Якщо обладнання більш чутливе до провалів напруги, то частота зупинок буде значно більшою, ніж обладнання, яке менш чутливе до зупинок.

Для підготовки заходів з метою покращення якості електроенергії необхідно отримання інформації від систем контролю (які можуть бути встановлені стаціонарно та мобільних систем для визначення небезпечних ділянок та вузлів). В якості систем контролю можуть використовуватися реєстратори з високим класом точності. Збір даних та проведення вимірювань має проводитися в центрах живлення, в точках загального приєднання споживачів тобто в визначених характерних точках мережі.

На основі отриманих даних від систем вимірювань і оцінивши ймовірності збитків приймаються рішення про заходи зменшення впливу провалів, наприклад, забезпечення безперебійності електропостачання шляхом резервування живлення, або встановлення засобів автоматики із підвищеною швидкодією, або використання автономних джерел живлення.

Встановлене обладнання для захисту від провалів напруги необхідно контролювати на правильність спрацювання. Одним із розповсюджених методів контролю є ведення журналів спрацювань і опитування обслуговуючих підрозділів. Ймовірно, що потребує розробки така система контролю провалів та переривань напруги, що буде мати незначну вартість, не буде потребувати високо кваліфікованих спеціалістів для обслуговування і не буде залежати від інших показників якості електричної енергії [6].

В теперішній час дані по провалам напруги обробляються результати сортуються за тривалістю та зображуються в графічному вигляді у просторі параметрів потоку провалів з координатами часу виявлення провалу [7]. Відмічається такі параметри провалу напруги як: тривалість провалу t_{np} (сек); остаточна напруга під час провалу $U_{ост}$ (%); кількість провалів за годину w , (1/год).

Ці дані є характеристикою системи електропостачання.

Економічні збитки на підприємстві, спричинені провалами напруги. Економічний збиток на підприємстві, спричинений провалами напруги, визначається за такими критеріями:

1. Визначення зовнішнього браку продукції, виявленого після приймання відділом технічного контролю.

2. Визначення внутрішнього браку продукції, виявленого внаслідок прихованого дефекту в оброблюваному матеріалі.

3. Перевитрата паливо-енергетичних ресурсів при зупиненні та подальшому пуску технологічного процесу.

4. Оплата робочої сили за умов простою технологічного процесу.

5. Витрати ресурсів на ремонт обладнання, що вийшло з ладу під час раптового зупинення.

6. Екологічні збитки.

7. Недовипуск продукції підприємством.

8. Оплата понаднормових робіт, викликаних недовипуском продукції.

9. Розрахунок величини шкоди, викликаний зниженням якості електроенергії внаслідок дії несиметрії, несинусоїдності та відхилень напруги.

Без урахування збитків від низької якості електроенергії неможливо коректно підрахувати економічний ефект від підвищення надійності технічних систем як при проектуванні, так і в експлуатації.

Так, на заводі з випуску високовольтного кабелю зареєстровано 25–30 провалів на рік, які призводять до зупинення виробництва. Під час зупинки лінії щоразу відрізається 300 метрів кабелю, який вважається бракованим. 1 погонний метр кабелю коштує 150 USD. Технологія виготовлення кабелю передбачає завантаження лінії на 1000 м-код (бухта). Це означає, що 700 м, що залишилися, – неликвід, який може бути нереалізованим. Тому втрати через 1 зупинку можуть мати синергетичний ефект.

Наступний приклад. Український машинобудівний завод з виробництва двигунів для авіапромисловості на верстатах з числовим програмним керуванням виточує лопатки двигунів понад місяць. У момент провалу збивається автоматична програма з мікронної обробки, що призводить безповоротно до дефекту продукції.

Вибір технічних рішень, які мінімізують наслідки провалів напруги, повинен ґрунтуватися на розрахунку економічної шкоди, обумовленої провалами напруги для даної технологічної установки або виробничого процесу [8–10]

Основні заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг у мережах промислових підприємств. Заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг систематизовані в роботах [11, 12].

1. Створення схем надійного живлення систем збудження підвищення стійкості роботи синхронного двигуна.

2. Узгодження схем підключення котушок управління магнітними пускачами зі схемою і групою з'єднання обмоток силового трансформатора 10(6)/0,4 кВ для зменшення ймовірності відключення магнітних пускачів відповідальних електродвигунів при найчастіших видах пошкоджень – однофазних КЗ в мережах 110 кВ [13].

3. Застосування контакторів керування із «заскочкою», що утримує їх у включеному положенні незалежно від наявності напруги в ланцюзі управління.

4. Швидке (протягом 10 – 12 мс) відключення контактора живлення власних потреб на підстанціях при зниженні напруги в мережі нижче 160 В та повернення у вихідний стан при відновленні напруги до значення вище 185 В з витримкою часу 5 – 10 с.

5. Застосування схеми керування електродвигунами з додатковим проміжним реле.

6. Використання спеціальних схем, що передбачають повторне включення електродвигунів декількома послідовними чергами.

7. Застосування сучасних мікропроцесорних пристроїв релейних захистів, що дозволяють: збільшувати швидкодію захисту; скорочувати рівні селективності за часом; застосовувати у необхідних випадках принцип логічної селективності, що дозволяє відмовитися від щаблів селективності за часом; здійснювати діагностику стану електрообладнання та цим запобігати можливим аваріям.

8. Використання схеми автоматичного вмикання резерву.

9. Забезпечення рівня напруги відпадання пускачів і контакторів при зниженні напруги (воно має бути в інтервалі 35-60% від номінальної напруги мережі $U_{ном}$).

10. Розробка схеми, що дозволяє виконати видачу загального сигналу з витримкою часу на відключення при самозапуску ланцюга управління електродвигунів 6 і 0,4 кВ.

11. Контроль коефіцієнту завантаження та струму збудження синхронних електродвигунів. [14].

12. Використання спеціальних пристроїв для виконання швидкодіючого автоматичного вмикання резерву на напрузі 10 (6) кВ [13].

13. Підключення потужних високовольтних електродвигунів через пристрої ненаголошеного (плавного) пуску.

Контекстуальні фактори енергетичної ефективності: інструментальний контроль та верифікація. Опишемо стан інструментального контролю та верифікації у сфері енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності, визначення базових принципів та цілій вимірювань і верифікації енергетичної ефективності.

Головною вимогою, що ставиться до змісту й структури енергосервісного контракту (ЕнСК), є наявність переліку заходів, спрямованих на енергозаощадження та підвищення енергетичної ефективності. Дотримання встановлених вимог є обов'язковим для Виконавця ЕнСК. Варто зазначити, що в контракті має подаватися докладний технічний опис кожного заходу й термін його виконання. Водночас потрібно звертати увагу на такі моменти:

- досягнення максимальної ефективності енергозберігаючого заходу (ЕЗЗ) передбачає зіставлення кількох альтернативних варіантів технічних рішень в аспекті економічної доцільності;

- рішення про включення тих чи інших заходів до ЕнСК приймається на підставі показників їхньої енергетичної й економічної ефективності;

- ефективність енергозберігаючого заходу має оцінюватися з урахуванням інтересів усіх сторін – учасників енергосервісної послуги: Ініціатор – Замовник – Виконавець – Інвестор – Споживач. У цьому контексті доцільно акцентувати на тому, що досягнення належного рівня енергоефективності кожною стороною визначає ефективність енергосервісної послуги в цілому

Програма енергозбереження містить такі розділи:

1. Паспорт програми із зазначенням:

- назви організації;
- назви програми;
- підстав для розроблення програми;
- цілей і завдань програми;
- термінів та етапів реалізації програми;
- витрат на програму загалом і поетапно;
- джерел фінансування програми;
- основних заходів програми;

- очікуваних результатів виконання програми в натуральному вираженні в цілому і поетапно;

- очікуваних результатів виконання програми у вартісному вираженні в цілому і поетапно.

2. Цільові показники енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності, досягнення яких має забезпечуватися за рахунок втілювання програм, і їхні значення.

Як вихідні приймаються середні фактичні значення за період, що передує початку дії програми енергозбереження.

Основні цільові показники:

- питома витрата води на вироблення теплової енергії;

- питома витрата електричної енергії на вироблення теплової енергії;

- витрата теплової енергії на власні потреби джерела тепла;

- питома витрата палива на відпуск теплової енергії з колектора джерела тепла;

- частка виробництва теплової енергії з використанням відновлюваних джерел енергії та (або) вторинних енергоресурсів у загальному обсязі теплової енергії, що виробляється на регульованому підприємстві;

- частка теплогерел, оснащених приладами обліку теплової енергії на колекторі джерела тепла;

- частка теплогерел, оснащених приладами обліку споживаної електричної енергії для виробництва теплової енергії;

- частка теплогерел, оснащених приладами обліку води, що споживається для виробництва теплової енергії;

- частка споживачів, які отримують теплову енергію через прилади обліку;

- частка теплогерел, оснащених обладнанням для хімоводопідготовки мережної води;

- витрата енергоресурсів у будівлях, будовах, спорудах, що експлуатуються регульованою організацією у процесі виробництва теплової енергії;

- інші цільові показники.

3. Перелік заходів з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності із зазначенням термінів проведення та джерел фінансування.

Як джерела фінансування можуть бути використані: бюджетні кошти, власні кошти, енергосервісні контракти.

Перелік обов'язкових заходів з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності:

- організаційні заходи з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності [15, 16];

- проведення енергетичного обстеження теплогерел;

- оцінювання аварійності систем теплопостачання;

- аналіз якості надання послуг теплопостачання;

- аналіз установленої потужності теплогерел;

- аналіз і оптимізація кількості теплогерел;

- заходи, спрямовані на зниження споживання енергетичних ресурсів на власні потреби при виробництві теплової енергії;

- заходи щодо оснащення споживачів приладами обліку теплової енергії;

- заходи щодо модернізації обладнання, що використовується для вироблення теплової енергії;

- заходи щодо оснащення теплогерел приладами обліку енергоресурсів (палива, води, електроенергії, відпущеної в мережу теплової енергії);

- заходи щодо розширення використання в якості джерел енергії вторинних енергоресурсів та (або) відновлюваних джерел енергії;

- заходи щодо упровадження інноваційних технологій;

- інші заходи.

Організаційними заходами з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності вважаються:

- розроблення Положення про енергозбереження для регульованої організації;

- проведення в організації нарад з енергозбереження на постійній основі;

- формування відповідальних осіб за дотримання режиму економії та порядку їхньої звітності щодо досягнутої економії;

- розроблення Положення щодо порядку стимулювання працівників за економію енергії й енергоресурсів;

- прийняття Положення про порядок розміщення замовлення на проведення енергоощадних заходів в організації;

- фінансовий облік економічного ефекту від проведення енергоощадних заходів і організація рефінансування частини економії в проведення нових енергозберігаючих заходів;

- контроль за нецільовим використанням енергоносіїв (відбір води із системи опалення тощо);
- організація режиму роботи енергоспоживного обладнання й освітлення (відімкнення або переведення в режим «сну» комп'ютерів у разі простою, виключення роботи обладнання «на холостому ходу» тощо);
- підвищення кваліфікації фахівців організації за програмою «Енергозбереження шлях у майбутнє»;
- проведення гідравлічного регулювання, ручного балансування розподільних систем опалення і стояків у будівлях, будинках, спорудах, не оснащених автоматичними індивідуальними тепловими пунктами;
- зниження опалювального навантаження в будівлях чи окремих приміщеннях у неробочі періоди організацій;
- інші заходи.

Технічними заходами з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності є такі:

- реконструкція центральних та індивідуальних теплових пунктів із застосуванням енергоефективного обладнання, систем автоматичного регулювання споживання теплової енергії, упровадження комплексного оброблення води, перехід з відкритої на закриту циркуляційну систему гарячого водопостачання;
- застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів для теплоізолювання трубопроводів і обладнання, відновлення зруйнованої теплоізоляції;
- гідрохімічне промивання систем опалення, електрогідроімпульсне очищення внутрішньобудинкових систем гарячого та холодного водопостачання й опалювальних радіаторів, заміна опалювальних стояків, що відпрацювали понад 10–15 років;
- встановлення радіаторних регуляторів (термостатів) для індивідуального регулювання опалювальної потужності в приміщеннях;
- проведення теплозбережних заходів: утеплення стін, входів, вікон, підвалів, встановлення відбивних екранів за опалювальними приладами, ліквідація декоративних конструкцій, що закривають опалювальні прилади, очищення опалювальних приладів від забруднень, фарбування у світлі тони тощо;
- інші заходи.

4. Показники ефективності реалізації програми енергозбереження в натуральному та вартісному вираженні.

Результатом реалізації програми енергозбереження є обсяг економії енергоресурсів.

Результати реалізації програми енергозбереження мають подаватися наростаючим підсумком з початку реалізації програми.

У процесі розроблення енергозберігаючих заходів необхідно:

- розрахунковим шляхом встановити фактичні показники енергоефективності виробництва (робіт, послуг) споживача енергетичних ресурсів;

• визначити технічну сутність передбачуваного вдосконалення (варіантів) і принципи отримання економії;

• для кожного запропонованого варіанта на підставі розрахунків з'ясувати прогнозні показники енергоефективності, які планується отримати через упровадження ЕЗЗ;

• розрахувати критерії ефективності та відносний потенціал енергозбереження для кожного ЕЗЗ (варіанти ЕЗЗ);

• на підставі отриманих критеріїв ефективності й величин відносного потенціалу енергозаощадження обрати найбільш ефективний варіант ЕЗЗ;

• розрахувати величину абсолютного потенціалу енергозаощадження запропонованих ЕЗЗ.

Заходи, що реалізуються в межах ЕнСК, можуть бути спрямовані, по-перше, на заощадження енергетичних ресурсів без зміни ефективності їхнього використання; по-друге, на економію окремих видів паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) для різних цілей (наприклад, опалення або освітлення); по-третє, на збільшення потенційної економії споживання енергоресурсів у цілому (наприклад, заходи із пропагування енергозаощадження) [17]. На одному об'єкті можуть одночасно реалізовуватися кілька ЕЗЗ із різними спрямованістю та метою.

Усі рекомендовані заходи поділяють на три різновиди:

• організаційні та маловитратні, що реалізуються в процесі поточної діяльності підприємства чи організації [18];

• середньовитратні, які реалізуються переважно власним коштом підприємства або організації;

• великовитратні, що потребують додаткових інвестицій, які залучаються здебільшого у вигляді позикових коштів.

Основними критеріями добору та визначення послідовності упровадження заходів у межах ЕнСК є:

- величина витрат на реалізацію заходів;
- фінансова й натуральна економія, що має бути отримана внаслідок реалізації заходів;
- термін окупності;
- «сезонність» заходів, тобто можливість реалізації протягом певної пори року, а також під час опалювального періоду.

Ефективність ЕЗЗ, що реалізуються в межах ЕнСК, характеризується низкою критеріїв, які відображають співвідношення витрат на проведення заходів і результатів проекту в аспекті інтересів його учасників.

Залежно від масштабу та значущості заходів (реконструкція, технічне переоснащення, модернізація, організаційно-технічні заходи) застосовують прості (без урахування фактора часу) чи інтегральні (дисконтовані) критерії економічної ефективності.

Прості критерії доцільно застосовувати під час оцінювання ефективності маловитратних і середньовитратних заходів у таких випадках:

- одноразові витрати на реалізацію заходу здійснюються строком до одного року;
- досягнуті внаслідок реалізації заходу техніко-економічні результати й додаткові річні експлуатаційні витрати, спричинені упровадженням заходу, залишаються незмінними протягом наступних років експлуатації.

Простими критеріями є річний економічний ефект від упровадження заходу та термін окупності інвестицій.

У разі упровадження великозатратних заходів рекомендовано застосовувати інтегральні критерії, що ґрунтуються на даних інвестиційного аналізу реалізації проєктів із енергозаощадження та підвищення енергетичної ефективності. Описана методика широко відома у сучасній міжнародній і вітчизняній практиці під назвою методу економічного оцінювання ефективності інвестицій [16, 19].

Диференціальною ознакою розрахунків, що проводяться у межах названої методики, є можливість урахувати:

- надійність та строки служби оцінюваного обладнання, що набуває виняткового значення під час порівняльного оцінювання варіантів технічних засобів;
- ціну капіталу інвестора та зміну цінності грошей протягом часу, що властиво ринковій економіці.

Розрахунок ефективності від реалізації комплексу (групи) ЕЗЗ здійснюється за допомогою методу розрахунку ефекту від упровадження окремого заходу за таким алгоритмом:

- обчислюються значення показників споживання за базовий рік;
- здійснюється розрахунок значень коефіцієнтів порівнюваних умов;
- здійснюється обчислення індикаторів;
- виконується розрахунок показників ефективності програми ЕЗЗ в контексті ЕнСК.

Перевірка економічної ефективності технічних заходів щодо захисту від провалів напруг. При виборі заходів захисту від провалів напруг необхідно обов'язково перевіряти економічну ефективність запропонованих технічних заходів. Наведемо приклад. Цех карбаміду, який має встановлену потужність близько 12 МВт і витрати електроенергії близько 4 млн. кВт·год на місяць, піддається провалам напруги в середньому 4 рази на рік. Після кожного порушення електропостачання цех зупиняється через відключення електродвигуна головного компресора асинхронного ходу, а потім цех виходить на режим протягом 3 годин. Щогодини простою цеху призводить до недовипуску 150 т карбаміду вартістю 200 доларів за тонну, перевитрати ПЕР. Таким чином, тільки через провали в рік, втрати становлять $150 \cdot 3 \cdot 200 \cdot 4 = 360$ тис. доларів без урахування вартості неефективно спожитих ПЕР, вартості робочої сили.

Для вирішення цієї проблеми пропонується кілька варіантів зменшення втрат від провалів напруги:

Рішення №1 – встановити активні регулятори напруги або динамічні компенсатори спотворень напруги потужністю 10 МВ·А. Але цей захід матиме великий термін окупності (5 років), хоч і кардинально вирішить проблему.

Рішення №2 – встановити активні регулятори напруги або динамічні компенсатори спотворень напруги потужністю 0,4 МВ·А для забезпечення безперебійного живлення порушення синхронного електродвигуна компресора. Вартість його близько 180 тис. доларів, і цей захід окупиться протягом 6 місяців.

Рішення №3 – виконати доопрацювання схеми збудження так, щоб протягом $0,5 \div 1$ с при зникненні (або зниженні) напруги в мережі живлення 380 В збудників синхронних електродвигунів, вони б не видавали аварійний сигнал на відключення вимикача 6 кВ і при відновленні робітника рівня напруги продовжили роботу із форсованим струмом збудження. Попередньо необхідно узгодити із заводом-виробником збудника питання здатності елементів його працювати при зниженій напрузі. Вартість вдосконалення схеми живлення збудника становитиме близько 5000 доларів.

Таким чином, для вибору будь-якого з перерахованих вище способів, спочатку необхідно проаналізувати статистичні дані, розібратися з причиною відключення обладнання, а потім прийняти технічно і економічно обґрунтоване рішення щодо підвищення надійності електропостачання цеху. Перед прийняттям рішення необхідно провести тривалі вимірювання для реєстрації глибини та тривалості провалів напруги спеціальними багатифункціональними вимірювальними приладами – аналізаторами параметрів якості електричної мережі, виконати прогноз параметрів потоку провалів та визначити зони сталості технологічної установки чи виробничого процесу. Прийняти технічно та економічно обґрунтоване рішення щодо підвищення надійності електропостачання необхідно, слідуючи від простого та дешевого рішення до складного та дорогого, для кожного окремо взятого технологічного процесу з урахуванням характеру електропостачання, особливостей схеми управління та джерел живлення. Не виключено, що найбільш просте та ефективне рішення щодо захисту від провалів напруги може виявитися не в електричній, а в технологічній частині, або в системі контрольно-вимірювальних приладів.

Висновки. Розглянуто питання підтримання якісних параметрів напруги у споживачів за рахунок використання технічних заходів захисту від провалів напруг. Питання розглядалося з точки зору економічних критеріїв а саме економічної ефективності технічних заходів. Такій підхід має певні результати, але виникає необхідність охопити оцінкою економічних критеріїв і інші показники якості електричної енергії.

Список літератури

- Самойленко І. О., Гриб О. Г., Запорожець А. О. та ін. *Енергетичний менеджмент та енергоефективність: Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 348 с.
- Сокол Є. І., Сендерович Г. А., Гриб О. Г. та ін. *Автоматика протиаварійного управління електроенергетичних систем: Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 216 с.
- Сокол Е. И. и др. *Кибербезопасность и качество электрической энергии в системах электроснабжения медицинских объектов*. Харьков: ФОП Панов О. М., 2019. 259 с.
- Карташѳв И. И. Провалы напряжения. Реальность прогнозов и схемные решения защиты. *Новости ЭлектроТехники*. 2004. № 5 (29).
- Бородин Д. В. Автоматизированный контроль качества электроэнергетики на промышленных предприятиях. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Энергетика: надёжность и энергоэффективность*. 2011. № 3. С. 12–20.
- Арцишевский Я. Л., Задкова Е. А., Кузнецов Ю. П. Расчетная методика определения структуры и параметров РЗА в системах электроснабжения ответственных потребителей. *Релейщик*. 2009. № 2. С. 30–35.
- Гуров А. А., Сергунов Ю. А. Обоснование методики статистического исследования провалов напряжения в системах электроснабжения общего назначения. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2009. № 1. С. 15–20.
- Бедерак Я. С., Бородин Д. В., Михайлов В. П. Сети промпредприятий. Устройства защиты от провалов напряжений. *Новости ЭлектроТехники*. 2012. №1. С. 24–32.
- Бедерак Я. С., Волков В. І. Виявлення і дослідження джерел вищих гармонік «неелектричного походження» в системі електропостачання промислового підприємства. *«Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб.*. 2019. №1. С. 8–11.
- Гапон Д. А., Бедерак Я. С. Особенности режима работы питающей сети во время плавного пуска мощных синхронных двигателей. *Промышленная энергетика*. 2014. №2. С. 27–30.
- Фишман В. Провалы напряжения в сетях промпредприятий. Причины и влияние на электрооборудование. *Новости ЭлектроТехники*. 2004. № 5 (29).
- Гуров А. А., Сергунов Ю. А. Обоснование методики статистического исследования провалов напряжения в системах электроснабжения общего назначения. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2009. № 1. С. 15–20.
- Гулага М. А. Средства для повышения надежности электроснабжения промышленных потребителей. *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2010. № 2. С. 52–60.
- Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Окли А. А. *Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах*. Москва: Энергоиздат, 1990. 390 с.
- Комеліна О. В., Самойленко І. О. Енергосервісний бізнес у контексті сталого енергетичного розвитку України. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2017. Вип. 2. С. 306–315. doi: 10.21272/mmi.2017.2-29.
- Коссов В. В., Лившиц В. Н., Шахназаров А. Г. *Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов*. Москва: Экономика, 2000. 421 с.
- EVO 10000–1:2010. *International Performance Measurement and Verification Protocol, Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings. Volume 1*. Efficiency Valuation Organization, 2010.
- Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України №218 від 14.12.2007 р. «Про затвердження Методичних рекомендацій з оцінки ефективності інвестицій в енергозберігаючі проекти на підприємствах житлово-комунального господарства». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0218662-07#Text> (дата звернення: 21.09.2021)
- Гуд Л., Бабаджанян В. 10 шагов для определения осуществимости проектов по энергоэффективности : материалы презентации. *Основы методологии экономического анализа: учебный курс проекта SEMISE*. 2011.

References (transliterated)

- Samoylenko I. O., Gryb O. H., Zaporozhets' A. O. et al. *Enerhetychnyy menedzhment ta enerhoefektyvnist': Pidruchnyk dlya studentiv zi spetsial'nosti elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika* [Energy management and energy efficiency: textbook for students in electricity, electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv, FOP Brovin O. V. Publ., 2020. 348 p.
- Sokol Ye. I., Senderovych H. A., Gryb O. H. et al. *Avtomatyka protyavariynoho upravlinnya elektroenerhetychnykh system: Pidruchnyk dlya studentiv zi spetsial'nosti elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika* [Automation of emergency control of electric power systems: Textbook for students in electricity, electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv, FOP Brovin O. V. Publ., 2020. 216 p.
- Sokol E. I., Zharkin A. F., Vasil'chenko V. I., i dr. *Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 3. Metody i sredstva povysheniya kachestva elektricheskoy energii* [Quality of electrical energy. Volume 3. Methods and means to improve the quality of electrical energy]. Kharkiv, PP «Graf-Iks» Publ., 2014. 292 p.
- Kartashev I. I. Provaly napryazheniya. Real'nost' prognozov i skhemnye resheniya zashchity [Voltage dips. Reality of predictions and protection schemes]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
- Borodin D. V. Avtomatizirovanny kontrol' kachestva elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh [Automated power quality control in industrial plants]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2011, no 3, pp. 12–20.
- Artsishevskiy Ya. L., Zadkova E. A., Kuznetsov Yu. P. Raschetnaya metodika opredeleniya struktury i parametrov RZA v sistemakh elektrosnabzheniya otvetstvennykh potrebiteley [Calculation methodology for determining the structure and parameters of relay protection in power supply systems for critical consumers]. *Releyshchik*. 2009, no. 2, pp. 30–35.
- Gurov A. A., Sergunov Yu. A. Obosnovanie metodiki statisticheskogo issledovaniya provalov napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Rationale for a statistical study of voltage dips in general-purpose power supply systems]. *Energy security and energy saving*. 2009, no. 1, pp. 15–20.
- Bederak Ya. S., Borodin D. V., Mikhaylov V. P. *Seti prompredpriyatiy. Ustroystva zashchity ot provalov napryazheniy* [Industrial networks. Voltage dips protection devices]. *Electrical Engineering News*. 2012, no. 1, p. 24–32.
- Bederak Ya. S., Volkov V. I. Vyyavlennaya i doslidzhennaya dzherel vyshchey harmonik "neelektrychno pokhodzhennaya" v systemi elektropostachannya promyslovoho pidpryyemstva [Identification and investigation of sources of higher harmonics of "non-electrical origin" in the power supply system of an industrial enterprise]. *"Industrial Electricity and Electrical Engineering". Promelectro: information bulletin*. 2019, no. 1, pp. 8–11.
- Gapon D. A., Bederak Ya. S. Osobennosti rezhima raboty pitayushchey seti vo vremya plavnogo puskа moshchnykh sinkhronnykh dvigateley [Features of mains operation during soft-start of powerful synchronous motors]. *Industrial Power Engineering*. 2014, no. 2, pp. 27–30.
- Fishman V. Provaly napryazheniya v setyakh prompredpriyatiy. Prichiny i vliyanie na elektrooborudovanie [Voltage dips in industrial networks. Causes and effects on electrical equipment]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
- Gurevich Yu. E., Libova L. E., Okli A. A. *Raschety ustoychivosti i protivoavariynoy avtomatiki v energosistemakh* [Stability and emergency control calculations in power systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1990. 390 p.
- Gulaga M. A. Sredstva dlya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley [Means to improve the reliability of electricity supply to industrial consumers]. *Electrical equipment: Operation and repair*. 2010, no. 2, pp. 52–60.
- Gurevich Yu. E., Libova L. E., Okli A. A. *Raschety ustoychivosti i protivoavariynoy avtomatiki v energosistemakh* [Stability and emergency control calculations in power systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1990. 390 p.

15. Komelina O. V., Samoilenko I. O. Enerhoservisnyy biznes u konteksti staloho enerhetychnoho rozvytku Ukrainy [Energy service business under conditions of stable energy development in Ukraine]. *Marketing and Management of Innovations*. 2017, no. 2, pp. 306–315. doi: 10.21272/mmi.2017.2-29.
16. Kossov V. V., Livshits V. N., Shakhnazarov A. G. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov* [Methodological guidelines for assessing the effectiveness of investment projects]. Moscow, Ekonomika Publ., 2000. 421 p.
17. *EVO 10000–1:2010. International Performance Measurement and Verification Protocol, Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings. Volume 1*. Efficiency Valuation Organization, 2010.
18. *Nakaz Ministerstva z pytan' zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrainy #218 vid 14.12.2007 r. «Pro zatverdzhennya Metodichnykh rekomendatsiy z otsinky efektyvnosti investytsiy v enerhozberihayuchi proekty na pidpnyemstvakh zhytlovo-komunal'noho hospodarstva»* [Order of the Ministry of Housing and Communal Economy of Ukraine No. 218 of 14.12.2007 "On Approval of Methodical Recommendations for Assessment of Effectiveness of Investments in Energy Saving Projects at Housing and Communal Economy Enterprises"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0218662-07#Text> (accessed 21.09.2021)
19. Gud L., Babadzhanyan V. 10 shagov dlya opredeleniya osushchestvymosti proektov po energoeffektivnosti : materialy prezentatsii [10 Steps to Determine Feasibility of EE/RES Projects]. *Fundamentals of Economic Analysis Methodology: SEMISE training course*. 2011.

Надійшла (received) 07.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бедерак Ярослав Семенович (Бедерак Ярослав Семенович, Yaroslav Bederak) – кандидат технічних наук, Приватне акціонерне товариство «АЗОТ», керівник лабораторії, м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-0965>; e-mail: yaroslav0768@gmail.com.

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Oleg Gryb) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>. e-mail: oleg47gryb@gmail.com.

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Ігорь Тимофеевич, Igor Karpaliuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>. e-mail: humpway@gmail.com.

Дяченко Олександр Васильович (Дяченко Александр Васильевич, Oleksandr Diachenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7232-6585>; e-mail: diachenko.a.v@ukr.net.

Захаренко Наталія Сергіївна (Захаренко Наталья Сергеевна, Natalia Zakharenko) – кандидат економічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», кафедра економіки підприємств, м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7963-1080>; e-mail: zakharenko.natali@gmail.com.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, С. В. ШВЕЦЬ, О. В. ЯНЧИК

РОБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НИЗЬКІЙ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Розглядаються зміни якісних параметрів електропостачання з точки зору пов'язаності рівня напруги, її перепадів і нерівномірності (провалів) із активною і реактивною потужностями. В роботі розглядаються статичні характеристики навантаження у вигляді поліномів другого порядку в залежності від напруги. Авторами використовуються регулюючі ефекти активного та реактивного навантаження відповідно до напруги, що показують на скільки відсотків змінюється вихідна потужність при відхиленні напруги. Авторами приймається обмеження на величину втрат потужності у споживача, що перерахована у регулюючих ефектах навантаження. Таким чином задається і діапазон зменшення напруги для промислового навантаження. За умови, що в електричних системах застосовуються пристрої компенсації реактивної потужності, призначені, насамперед, для розвантаження мереж від реактивних струмів, в результаті виконання компенсація реактивної потужності може дати негативний ефект збільшення сумарного електроспоживання. Основна мета статті – показати можливість мінімізації втрат активної і реактивної потужності у трансформаторах з регулюванням рівня напруги в мережі. Втрати потужності в силовому трансформаторі складаються із втрат холостого ходу та навантажувальних втрат. Втрати холостого ходу обумовлені втратами сталі від вихрових струмів і втратами на гістерезис. Втрати навантаження в трансформаторі пропорційні квадрату струму навантаження. В статті визначається оптимальна напруга на вході трансформатора, при якій сумарні втрати активної потужності трансформатора будуть мінімальними. Аналітично визначено втрати потужності залежно від відносного рівня напруги через прирівнення похідної втрат за напругою до нуля. Таким чином отримано співвідношення мінімізації втрат електроенергії у трансформаторі по середньому рівню напруги на вході трансформатора, який відповідає мінімуму втрат електроенергії в трансформаторі при змінному навантаженні.

Ключові слова: електрична енергія, показники якості електроенергії, перепади напруги, регулюючі ефекти активного та реактивного навантаження, втрата потужності, втрати енергії в трансформаторі.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, С. В. ШВЕЦЬ, А. В. ЯНЧИК

РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НИЗКОМ КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассматриваются изменения качественных параметров электроснабжения с точки зрения связанности уровня напряжения, его перепадов и неравномерности (провалов) с активной и реактивной мощностями. В работе рассматриваются статические характеристики нагрузки в виде полинома второго порядка в зависимости от напряжения. Авторами используются регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузки в соответствии с напряжением, показывающим на сколько процентов изменяется выходная мощность при отклонении напряжения. Авторами принимается ограничение на величину потерь мощности у потребителя, что пересчитано в регулирующих эффектах нагрузки. Таким образом, задается и диапазон уменьшения напряжения для промышленной нагрузки. При условии, что в электрических системах применяемые устройства компенсации реактивной мощности предназначены, прежде всего, для разгрузки сетей от реактивных токов, в результате выполнения компенсации реактивной мощности может появиться отрицательный эффект увеличения суммарного электропотребления. Основная цель статьи – показать возможность минимизации потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах с регулированием уровня напряжения в сети. Потери мощности в силовом трансформаторе состоят из потерь холостого хода и потерь под нагрузкой. Потери холостого хода обусловлены потерями стали от вихревых токов и потерями на гистерезис. Потери под нагрузкой в трансформаторе пропорциональны квадрату тока нагрузки. В статье определяется оптимальное напряжение на входе трансформатора, при котором суммарные потери активной мощности трансформатора будут минимальными. Аналитически определены потери мощности в зависимости от относительного уровня напряжения из-за приравнивания производной потерь по напряжению к нулю. Таким образом, получено соотношение минимизации потерь электроэнергии в трансформаторе по среднему уровню напряжения на входе трансформатора, который соответствует минимуму потерь электроэнергии в трансформаторе при переменной нагрузке.

Ключевые слова: электрическая энергия, показатели качества электроэнергии, перепады напряжения, регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузки, потеря мощности, потери энергии в трансформаторе.

Y. S. BEDERAK, O. G. GRIB, I. T. KARPALIUK, S. V. SHVETS, A. V. YANCHYK

OPERATION OF THE TRANSFORMER AT LOW POWER QUALITY

Changes in the quality parameters of power supply are considered from the point of view of the connectedness of the voltage level of its drops and unevenness (dips) with active and reactive power. The paper considers the static characteristics of the load in the form of a second-order polynomial depending on the voltage. The authors use the regulating effects of active and reactive loads in accordance with the voltage, showing the percentage of the output power changes when the voltage deviates. The authors accept the limitation on the amount of power losses at the consumer, which is recalculated in the regulating effects of the load. Thus, the voltage reduction range for the industrial load is also set. Provided that the reactive power compensation devices used in electrical systems are intended primarily for unloading networks from reactive currents, as a result of reactive power compensation, a negative effect of increasing the total power consumption may appear. The main goal of the article is to show the possibility of minimizing the losses of active and reactive power in transformers with regulation of the voltage level in the network. Power losses in a power transformer consist of no-load losses and load losses. No-load losses are due to eddy current losses of steel and hysteresis losses. Load losses in a transformer are proportional to the square of the load current. The article determines the optimal voltage at the input of the transformer, at which the total losses of the active power of the transformer will be minimal. Power losses are analytically determined as a function of the relative voltage level due to equating the derivative of voltage losses to zero. Thus, the ratio of minimizing electricity losses in the transformer at the average voltage level at the input of the transformer, which corresponds to the minimum energy losses in the transformer at variable load, has been obtained.

Keywords: electrical energy, power quality indicators, voltage drops, regulating effects of active and reactive load, power loss, energy losses in a transformer.

Постановка проблеми. Електрична енергія з моменту її відкриття у вигляді електричного поля використовується людством в різних видах. І найбільш масове її використання пов'язане передусім з можливістю передачі механічної енергії на великі відстані. Можливості генерації великих потужностей в сукупності із зручностями передачі електричної енергії на великі відстані привела до великої розгалуженості дротяних мереж. Силові мережі ускладнюються і ускладнюється їх система управління. Причому при управлінні систем тепер неодмінно дотримуються умови надійності електропостачання. Але не лише надійність електричних мереж стає важливою додатковою умовою електропостачання.

Слід зазначити, що електрична енергія нині в не меншій мірі виступає в ролі товару. І як будь-який товар підкоряється умовам економічного ринку, а це в першу чергу якість товару. З часом до якості цього специфічного товару стало пред'являтися все більше вимог. Так на початку 20 століття вимоги до якості визначалося рівнем напруги в електричній мережі. Споживчі прилади в основному склалися з освітлювальних ламп розжарювання, відповідно продукт роботи цих ламп – це світло, яке на пряму залежало від величини напруги в електричній мережі. А в міському масштабі споживання електричної енергією було пов'язано з трамваями на електричній тязі, електричним вуличним освітленням і телефонним зв'язком [1]. Відповідно і були висунені вимоги до якості електричної енергії, що постачалася [2–4].

Аналіз параметрів електротехнічного комплексу на відповідність якості електричної енергії на відповідному рівні у споживача. Відомі факти зростання потужності навантажень і відповідно електроспоживання зі збільшенням напруги (порівняно з 1 % зростання електроспоживання на 1 % зростання напруги) [5, 6]. Тому споживачам небайдуже, за яких рівнів напруги працює їх система електропостачання. Найчастіше можливе зниження напруги хоча б 1÷3 % з досягненням відповідного зменшення оплати електроенергії майже додаткових матеріальних витрат [7]. Важливо при цьому відзначити, що на практиці неодноразово підтверджувалася здатність споживачів електроенергії з належною якістю виконувати всі заплановані роботи при значеннях напруги, що перебувають у дозволеному ГОСТ 13109-97 [2] діапазоні $\pm 10\%$ от $U_{ном}$.

У програмних комплексах, що повсюдно використовуються, для розрахунку встановлених режимів енергосистем навантаження можуть відобразитися статичними характеристиками навантаження (СХН) у вигляді поліномів другого порядку від напруги $U = U_0 + \Delta U$:

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} + a_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right);$$

$$Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} + b_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right).$$

Індексом «0» позначені напруги та потужності в деякому вихідному, що вважається нормальному режимі, а коефіцієнти a і b підбираються за умов $a_0 + a_1 + a_2 = b_0 + b_1 + b_2 = 1$. Подібні СХН зазвичай розраховуються на діапазон зміни напруги до $\pm 20\%$ від U_0 .

У аналізованих нами нормальних, придатних для експлуатації режимах [7, 8], що встановилися, досить достовірно відтворити залежності навантажень від напруги при їх зміні в межах допустимих за ГОСТ відхилень напруги $\delta U = \Delta U / U_0 = \pm 10\%$. У цьому діапазоні залежності можна лінеаризувати, вважаючи $a_2 = b_2 = 0$. Після введення позначень $a_1 = K_P$, $b_1 = K_Q$, $a_0 = 1 - K_P$, $b_0 = 1 - K_Q$ потужності активної P та реактивної Q навантажень можуть бути записані у спрощеному вигляді, придатному для розрахунків як за програмами для персонального комп'ютера (ПК), так і в ручних оціночних розрахунках:

$$P = P_0(1 + K_P \cdot \delta U);$$

$$Q = Q_0(1 + K_Q \cdot \delta U).$$

Безрозмірні коефіцієнти K_P і K_Q часто називають регулюючими ефектами активного та реактивного навантаження відповідно до напруги. Вони показують, на скільки відсотків збільшилася (зменшилася) вихідна потужність при відхиленні напруги δU на $\pm 1\%$:

$$K_P = \frac{\Delta P / P_0}{\Delta U / U_0};$$

$$K_Q = \frac{\Delta Q / Q_0}{\Delta U / U_0}.$$

За аналогією до коефіцієнтів K_P і K_Q можна вести в розгляд і залежну від усередненої напруги спожиту за контрольний проміжок часу активну енергію W_P та її регулюючий ефект K_{WP} :

$$W_P = W_{P0}(1 + K_{WP} \cdot \delta U);$$

$$K_{WP} = \frac{\Delta W_P / W_{P0}}{\Delta U / U_0}.$$

Коефіцієнт K_{WP} співмірний за величиною із середнім за робочий тиждень коефіцієнтом K_P .

Наявна інформація про коефіцієнти K_P та K_{WP} для різних типів навантаження свідчить про найбільш ймовірний діапазон їх зміни в межах від 0 до 2,5.

Близькі до нуля регулюючі ефекти K_P відносяться до промислових систем електропостачання з потужними синхронними та асинхронними двигунами. Підвищені коефіцієнти характерні для режимів навантажень, для рухового, побутового, офісного та нагрівального навантажень на стороні 0,4 кВ.

Видається обґрунтованим прийняття в оціночних розрахунках величини можливої економії витрати електроенергії для промислового навантаження не менше 0,5 % на 1% зменшення напруги ($K_{WP} \geq 0,5$) та $K_{WP} \geq 1,0$ для іншого навантаження. При перебудові карт напруги у вузлах системи електропостачання з його зниженням хоча б $\delta U = 3\%$, що є можливим для переважної більшості мереж, споживач навіть при

мінімальному $K_{WP} = 0,5$ без додаткових витрат зменшить споживання електроенергії на величину

$$\Delta W_p = K_{WP} \cdot \delta U \cdot W_{P0} \geq 0,5 \cdot 0,03 \cdot W_{P0},$$

складову частку 1,5 % від споживаної енергії W_{P0} .

Таким чином, навіть короткочасне, на кілька годин, зниження напруги на велику величину (5–10 %) у години максимального режиму енергосистеми дозволить значно (не менше ніж на 2,5–5 %) зменшити активну потужність навантаження та, можливо, уникнути штрафів за перевищення заявленої договірної потужності навантаження. Реактивна потужність Q завантаження і набагато більшою мірою, ніж активна, залежить від напруги.

Для окремих електроприймачів без урахування встановлених у мережах компенсуючих пристроїв, що виробляють ємнісну потужність, що має негативний знак Q_{KV} , фіксується регулюючий ефект $K_Q = 2 \div 6$ [1, 9].

Оскільки у складі навантажень можуть бути реактивні навантаження Q_{KV} ємнісного характеру, що мають негативний знак, сумарна потужність Q_Σ при наближенні до 100 % компенсації реактивної потужності стає близькою до нуля. При цьому виникають ефекти різкого зростання числових значень $K_{Q\Sigma}$ і навіть зміна знаку $K_{Q\Sigma}$ у разі перекомпенсації реактивної потужності.

Повсюдно застосовувані заходи з компенсації реактивної потужності призначені насамперед для розвантаження мереж від реактивних струмів та зменшення цим активних навантажувальних втрат потужності. Практика показує велику ефективність компенсації реактивної потужності: втрати зменшуються майже на 30 % та можлива окупність витрат на компенсації реактивної потужності за рахунок зменшення оплати електроенергії.

Але впроваджувати пристрої компенсації реактивної потужності потрібно тільки при обов'язковому виконанні правила повернення підвищеного після компенсації реактивної потужності конденсаторами напруги до вихідного рівня. А оскільки таке цілеспрямоване регулювання практично не завжди здійснюється, є ймовірність зростання активного навантаження відповідно до її СХН навіть на величину, що перевищує зниження втрат під дією компенсації реактивної потужності. В результаті виконання компенсації реактивної потужності може дати негативний ефект збільшення сумарного оплачуваного електроспоживання [1].

Мінімізація втрат активної потужності у трансформаторах з регулюванням рівня напруги в мережі. Втрати потужності в силовому трансформаторі складаються із втрат холостого ходу та навантажувальних втрат. Втрати холостого ходу обумовлені втратами сталі від вихрових струмів і втратами на гістерезис. Втрати сталі пропорційні квадрату наведеної електрорушійної сили, яка приблизно дорівнює напрузі на висновках первинної обмотки трансформатора, так як втратами напруги в первинному ланцюгу трансформатора можна знехтувати. Втрати навантаження в трансформаторі

пропорційні квадрату струму навантаження. Зменшити ці втрати можна, підвищивши напругу живлення або зменшивши потужність навантаження трансформатора, наприклад шляхом компенсації реактивної потужності [10]. Але при цьому одночасно збільшаться втрати в сталі та реактивна потужність намагнічування трансформатора. [9, 11].

Доцільно визначити оптимальну напругу на вході трансформатора, при якому сумарні втрати активної потужності трансформатора будуть мінімальними. Виразивши втрати потужності залежно від відносного рівня напруги U_* і привівши похідну втрат за напругою до нуля, можна отримати простий аналітичний вираз для визначення оптимальної напруги:

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_X U_*^2 + \frac{1}{U_*^2} \Delta P_K K_3^2; \\ \frac{d\Delta P_T}{dU_*} &= 2\Delta P_X U_* - \frac{2}{U_*^3} \Delta P_K K_3^2 = 0; \\ U_{*opt} &= \sqrt[4]{\frac{\Delta P_K K_3^2}{\Delta P_X}}, \end{aligned}$$

де ΔP_X та ΔP_K – паспортні значення втрат активної потужності холостого ходу та короткого замикання трансформатора відповідно;

U_* – відносне значення напруги на вході трансформатора, що дорівнює відношенню фактичної напруги на вході до номінальної напруги його первинної обмотки;

$K_3 = S_2/S_{ном}$ – коефіцієнт завантаження трансформатора;

S_2 – потужність навантаження трансформатора;

$S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора.

Оптимальне напруження на вході трансформатора зі збільшенням його навантаження потрібно підвищувати. Враховуючи технічні обмеження за величиною допустимих відхилень напруги, оптимальна напруга U_{opt} для заданого типу трансформатора відповідає навантаженню трансформатора в діапазоні 40–55 % його номінальної потужності. При великих навантаженнях потрібно на вході трансформатора підтримувати максимально допустимий рівень напруги за умови роботи ізоляції, а при менших – мінімально допустимий рівень за умови забезпечення необхідної якості електроенергії у споживачів [11].

Мінімізація втрат реактивної потужності у трансформаторах регулюванням рівнів напруги в мережах живлення. Необхідно оптимізувати рівень напруги на вході трансформатора, який забезпечить мінімум втрат реактивної потужності в трансформаторі. Виразивши втрати реактивної потужності залежно від відносного рівня напруги U_* і привівши похідну втрат за напругою до нуля, можна отримати простий аналітичний вираз визначення втрат напруги:

$$\Delta Q_T = \Delta Q_X U_*^2 + \frac{1}{U_*^2} \Delta Q_K K_3^2;$$

$$\Delta Q_X = \frac{I_{X\%}}{100} S_{ном};$$

$$\Delta Q_K = \frac{U_{K\%}}{100} S_{ном};$$

$$U_{*opt} = \sqrt[4]{\frac{\Delta Q_K K_3^2}{\Delta Q_X}}.$$

де ΔQ_X та ΔQ_K – відповідно втрати реактивної потужності на намагнічування та втрати у реактивному опорі трансформатора при максимальному навантаженні;

I_X та I_K – відповідно струм холостого ходу та напруга короткого замикання трансформатора.

З погляду мінімізації втрат реактивної потужності оптимальні рівні напруги з урахуванням технічних обмежень можна було б підтримувати при завантаженнях трансформаторів в діапазоні 25–40 % від їх номінальної потужності. Тобто, умови мінімізації втрат активної та реактивної потужностей у трансформаторах шляхом зміни напруги на їхньому вході відрізняються, що можна пояснити різними співвідношеннями втрат холостого ходу та втрат в обмотках залежно від рівня вхідної напруги.

Мінімізація втрат електроенергії у трансформаторі. Середній рівень напруги на вході трансформатора, який відповідає мінімуму втрат електроенергії в трансформаторі при змінному навантаженні, визначається таким чином [11]:

$$\Delta W P_T = \Delta P_X U_*^2 8760 + \frac{1}{U_*^2} \Delta P_K K_{3.c}^2 \tau;$$

$$\frac{d\Delta W P_T}{dU_*} = 2\Delta P_X U_* 8760 - \frac{2}{U_*^3} \Delta P_K K_{3.c}^2 \tau = 0;$$

$$U_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\Delta P_K K_{3.c}^2 \tau}{\Delta P_X 8760}};$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{НБ}}{10000}\right)^2 8760;$$

$$K_{3.c} = \frac{S_c}{S_{ном}}; S_c = \frac{(WP^2 + WQ^2)}{T_p},$$

де S_c – середня за заданий період потужність навантаження трансформатора;

WP , WQ – відповідно кількість спожитої за заданий період активної та реактивної електроенергії;

T_p – тривалість роботи трансформатора під навантаженням;

$K_{3.c}$ – середній коефіцієнт завантаження трансформатора за заданий період часу;

$T_{НБ}$ – час використання максимального навантаження;

τ – час найбільших втрат.

Оптимальний рівень напруги на вході трансформатора, при якому втрати електроенергії в трансформаторі при змінному навантаженні будуть мінімальними, залежить не тільки від коефіцієнта його

завантаження та технічних характеристик, а й від форми графіка електричних навантажень, зокрема часу використання максимального навантаження. Чим рівномірніший графік електричних навантажень трансформатора і чим більший коефіцієнт завантаження, тим вище має бути рівень напруги на вході трансформатора, який відповідає мінімуму втрат електроенергії в ньому.

Мінімізувати втрати електроенергії в трансформаторах заданого типу можливо, підтримуючи оптимальний рівень напруги в мережі живлення при їхньому середньому завантаженні в межах 55–100 % від номінальної потужності, залежно від форми графіків електричних навантажень, тобто при значно більших завантаженнях у порівнянні з мінімізацією сумарних втрат активної потужності у трансформаторах. Тільки у разі рівномірного навантаження протягом заданого періоду часу при $\tau = 8760$ год, умови мінімізації втрат потужності та втрат електроенергії в трансформаторі збігаються, і оптимальна напруга буде однаковою для обох випадків.

Висновки. Підтримання якісних показників електричної енергії у споживача запропоновано розглядати через нерівномірні в часі і нерівномірні в потужності втрати електричної енергії в силовому трансформаторі. Авторами показано, що втрати для активної і реактивної складової потужності можуть мати вплив на певні якісні показники електричної енергії. З іншого боку наявність неякісних показників буде призводити до збільшення втрат потужності у силовому трансформаторі. В роботі розглянуто питання досягнення мінімізації втрат потужності в силових трансформаторах через використання регулюючих ефектів активного та реактивного навантаження відповідно до напруги при змінному навантаженні.

Список літератури

1. Кучумов Л., Кузнецов А. Зависимость загрузки и потерь мощности от напряжения. Реальность повышения потребления электроэнергии. *Новости ЭлектроТехники*. 2018. № 2 (110). С. 48–53.
2. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 56 с.
3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги в системах електропостачання загального призначення (EN 50160:2010, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 32 с.
4. Сокол Є. І. та ін. Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення. Харків: ФОП Бровін О. В., 2021. 330 с.
5. Карташев І. І. Провали напруги. Реальність прогнозів і схемні рішення захисту. *Новости ЭлектроТехники*. 2004. № 5 (29).
6. Фишман В. Провали напруги в сетях промпредприятий. Причины и влияние на электрооборудование. *Новости ЭлектроТехники*. 2004. № 5 (29).
7. Бедерак Я. С., Волков В. І. Виявлення і дослідження джерел вищих гармонік «неелектричного походження» в системі електропостачання промислового підприємства. *Промислова*

електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб.. 2019. №1. С. 8–11.

8. Гапон Д. А., Бедерак Я. С. Особенности режима работы питающей сети во время плавного пуска мощных синхронных двигателей. *Промышленная энергетика*. 2014. №2. С. 27–30.
9. Романюк Ю. Ф., Соломчак О. В. Оптимізація рівнів напруги в електричних мережах з метою зменшення втрат потужності та енергії в трансформаторах. «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро: інформ. зб.. 2014. №6. С. 45–48.
10. Бабич В. Энергосбережение для повышения экономической эффективности предприятия. *Новости ЭлектроТехники*. 2001. № 6.
11. Романюк Ю. Ф., Соломчак О. В. Зниження втрат електроенергії в силових трансформаторах шляхом підтримання оптимальної напруги живильної мережі. *Матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*. 2014. С. 152–153.

References (transliterated)

1. Kuchumov L., Kuznetsov A. Zavisimost' zagruzki i poter' moshchnosti ot napryazheniya. Real'nost' povysheniya potrebleniya elektroenerгии [Dependence of load and power loss on voltage. The reality of increased electricity consumption]. *Electrical Engineering News*. 2018, no. 2 (110), pp. 48–53.
2. DSTU IEC 61000-4-30:2010. *Elektromahnitna sumisnist'. Chastyna 4-30. Metody vuprobuvannya ta vymiryuvannya. Vymiryuvannya pokaznykiv yakosti elektrychnoyi enerhiyi (IEC 61000-4-30:2008, IDT)* [State Standard IEC 61000-4-30:2010. Electromagnetic comparability. Part 4-30. Test and measurement methods. Measurement of electrical energy quality parameters]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 56 p.
3. DSTU EN 50160:2014. *Kharakterystyky napryazheniya v systemakh elektroenerhiyi obshchego naznacheniya (EN 50160:2010, IDT)* [State Standard EN 50160:2014. Voltage characteristics in electricity supply systems.]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 32 p.
4. Sokol Ye. I. et al. *Tsyfrovyi oblik elektrychnoyi enerhiyi z urakhuvannyam pokaznykiv yiyi yakosti ta vyznachennyam vidpovidal'nosti za pohirshennya* [Digital metering of electricity, taking into account quality indicators and determining responsibility for deterioration]. Kharkiv, FOP Brovin O. V. Publ., 2021. 330 p.
5. Kartashev I. I. Provaly napryazheniya. Real'nost' prognozov i skhemnye resheniya zashchity [Voltage dips. Reality of predictions and protection schemes]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
6. Fishman V. Provaly napryazheniya v setyakh prompredpriyatiy. Prichiny i vliyanie na elektrooborudovanie [Voltage dips in industrial networks. Causes and effects on electrical equipment]. *Electrical Engineering News*. 2004 № 5(29).
7. Bederak Ya. S., Volkov V. I. Vyyavleniya i doslidzhennya dzhерel vyshchikh harmonik "neelektrychnoho pokhodzhennya" v systemi elektropostachannya promyslovoho pidpryyemstva [Identification and investigation of sources of higher harmonics of "non-electrical origin" in the power supply system of an industrial enterprise]. *"Industrial Electricity and Electrical Engineering". Promelectro: information bulletin*. 2019, no. 1, pp. 8–11.
8. Gapon D. A., Bederak Ya. S. Osobennosti rezhima raboty pitayushchey seti vo vremya pлавного пуска moshchnykh sinkhronnykh dvigateley [Features of mains operation during soft-start of powerful synchronous motors]. *Industrial Power Engineering*. 2014, no. 2, pp. 27–30.
9. Romanyuk Yu. F., Solomchak O. V. Optymizatsiya rivniv napruhy v elektrychnykh mrezhakh z metoyu zmnshennya vtrat potuzhnosti ta enerhiyi v transformatorakh [Optimisation of voltage levels in electricity networks to reduce power and energy losses in transformers]. *"Industrial Electricity and Electrical Engineering". Promelectro: information bulletin*. 2014, no. 6, pp. 45–48.
10. Babich V. Energoberezhenie dlya povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti predpriyatiya [Energy saving to improve the economic efficiency of a company]. *Electrical Engineering News*. 2001, no. 6.
11. Romanyuk Yu. F., Solomchak O. V. Znyzhennya vtrat elektroenerhiyi v sylovykh transformatorakh shlyakhom pidtrymannya optymal'noyi napruhy zhyvyl'noyi mrezhi [Reducing power losses in power transformers by maintaining optimum supply voltage]. *Materials of XVIII scientific conference of I. Pulyu TSTU*. 2014, pp. 152–153.

Надійшло (received) 30.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бедерак Ярослав Семенович (Бедерак Ярослав Семенович, Yaroslav Bederak) – кандидат технічних наук, Приватне акціонерне товариство «АЗОТ», керівник лабораторії, м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-0965>; e-mail: yaroslav0768@gmail.com.

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Oleg Gryb) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>. e-mail: oleg47gryb@gmail.com.

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Ігорь Тимофеевич, Igor Karpaliuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>. e-mail: humpway@gmail.com.

Швец Сергій Вікторович (Швец Сергей Викторович, Sergey Shvets) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3716-141X>. e-mail: se55sh32@gmail.com.

Янчик Олександр Григорович (Янчик Александр Григорьевич, Alexander Yanchuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра безпеки праці та навколишнього середовища, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1214-4883>. e-mail: yanchik@ukr.net.

Ю. С. БЕЗВЕРХНЯ, М. І. КОЦУР, Д. С. ЯРИМБАШ, І. М. КОЦУР

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРОЛЕЙНИХ ШИНОПРОВОДІВ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну довжину. Тому їх параметри та електричні характеристики істотно впливають на якість електроенергії, режими роботи електроприймачів та енергоефективність технологічних процесів. Існуючі в інженерній практиці методики розрахунку параметрів та характеристик шинопроводів засновані на методах схемного моделювання. Параметри схем зазвичай визначаються на основі узагальнених рівнянь. Ці рівняння отримані внаслідок низки припущень, що обмежує область їх використання. Альтернативною методикам, заснованих на емпіричних залежностях може бути застосування методів розрахунку електричних параметрів та характеристик шинопроводів на основі польового моделювання. Таким чином, в роботі було запропоновано математичну модель електромагнітних процесів в активних елементах тролей шинопровода, що враховує конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів і напруг. На основі реалізації математичної моделі запропоновано методику визначення параметрів та характеристик тролей шинопровода на основі польового моделювання, що враховує конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів та напруг, що володіє високою точністю та ефективністю чисельної реалізації. Встановлено вплив сталого кожуха на електричні параметри та характеристики шинопровода. Наявність сталого кожуха призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення падін напруги та спотворення їх фаз, а також до зростання втрат на 2 %. Виконано оцінку впливу на втрати активної потужності від гармонійних складових струмів. Наявність гармонійних складових струмів у межах стандарту призводить до додаткового збільшення втрат на 3 %. Однак, при перевищенні стандартизованих значень їх вплив на втрати активної потужності істотно зростає. Запропонована методика має високу точність та ефективність чисельної реалізації і може бути реалізована за допомогою програмного забезпечення зі статусом вільної ліцензії (наприклад, FEMM).

Ключові слова: тролейний шинопровід, польове моделювання, коефіцієнт потужності, реактивний опір, падіння напруги, гармоніки струму.

Ю. С. БЕЗВЕРХНЯ, М. І. КОЦУР, Д. С. ЯРИМБАШ, І. М. КОЦУР

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРОЛЛЕЙНЫХ ШИНОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Современные системы цехового электроснабжения могут иметь значительную протяженность. Поэтому их параметры и электрические характеристики оказывают существенное влияние на качество электроэнергии, режимы работы электроприемников и энергоэффективность технологических процессов. Имеющиеся в инженерной практике методики расчета параметров и характеристик шинопроводов основаны на методах схемного моделирования. Параметры схем обычно определяются на основе обобщенных уравнений. Эти уравнения получены в результате ряда предположений, что ограничивает область их использования. Альтернативой методикам, основанным на эмпирических зависимостях, может быть применение методов расчета электрических параметров и характеристик на основе полевого моделирования. Таким образом, в работе была предложена математическая модель электромагнитных процессов в активных элементах троллей шинопровода, учитывающая конструктивные параметры, нелинейность магнитных свойств, влияние гармонических составляющих токов и напряжений. На основе реализации математической модели предложена методика определения параметров и характеристик троллей шинопровода на основе полевого моделирования, учитывающая конструктивные параметры, нелинейность магнитных свойств, влияние гармонических составляющих токов и напряжений, обладающих высокой точностью и эффективностью численной реализации. Установлено влияние стального кожуха на электрические параметры и характеристики шинопровода. Наличие стального кожуха приводит к снижению коэффициента мощности, увеличению падений напряжения и искажению их фаз, а также к росту потерь на 2 %. Выполнена оценка влияния на потери активной мощности от гармонических составляющих токов. Наличие гармонических составляющих токов в пределах стандарта приводит к дополнительному увеличению потерь на 3 %. Однако, при превышении стандартизованных значений, их влияние на потери активной мощности существенно возрастает. Предлагаемая методика имеет высокую точность и эффективность численной реализации и может быть реализована посредством программного обеспечения со статусом свободной лицензии (например, FEMM).

Ключевые слова: троллейный шинопровод, полевого моделирование, коэффициент мощности, реактивное сопротивление, падение напряжения, гармоники тока.

YU. S. BEZVERKHNYA, M. I. KOTSUR, D. S. YARYMBASH, I. M. KOTSUR

INCREASING THE EFFICIENCY OF DETERMINING THE PARAMETERS OF TROLLEY BUSBARS BASED ON FIELD SIMULATION

Modern systems of shop power supply can be of considerable length. Therefore, their parameters and electrical characteristics have a significant impact on the quality of electricity, operating modes of electrical consumers and the energy efficiency of technological processes. Techniques for calculating the parameters and characteristics of busbars available in engineering practice are based on the methods of circuit modelling. Circuit parameters are usually determined based on generalized equations. These equations are obtained as a result of a number of assumptions, which limits the area of their use. An alternative to methods based on empirical dependencies can be the use of methods for calculating electrical parameters and characteristics based on field modelling. Thus, the work proposed a mathematical model of electromagnetic processes in the active elements of trolleys busbars. This model allows to take into account design parameters, nonlinearity of magnetic properties, the influence of harmonic components of currents and voltage. Based on the implementation of a mathematical model, a method was proposed for determining the parameters and characteristics of busbars trolleys based on field modelling. This allows you to take into account design parameters, nonlinearity of magnetic properties, the influence of harmonic components of currents and voltages. This model has high accuracy and efficiency of numerical implementation. The influence of the steel casing on the electrical parameters and characteristics of the busbar is established. The presence of a steel casing leads to a decrease in the power factor, an increase in voltage drops and distortion of their phases, as well as increase losses by 2 %. An assessment of the impact on active power losses due to harmonic components

© Ю. С. Безверхня, М. І. Коцур, Д. С. Яримбаш, І. М. Коцур, 2021

of currents has been carried out. The presence of harmonic components of currents within the standard leads to an additional increase in losses by 3 %. However, when the standardized values are exceeded, their effect on active power losses increases significantly. The proposed method has high accuracy and efficiency of numerical implementation and can be implemented using software with the status of a free license (for example, FEMM).

Keywords: trolley busbar, field modelling, power factor, reactance, voltage drop, current harmonics.

Вступ. Системи цехового електропостачання повинні відповідати жорстким вимогам високої надійності, ефективності та безпеки, забезпечуючи при цьому високу якість електричної енергії. Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну протяжність. Тому, їх параметри та електричні характеристики істотно впливають на якість електроенергії, режими роботи струмоприймачів та енергоефективність технологічних процесів [1]. Наявність силового електрообладнання, індукційних двигунів, перетворювачів, трансформаторів із насиченими магнітними системами тощо, істотно впливають на гармонійний склад струмів і напруги цехової електромережі [2–4]. Допустимий гармонійний склад струмів та напруги регламентований стандартом [5–6]. Наявність вищих гармонік, а також їх відхилення від нормованих значень, негативно впливає на ефективність і надійність елементів системи електропостачання, зокрема цехових шинопроводів. Вони можуть призводити до суттєвого збільшення електричних опорів шинопроводів, падіння напруги, втрат, зниженню коефіцієнта потужності, перегріву провідників шинопроводів та виходу їх з ладу.

Аналіз досліджень та публікацій. Існуючі в інженерній практиці методики розрахунку параметрів та характеристик шинопроводів засновані на методах схемного моделювання [7–11]. Параметри схем зазвичай визначаються на основі узагальнених рівнянь. Ці рівняння отримані внаслідок низки припущень та наближень, що обмежує область їх використання. Застосування методик на їх основі не дозволяє забезпечити необхідну точність та достовірність результатів, врахувати вплив гармонійного складу струмів та напруги, нелінійність властивостей активних матеріалів, поверхневі ефекти, ефекти близькості тощо. Методи оцінки впливу гармонійного складу струмів і напруги на параметри та характеристики шинопроводів, запропоновані в [12], засновані на емпіричних залежностях та не враховують геометрію активних матеріалів, а також їх електромагнітні властивості. Альтернативною методикам, заснованих на узагальнених виразах та емпіричних залежностях може бути застосування методів розрахунку електричних параметрів та характеристик на основі польового моделювання. Застосування методів розрахунку на основі польового моделювання набуло поширення для широкого класу задач електротехніки [13–19]. Їх основним обмеженням є необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення, високі витрати обчислювальних ресурсів та часу на чисельну реалізацію.

В роботах [20–23] пропонується визначити електричні параметри електротехнічних систем перетворення змінного струму на основі реалізації

моделі електромагнітного поля в *time step* формулюванні. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійність властивостей активних матеріалів, гармонійний склад струмів та напруги, але потребує значних витрат часу на чисельну реалізацію через необхідність збіжності розрахунку. У [22] було запропоновано модель електромагнітного поля у частотному формулюванні. Такий підхід вимагає значно менших витрат часу на чисельну реалізацію та дозволяє окремо врахувати вплив кожної гармонійної складової струму та напруги на параметри та характеристики шинопроводів. Однак, використання частотного формулювання розрахунку розподілу електромагнітного поля застосовується тільки для лінійних задач. Тролейні шинопроводи, як правило, мають сталевий кожух та інші елементи з феромагнітних матеріалів, що мають суттєву нелінійність магнітних властивостей. В [13–15] запропоновано використання ефективних значень магнітних властивостей феромагнітних матеріалів. Це дозволяє враховувати нелінійність властивостей матеріалів у частотних постановках розрахунку розподілу магнітного поля. Існуючі методи визначення ефективних значень магнітних властивостей матеріалів не завжди дозволяють забезпечити достовірність їх врахування, тому потрібне їх коригування з врахуванням відомих експериментальних та розрахункових даних. Таким чином, розробка високоефективної методики розрахунку параметрів шинопроводів та оцінки впливу гармонійного складу струмів та напруг на їх характеристики є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи. Розробка методики визначення параметрів та характеристик тролейних шинопроводів на основі польового моделювання, що враховує конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів та напруг, що володіє високою точністю та ефективністю чисельної реалізації.

Основний матеріал досліджень. Дослідження проводилися з прикладу тролейного шинопроводу з тролєями виготовлених з міді ШТМ-73 250А 660В. Розрахункова область наведено на рис. 1. Даний шинопровід набув широкого застосування та призначений для живлення мостових кранів, електричних талей, підвісних електричних однобалкових кранів та підлогових візків. Шинопровід має три мідні тролєї 1, вмонтовані в сталевий кожух 2 (рис. 1). Тролеї у кожусі закріплені на ізоляторах (кліцях) 3 (рис. 1).

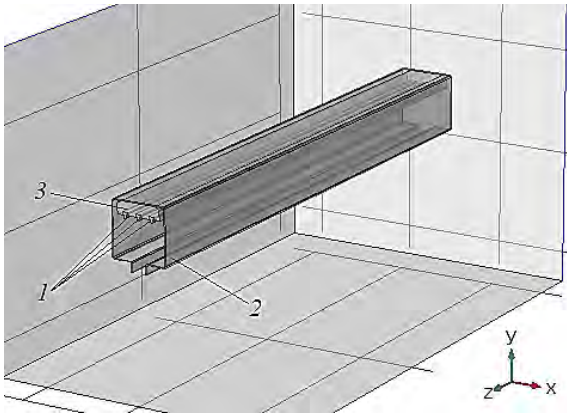


Рисунок 1 – Розрахункова область шинопроводу

При дослідженні електромагнітних процесів в шинопроводі були прийняті припущення, що магнітне поле, створене струмами, що протікають у троях шинопроводу, локалізується у сталевому кожусі та не виходить за його межі. Це дозволило виключити з області моделювання елементи кріплення шинопроводу, що дозволить скоротити витрати тимчасових та обчислювальних ресурсів, а також підвищити стійкість обчислювального процесу через відсутність необхідності врахування елементів, геометричні розміри яких значно менші за основні елементи шинопроводу.

Для врахування впливу поверхневого ефекту та ефекту близькості на величину активного та реактивного опорів шинопроводу реалізовувалося завдання розрахунку розподілу щільності струму та питомих електричних втрат у поперечному перетині троях та кожуха на основі сполучених просторових стаціонарних математичних моделей електромагнітного перетворення електричної енергії.

Система рівнянь Максвелла формулюється для комплексних амплітуд векторного магнітного та електричного потенціалів у геометричних електропровідних областях троях і сталевому кожусі та навколишнього електроізоляційного середовища (повітря) [21–25]:

$$\begin{cases} -\nabla \left[(j\omega\sigma_i - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\mathbf{A}_i + (\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\nabla V_i - \mathbf{J}_i^e \right] = 0 \\ (j\omega\sigma_i - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\mathbf{A}_i + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_{r,i}^{-1}\nabla \times \mathbf{A}_i) + (\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\nabla V_i = \mathbf{J}_i^e \end{cases} \quad (1)$$

де ω – кутова частота, рад/с;
 σ – електрична провідність, См/м;
 $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – електрична постійна, Ф/м;
 ε_r – діелектрична проникність;
 \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал, Вб/м;
 V – комплексна амплітуда електричного потенціалу, В;
 \mathbf{J}^e – комплексна щільність струму, А/м²;
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна постійна, Гн/м;
 μ_r – ефективна магнітна проникність;

індекс $i = 0$ відповідає області електроізоляційного та навколишнього середовища, а індекси $i = 1, 2$ – областям струмопровідних троях та кожуха.

Значення ефективної магнітної проникності визначалося відповідно до [22] і корегувалося за даними реалізації електромагнітної моделі в time step формулюванні.

Оскільки довжина секції шинопроводу становить 3 м, а загальна довжина може перевищувати 1 км, авторами було зроблено припущення, що поле в поперечному перетині шинопроводу наближається до плоскопаралельного. Це дозволяє суттєво скоротити розмірність задачі та перейти від просторового формулювання до плоскопаралельного [6, 26, 27]:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \mathbf{k} \cdot A_{z_i}; \mathbf{B}_i = \mathbf{i} \cdot B_{x_i} + \mathbf{j} \cdot B_{y_i}; \mathbf{H}_i = \\ &= \mathbf{i} \cdot H_{x_i} + \mathbf{j} \cdot H_{y_i}; V_i = \mathbf{k} \cdot V_{z_i} \end{aligned} \quad (2)$$

Система рівнянь (1) і (2) доповнюється умовами калібрування Кулона, умовами поєднання областей з різними електричними та магнітними властивостями та умовами електричної та магнітної ізоляції на зовнішніх межах та реалізується методом кінцевих елементів у структурі засобів програмного забезпечення COMSOL Multiphysics та FEMM. Температурний режим шинопроводу розраховувався відповідно до [18, 20].

За даними чисельного моделювання виконується оцінка енергії магнітного поля та питомої енергії магнітного поля у розрахунковій області [14, 15]

$$W|_i = \frac{1}{2} \iiint_{V_i} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, w|_i = W|_i / V_i, \quad (3)$$

а також активних втрат та питомих активних втрат у троях та кожусі

$$P|_i = \iiint_{V_i} \sigma_i^{-1} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{J})^* dx dy dz, p|_i = P|_i / V_i. \quad (4)$$

З використанням співвідношень (3) і (4) визначаються активні, реактивні, повні електричні опори троях та падіння напруги в них:

$$\begin{aligned} R|_i &= P|_i / S|_i; \\ W|_i &= \sum_k |I_k|^2 \cdot \frac{L_k}{2}; \\ X_k &= \omega L_k, Z|_i = \sqrt{R^2 + X^2}|_i; \\ \Delta U|_i &= \frac{Z|_i}{I}. \end{aligned} \quad (5)$$

Точність результатів чисельного моделювання оцінюється шляхом порівняння розрахункових значень електричних опорів шинопроводу з даними вимірювання заводу виробника. За активним опором похибка не перевищила 0,6 %.

Розрахунками електромагнітного поля підтверджено припущення авторів про локалізацію магнітного поля в межах сталевих кожухів та майже повну відсутність поля за границями зовнішніх меж кожухів (рис. 2). При силі струму в троліях 250 А та частоті 50 Гц, магнітне поле локалізується в зонах кожухів, що прилягають до його внутрішньої поверхні та поблизу крайніх тролієвих шинопроводів фази А та С (рис. 2).

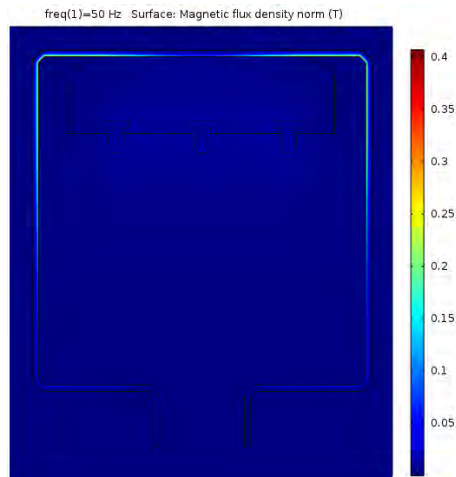


Рисунок 2 – Магнітне поле в розрахунковій області

Значення нормальної складової індукції у цих зонах досягають 0,41 Тл та знижуються до 0 на зовнішніх межах сталевих кожухів. Втрати активної потужності локалізуються в троліях. Питомі втрати становлять 4,5...5,2 Вт/м³ (рис. 3). При цьому, на характер розподілу втрат значно впливають як поверхневі ефекти в троліях, так і ефекти близькості між троліями різних фаз (рис. 3). Величина втрат у сталевому кожусі при частоті 50 Гц становить близько 2 % від сумарних активних втрат у шинопроводі. При цьому, сталевий кожух істотно впливає на падіння напруги у фазах тролієвих шин, кут фазового зсуву між фазами і коефіцієнт потужності.

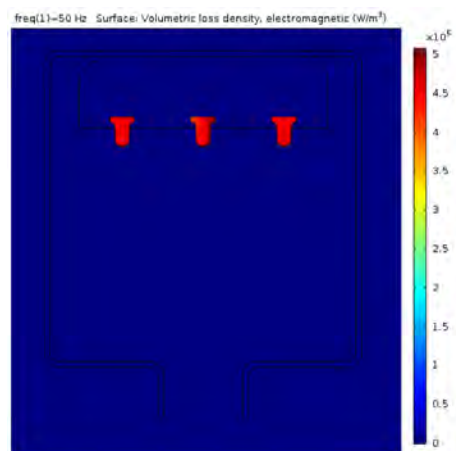


Рисунок 3 – Питомі втрати активної потужності

Для оцінки впливу гармонік струму та напруги були проведені розрахунки електромагнітного поля для допустимих значень гармонійних складових, для

мереж з найменшим коефіцієнтом відношення потужності короткого замикання до повної встановленої потужності обладнання $R_{sce} = 33$ відповідно до стандарту [5]: 5-та гармоніка $i_5 = 0,107 \cdot i_1$; 7-ма гармоніка $i_7 = 0,072 \cdot i_1$; 11-та гармоніка $i_{11} = 0,031 \cdot i_1$; 13-та гармоніка $i_{13} = 0,02 \cdot i_1$. Результати розрахунків наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Електричні параметри за наявності сталевих кожухів

Номер гармоніки	P, Вт/м	U (A/B/C)	
		Діюча, В/м	Фаза, град
1	78,397	0,145/0,153/0,179	27/137/-99
5	1,21	0,035/0,029/0,042	76/177/-69
7	0,58	0,032/0,026/0,037	83/-175/-65
11	0,12	0,021/0,016/0,023	88/-167/-61
13	0,056	0,018/0,016/0,023	90/-163/-59

По мірі збільшення частоти зона локалізації магнітного поля в сталевому кожусі значно звужується, що викликано зниженням глибини проникнення поля. Також змінюється характер локалізації питомих втрат у мідних троліях. При цьому проявляється більший вплив поверхневого ефекту та ефекту близькості.

За результатами розрахунку встановлено, що наявність феромагнітного кожухів призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення асиметрії фаз і діючих значень напруги, а також зростання втрат активної потужності. Наявність гармонійних складових струму в діапазоні регламентованому стандартом, призводить до додаткового збільшення активних втрат до 3 %. При цьому, при відхиленні гармонійного складу від стандартизованих значень, спостерігається істотне збільшення втрат активної потужності.

Висновки. Запропоновано математичну модель електромагнітних процесів у мідному тролієвому шинопроводі, яка дозволяє враховувати конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів та напруг. На основі її реалізації запропоновано методіку розрахунку електричних параметрів та характеристик тролієвих шинопроводів.

Встановлено вплив сталевих кожухів на електричні параметри та характеристики шинопроводу. Наявність сталевих кожухів призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення падіння напруги і не симетрії між фазами тролієвих шинопроводів, а також зростання втрат на 2 %.

Виконано оцінку впливу гармонійних складових струмів на втрати активної потужності. Наявність гармонійних складових струмів у межах стандарту призводить до додаткового збільшення втрат на 3 %. Однак, при перевищенні стандартизованих значень, їх вплив на втрати активної потужності істотно зростає. Запропонована методіка має високу точність і ефективність чисельної реалізації і може бути реалізована за допомогою програмного забезпечення зі статусом вільної ліцензії (наприклад, FEMM).

Список літератури

- Zare F., Ledwich G. F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002. Vol. 17, no. 4. P. 508–516. doi: 10.1109/TPEL.2002.800990.
- Коцур М. И., Коцур И. М., Близняков А. В. Повышение эффективности режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Т. 1, № 8(73). С. 27–30. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36670.
- Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M., Bliznyakov O. V. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. No. 4. P. 49–54.
- Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Speed synchronization methods of the energy-efficient electric drive system for induction motors. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018. P. 304–307. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336208.
- IEC 61000-3-12:2011+A1:2021. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2021. 54 p.
- Pellerey P., Lanfranchi V., Friedrich G. Coupled Numerical Simulation Between Electromagnetic and Structural Models. Influence of the Supply Harmonics for Synchronous Machine Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48, no. 2. P. 983–986. doi: 10.1109/TMAG.2011.2175714.
- Жемеров Г. Г., Ильина Н. А., Ильина О. В. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения. *Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки»*. 2008. Ч. 4. С. 31–36.
- Subbotin S., Oleynik A. The Feature Selection Method Based on the Evolutionary Approach With a Fixation of a Search Space. *2006 International Conference – Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science*. 2006. P. 574–575. doi: 10.1109/TCSET.2006.4404637.
- Subbotin S., Oleynik A. Entropy Based Evolutionary Search for Feature Selection. *2007 9th International Conference – The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics*. 2007. P. 442–443. doi: 10.1109/CADSM.2007.4297612.
- Oleynik A., Subbotin S., Oleynik A. Bee colony optimization for clustering. *2010 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. 2010. P. 286–286.
- Oleynik A., Subbotin S. Parametrical synthesis of neural network models based on the evolutionary optimization. *2009 10th International Conference – The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*. 2009. P. 335–338.
- Федоров А. А. *Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. Т. 2. Электрооборудование*. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 592 с.
- Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T. An application of scheme and field models for simulation of electromagnetic processes of power transformers. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018. P. 308–313. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336209.
- Yarymbash D., Kotsur M., Subbotin S., Oleynik A. A new simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines. *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. 2017. P. 429–434. doi: 10.1109/IDT.2017.8024332.
- Kotsur M., Yarymbash D., Yarymbash S., Kotsur I. A new approach of the induction motor parameters determination in short-circuit mode by 3D electromagnetic field simulation. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. P. 207–210. doi: 10.1109/YSF.2017.8126620.
- Васецкий Ю. М., Дзюба К. К. Аналитический метод расчета квазистационарного трехмерного электромагнитного поля тока, протекающего по контуру произвольной конфигурации вблизи электропроводного тела. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 7–17. doi: 10.15407/techned2017.05.007.
- Hwang C. C., Chang J. J., Jiang Y. H. Analysis of electromagnetic and thermal fields for a bus duct system. *Electric power systems research*. 1998. Vol. 45, no. 1. P. 39–45. doi: 10.1016/S0378-7796(97)01220-0.
- Kotsur M., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Increasing of thermal reliability of a regulated induction motor in non-standard cycle time conditions. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 88–91. doi: 10.1109/MEES.2017.8248960.
- Popa I. C., Dolan A., Ghindeanu D., Boltașu C. Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system. *2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2014. P. 1–4. doi: 10.1109/SIELA.2014.6871884.
- Ярымбаш Д. С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока. *Научный вестник Национального горного университета*. 2015. Вып. 3. С. 95–102.
- Yarymbash D. S., Oleinikov A. M. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*. 2015. Vol. 86, no. 2. P. 86–92. doi: 10.3103/S1068371215020121.
- Yarymbash D., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T., Litvinov D. Features of defining three-phase transformer no-load parameters by 3D modeling methods. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 132–135. doi: 10.1109/MEES.2017.8248870.
- Wu X. W., Shu N. Q., Li H. T., Li L. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50, no. 2. P. 277–280. doi: 10.1109/TMAG.2013.2282033.
- Плюгин В. Е. Численное моделирование электромагнитного поля асинхронного двигателя с внешним массивным ротором. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2013. № 51 (1024). С. 66–75.
- Wilow V. *Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics. Master's thesis*. KTH University, Sweden. 2014. 41 p.
- Зенкевич О., Морган К. *Конечные элементы и аппроксимация*. Москва: Мир, 1986. 318 с.
- He G., Huang Z., Chen D. Two-Dimensional Field Analysis on Electromagnetic Vibration-and-Noise Sources in Permanent-Magnet Direct Current Commutator Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. Vol. 47, no. 4. P. 787–794. doi: 10.1109/TMAG.2010.2103382.

References (transliterated)

- Zare F., Ledwich G. F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002, vol. 17, no. 4, pp. 508–516. doi: 10.1109/TPEL.2002.800990.
- Kotsur M. I., Kotsur I. M., Bliznyakov A. V. Povyshenie effektivnosti rezhima tormozheniya protivovklyucheniem asinkhronnogo dvigatelya s faznym rotorom [Increase effectiveness of reversible braking mode realization of the wound-rotor induction motor]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015, Vol. 1, no. 8(73), pp. 27–30. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36670.
- Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M., Bliznyakov O. V. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017, no. 4, pp. 49–54.
- Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Speed synchronization methods of the energy-efficient electric drive system for induction motors. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018, pp. 304–307. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336208.
- IEC 61000-3-12:2011+A1:2021. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2021. 54 p.

6. Pellerey P., Lanfranchi V., Friedrich G. Coupled Numerical Simulation Between Electromagnetic and Structural Models. Influence of the Supply Harmonics for Synchronous Machine Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, vol. 48, no. 2, pp. 983–986. doi: 10.1109/TMAG.2011.2175714.
7. Zhemerov G. G., Il'ina N. A., Il'ina O. V. Vzaimosvyaz' mezhdum modulem mgnovnoy reaktivnoy moshchnosti i KPD sistemy elektrosnabzheniya [Relationship between instantaneous reactive power module and power system efficiency]. *Tekhnichna Elektrodynamika, tem. vypusk, «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki»*. 2008, no. 4, pp. 31–36.
8. Subbotin S., Oleynik A. The Feature Selection Method Based on the Evolutionary Approach With a Fixation of a Search Space. *2006 International Conference – Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science*. 2006, pp. 574–575. doi: 10.1109/TCSET.2006.4404637.
9. Subbotin S., Oleynik A. Entropy Based Evolutionary Search for Feature Selection. *2007 9th International Conference – The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics*. 2007, pp. 442–443. doi: 10.1109/CADSM.2007.4297612.
10. Oleynik A., Subbotin S., Oleynik A. Bee colony optimization for clustering. *2010 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. 2010, pp. 286–286.
11. Oleynik A., Subbotin S. Parametrical synthesis of neural network models based on the evolutionary optimization. *2009 10th International Conference – The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*. 2009, pp. 335–338.
12. Fedorov A. A. *Spravochnik po elektrosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu. v 2 t. T. 2. Elektrooborudovanie* [Handbook on electrical supply and electrical equipment: in 2 vols. Vol. 2. Electrical equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 592 p.
13. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T. An application of scheme and field models for simulation of electromagnetic processes of power transformers. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018, pp. 308–313. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336209.
14. Yarymbash D., Kotsur M., Subbotin S., Oleynik A. A new simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines. *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. 2017, pp. 429–434. doi: 10.1109/IDT.2017.8024332.
15. Kotsur M., Yarymbash D., Yarymbash S., Kotsur I. A new approach of the induction motor parameters determination in short-circuit mode by 3D electromagnetic field simulation. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017, pp. 207–210. doi: 10.1109/YSF.2017.8126620.
16. Vasetskiy Yu. M., Dzyuba K. K. Analiticheskiy metod rascheta kvazistatsionarnogo trekhmernogo elektromagnitnogo polya toka, protekayushchego po konturu proizvol'noy konfiguratsii vblizi elektroprovodnogo tela [An analytical calculation method of quasi-stationary three-dimensional electromagnetic field created by the arbitrary current contour that located near conducting body]. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017, no. 5, pp. 7–17. doi: 10.15407/techned2017.05.007.
17. Hwang C. C., Chang J. J., Jiang Y. H. Analysis of electromagnetic and thermal fields for a bus duct system. *Electric power systems research*. 1998, vol. 45, no. 1, pp. 39–45. doi: 10.1016/S0378-7796(97)01220-0.
18. Kotsur M., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Increasing of thermal reliability of a regulated induction motor in non-standard cycle time conditions. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017, pp. 88–91. doi: 10.1109/MEES.2017.8248960.
19. Popa I. C., Dolan A., Ghindeanu D., Boltașu C. Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system. *2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIELA.2014.6871884.
20. Yarymbash D. S. Issledovanie elektromagnitnykh i termoelektricheskikh protsessov v pechakh grafitatsii peremennogo i postoyannogo toka [The research of electromagnetic and thermoelectric processes in the ac and dc graphitization furnaces]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015, no. 3, pp. 95–102.
21. Yarymbash D. S., Oleinikov A. M. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*. 2015, vol. 86, no. 2, pp. 86–92. doi: 10.3103/S1068371215020121.
22. Yarymbash D., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T., Litvinov D. Features of defining three-phase transformer no-load parameters by 3D modeling methods. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017, pp. 132–135. doi: 10.1109/MEES.2017.8248870.
23. Wu X. W., Shu N. Q., Li H. T., Li L. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, vol. 50, no. 2, pp. 277–280. doi: 10.1109/TMAG.2013.2282033.
24. Plyugin V. E. Chislennoe modelirovanie elektromagnitnogo polya asinkhronnogo dvigatelya s vneshnim massivnym rotorom [Numerical modelling of the electromagnetic field of an asynchronous motor with external solid rotor]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Problems of the Improvement of Electrical Machines and Apparatuses*. 2013, no. 51 (1024), pp. 66–75.
25. Wilow V. *Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics. Master's thesis*. KTH University, Sweden. 2014. 41 p.
26. Zenkevich O., Morgan K. Konechnye elementy i approksimatsiya [Finite elements and approximation]. Moscow, Mir Publ., 1986. 318 p.
27. He G., Huang Z., Chen D. Two-Dimensional Field Analysis on Electromagnetic Vibration-and-Noise Sources in Permanent-Magnet Direct Current Commutator Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011, vol. 47, no. 4, pp. 787–794. doi: 10.1109/TMAG.2010.2103382.

Надійшла (received) 30.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безверхня Юлія Сергіївна (Безверхняя Юлия Сергеевна, Yuliia Sergiivna Bezverkhnia) – асистент кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8779-2615>; e-mail: juliakafedraem@gmail.com.

Коцур Михайло Ігорович (Коцур Михаил Игоревич, Mykhailo Igorovych Kotsur) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-5437>; e-mail: kotsur_m@ukr.net.

Яримбаш Дмитро Сергійович (Яримбаш Дмитрий Сергеевич, Dmytro Serhiiovych Yarymbash) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Запорізька політехніка», завідувач кафедрою електричних машин, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2324-9303>; e-mail: yarymbash@gmail.com.

Коцур Ігор Михайлович (Коцур Игорь Михайлович, Igor Mykhailovych Kotsur) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних машин, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849>; e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com.

А. І. ВАЖИНСЬКИЙ, С. Ф. ЖУКОВ

МЕТОДИКА ОЦІНКИ РЕСУРСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ЦЕХІВ

Прогнозування займає центральне місце в управлінні виробництвом та інфраструктурою. Розробка нових методів визначення залишкового ресурсу устаткування є важливим завданням, спрямованим на підвищення ефективності використання промислових електротехнічних комплексів. Вирішення завдання достовірного визначення стану енергетичного обладнання в гірничо-металургійному комплексі дозволяє перейти від застарілої системи планово-попереджувальних ремонтів до обслуговування за станом агрегату. Складні технічні системи характеризуються складними нелінійними взаємодіями між складовими їх елементами, складними сценаріями причинно-наслідкових зв'язків між небезпечними, імовірнісними подіями та процесами, що відбуваються під час експлуатації цих систем. Як наслідок, розробляються методи та інструменти для оцінки механізмів зносу та управління ними у галузях з високим рівнем ризику. У статті наведено результати, пов'язані з розробкою методики оцінки залишкового ресурсу промислового обладнання. Запропоновано алгоритм оцінки залишкового ресурсу енергетичного обладнання, що базується на порівнянні результатів розрахунку прогнозних значень критеріїв залишкового ресурсу промислового обладнання з нормативними значеннями. У методології використовуються ймовірні математичні методи для прогнозування залишкового терміну служби та інформація, зібрана в ході аудитів та моніторингу обладнання. Поряд із класичними методами наведено методику, що базується на використанні всього потенціалу сучасної елементної бази мікропроцесорної техніки та технологій застосування штучних нейронних мереж, машинного навчання, «великих даних». На основі застосування ймовірнісного аналізу запропоновано методику контролю прогнозного залишкового ресурсу енергетичного обладнання, для якої розроблено алгоритм вирішення задач діагностики із застосуванням нейронних мереж.

Ключові слова: діагностика, штучні нейронні мережі, ефективність, надійність, експертна система, прогнозування, технічний стан, ідентифікація, ймовірнісні математичні методи, залишковий термін служби.

А. И. ВАЖИНСКИЙ, С. Ф. ЖУКОВ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛУРГИЧЕСКИХ ЦЕХОВ

Прогнозирование занимает центральное место в управлении производством и инфраструктурой. Разработка новых методов определения остаточного ресурса оборудования – важная задача, направленная на повышение эффективности использования промышленных электротехнических комплексов. Решение задачи достоверного определения состояния энергетического оборудования в горно-металлургическом комплексе позволяет перейти от устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по текущему состоянию агрегата. Сложные технические системы характеризуются сложными нелинейными взаимодействиями между составляющими их элементами, сложными сценариями причинно-следственных связей между опасными, вероятностными событиями и процессами, происходящими при их эксплуатации. Как следствие, разрабатываются методы и инструменты для оценки механизмов износа и управления ими в отраслях с высоким уровнем риска. В статье представлены результаты, связанные с разработкой методики оценки остаточного ресурса промышленного оборудования. Предложен алгоритм оценки остаточного ресурса энергетического оборудования, основанный на сравнении результатов расчета прогнозных значений критериев остаточного ресурса промышленного оборудования с нормативными значениями. В методологии используются вероятностные математические методы для прогнозирования остаточного срока службы и информация, собранная в ходе аудитов и мониторинга оборудования. Наряду с классическими методами приведены методики, базирующиеся на использовании всего потенциала современной элементной базы микропроцессорной техники и технологий применения искусственных нейронных сетей, машинного обучения, «больших данных». На основе применения вероятностного анализа предложена методика контроля прогнозного остаточного ресурса энергетического оборудования, для которой разработан алгоритм решения задач диагностики с применением нейронных сетей.

Ключевые слова: диагностика, искусственные нейронные сети, эффективность, надежность, экспертная система, прогноз, техническое состояние, идентификация, вероятностные математические методы, остаточный полезный срок службы.

A. I. VAZHINSKIY, S. F. ZHUKOV

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE RESOURCE OF POWER EQUIPMENT OF METALLURGICAL WORKSHOPS

Prognostic is central to manufacturing and infrastructure management. The development of new methods for determining the residual resource of equipment is an important task aimed at increasing the efficiency of using industrial electrical complexes. Solving the problem of reliably determining the state of power equipment in the mining and metallurgical complex makes it possible to move from an outdated system of scheduled preventive maintenance to maintenance based on the current state of the unit. Complex technical systems are characterized by complex nonlinear interactions between their constituent elements, complex scenarios of cause-and-effect relationships between hazardous, probabilistic events and processes occurring during their operation. Therefore, methods and tools are being developed to assess and manage wear mechanisms in high-risk industries. The article presents the results related to the development of a methodology for assessing the residual life of industrial equipment. An algorithm for assessing the residual life of power equipment is proposed, based on the comparison of the results of calculation of predicted values of the criteria of the residual life of industrial equipment with the normative values. The methodology uses probabilistic mathematical methods to predict the remaining service life and information collected during audits and equipment monitoring. Along with the classical methods, methods are presented based on the use of the entire potential of the modern element base of microprocessor technology and technologies for the use of artificial neural networks, machine learning, and «big data». Based on the application of probabilistic analysis, a methodology for monitoring the predicted residual life of power equipment has been proposed, for which an algorithm for solving diagnostic problems using neural networks has been developed.

© А. І. Важинський, С. Ф. Жуков, 2021

Keywords: diagnostics, artificial neural networks, efficiency, reliability, expert system, prediction, technical condition, identification, probabilistic mathematical methods, residual useful lifetime.

Вступ. В даний час сформувалося кілька методів обслуговування обладнання, серед яких можна виділити три основні: аварійне, обслуговування відповідно до регламенту і так зване предиктивне.

Перший вид – це обслуговування обладнання після виходу з ладу. Другий вид обслуговування – це обслуговування у межах планово-попереджувальних ремонтів, тобто обслуговування обладнання згідно з регламентом. У цьому випадку обслуговування здійснюється відповідно до рекомендацій заводу-виробника через певні проміжки часу. Роботи з обслуговування обладнання виробляються з певним періодом, що визначається регламентуючими документами.

Третій вид обслуговування, який і становить нині найбільший інтерес – предиктивне [1, 2] або обслуговування за фактичним технічним станом. При цьому виді обслуговування стан обладнання контролюється безперервно чи періодично. Програми технічного обслуговування складаються залежно від інформації, яка отримується від мікропроцесорних систем діагностування. Системи предиктивного обслуговування здатні прогнозувати стан системи на основі поточного стану обладнання та визначають необхідні заходи щодо технічного обслуговування [3]. Зниження частоти виходу з експлуатації устаткування, що є наслідком розширення впровадження систем діагностики, підвищує ефективність роботи енергетичного обладнання, підвищує якість готової продукції та знижує витрати на технічне обслуговування [4, 5].

Для господарського комплексу України, важливою частиною якого є металургійна промисловість, завдання визначення правильного методичного підходу до побудови сучасних діагностичних систем та максимально точного визначення ресурсу енергетичного обладнання як ніколи є актуальним у поточних умовах.

Актуальність. Електротехнічні комплекси металургійного виробництва забезпечують стійке енергопостачання відповідальних технологічних споживачів. Ефективна робота основного устаткування цехів значною мірою залежить від безаварійного функціонування електричного устаткування. Ситуація ускладнюється тією обставиною, що найчастіше максимальний проєктний термін експлуатації електрообладнання в металургійній промисловості, як і в інших галузях, наприклад, в енергетиці, підходить до граничних значень, а подекуди і перевищив їх [6]. У зв'язку з термінами вироблення встановленого ресурсу електрообладнання, що наближаються, стає актуальною проблема оцінки його технічного стану, прогнозування залишкового ресурсу і на цій основі продовження термінів його подальшої експлуатації.

Таким чином, на перше місце виходить проблема прогнозування залишкового ресурсу обладнання під час його експлуатації, досягнення граничних значень

технічних параметрів з обов'язковим збереженням необхідних значень надійності.

Існуючі методи вирішення проблеми. Досвід застосування систем діагностування на промислових об'єктах показує, що найбільший ефект досягається реалізацією методів визначення відмов та залишкового ресурсу обладнання на основі застосування спеціалізованих мікропроцесорних систем [7]. З метою узагальнення досвіду експлуатації таких систем доцільно їх систематизувати за такими ознаками [7]:

1. Системи діагностування комп'ютерних систем та їх компонентів.
2. Діагностування ефективності руху структурованих даних у розподілених комп'ютерних системах на основі технології побудови матричних моделей та епюр руху даних.
3. Системи вібродіагностики.
4. Системи діагностування об'єктів нафтогазового комплексу.
5. Системи контролю та управління технологічними процесами на атомних електростанціях.
6. Інші системи діагностування.

Важливою класифікаційною ознакою таких систем є використання певної інформаційної технології для реалізації алгоритмів та засобів діагностування, до яких належать:

1. Статистичний аналіз на основі обчислення математичного очікування, дисперсії та кореляційного аналізу.
2. Методи діагностики на основі Хеммінгових моделей.
3. Діагностика, що базується на основі застосування моделей у базисі Фур'є та інших числових базисів.
4. Діагностика з урахуванням ентропійних моделей.
5. Методи та засоби діагностики на основі нейронних мереж, а також відповідних експертних систем.
6. Діагностика з урахуванням кластерних моделей [7, 8].

Однак необхідно зазначити, що проблеми практики підвищення якості експлуатаційної надійності роботи електричного обладнання в гірничо-металургійній галузі в літературних джерелах загалом висвітлені недостатньо повно – ні в прикладній галузі, якщо не вважати деяких нормативних документів, що з'явилися в останні роки, ні в наукових дослідженнях.

Матеріали дослідження. Енергетичні установки, будучи складними та відповідальними технічними об'єктами, містять напружені вузли та агрегати, які при аварії можуть стати джерелом підвищеної небезпеки для виробництва та навколишнього середовища. Наразі, як зазначалося вище, близько 70 % енергоустановок вичерпали свій проєктний ресурс, але продовжують працювати. Виникає необхідність

впровадження у металургійній промисловості сучасних методів діагностики та систем контролю, що дозволяють прогнозувати можливість подальшої експлуатації обладнання, тобто розраховувати залишковий ресурс його [9].

Відмовою обладнання вважається порушення його працездатного стану. Якщо обладнання після відмови чи технічного огляду не підлягає відновленню, такий стан вважається граничним. Ознаки граничного стану устаткування, встановлені нормативно-технічною документацією, є критеріями граничного стану. Одним з таких є залишковий ресурс – запас можливого напрацювання.

При монотонно змінюваних діагностичних параметрах тієї чи іншої системи (тиск, температура, вібрація, витрата і т.д.) для прогнозування залишкового ресурсу обладнання може застосовуватися статистична методика на основі методу найменших квадратів [10]. Вибір методу прогнозування залишкового ресурсу залежить від умов експлуатації, характеру переважаючого процесу деградації (знос, корозія, втоми, повзучості та ін.), необхідної точності та достовірності прогнозу, а також від технічних можливостей реалізації методу. Критерієм вибору є критичність обладнання, вимоги до надійності системи експертної оцінки та обсяг даних. Оцінку працездатності за результатами діагностики здійснюють шляхом порівняння результатів із заздалегідь визначеними критеріями (нормативними значеннями). Виявлені дефекти відносять до допустимих або неприпустимих та приймають рішення щодо можливості подальшої експлуатації обладнання. Алгоритм представлено на рис. 1.

З усього вищесказаного можна дійти висновку, що найважливішим завданням при оперативному плануванні ремонтних робіт із єдиною метою мінімізації ризику виникнення аварійних ситуацій є завдання достовірного прогнозування показників контрольованого агрегату. Для цього може бути використаний метод прогнозування ресурсу ($r_0(t)$) обладнання з визначенням ймовірностей достовірності прогнозних значень [11]:

$$r_0(t) = r_B^{a_1}(t) r_M^{a_2}(t) r_T^{a_3}(t), \quad (1)$$

$$r_0(t) \in [0,1], \alpha_i \geq 0, \sum_i \alpha_i = 1, i = \overline{1,3}$$

де $r_B(t)$ – поточний ресурс обладнання, що оцінюється на основі аналізу даних інформаційних систем (програмований-логічний контролер, СКАДА, MES і т.д.);

$r_M(t)$ – призначений ресурс обладнання, який визначається на основі паспортних даних або даних, що надаються спеціалізованою організацією, що здійснює обстеження енергообладнання;

$r_T(t)$ – поточне значення коефіцієнта готовності аналізованого устаткування;

$\alpha_i (i = \overline{1,3})$ – ваги частинних складових $r_B(t)$, $r_M(t)$, $r_T(t)$.

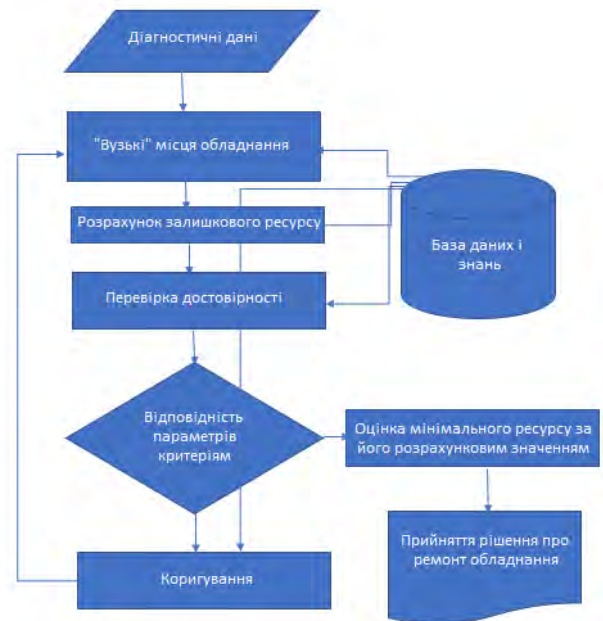


Рисунок 1 – Алгоритм прийняття рішення про залишковий ресурс обладнання

Таким чином, ресурс обладнання (1) відображає всі аварійні ситуації для комплексного об'єкта. Для розв'язання задач прогнозування стану контрольованого обладнання необхідно розуміти тенденцію зміни представницького діагностичного параметра, що характеризує поточний стан об'єкта контролю. У ролі такого показника може бути використаний ресурс обладнання, який визначається рівністю (1), який визначається на основі залежності від ресурсів складових частин комплексу (2):

$$r_0(t) = \prod_{i=1}^n r_i^{a_i}(t). \quad (2)$$

Як очевидно з визначення базової залежності основну роль розрахунку комплексного ресурсу контрольованого устаткування грають коефіцієнти ваги складових ресурсів (a_i). Так при одних і тих же значеннях складових ресурсів ($r_i(t)$) можуть виходити різні значення комплексного $r_0(t)$ показника. Тому ваги складових у складі комплексного ресурсу можуть визначитися як на основі експертної оцінки, так і на основі мінімізації помилки вирішення рівняння (2) одним з відомих способів. Наприклад, можна використати метод градієнтного спуску. Подібне визначення вагових коефіцієнтів сприяє виділенню тих складових ресурсів, які більшою мірою характеризують зміну поточного стану комплексу загалом.

Після розрахунку вагових коефіцієнтів складових ресурсів можна визначити ресурс енергетичної установки як комплексу. Підсумковим результатом визначення поточного ресурсу контрольованого об'єкта на момент часу стають два показники.

Перший – це оцінка критичного ресурсу установки, тобто виявлення «вузьких» місць. І другий – маючи однозначні показники комплексного ресурсу, можна оцінити динаміку зміни цієї інформації у часі. За підсумками побудови тенденції зміни можна спрогнозувати значення цього показника певний інтервал часу, тобто спрогнозувати стан контрольованого об'єкта. Це, у свою чергу, дозволить ефективно розпізнавати передаварійні ситуації на обладнанні.

У задачах діагностування та прогнозування нечітка нейронна мережа відіграє роль універсального апроксиматора функції від декількох змінних, реалізуючи нелінійну функцію (3):

$$Y = F(X), \quad (3)$$

де $\{X(t)\} = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$ – вектори вхідної інформації (поточні виміряні значення діагностичних параметрів), а Y – реалізація векторної функції кількох змінних. Постановка багатьох завдань діагностування та прогнозування технічного стану об'єкта може бути зведена саме до апроксимаційного уявлення.

Однією з простих моделей для встановлення діагностичної інформації можуть бути статичні моделі, що ув'язують критерії, що оцінюють стан об'єкта діагностування, його залишковий ресурс з відхиленнями вимірюваних параметрів у вигляді регресійної моделі дефектів (4):

$$\begin{aligned} \delta A &= W_{a1}X_1 + W_{a2}X_2 + \dots + W_{an}X_n \\ \delta B &= W_{b1}X_1 + W_{b2}X_2 + \dots + W_{bn}X_n, \end{aligned} \quad (4)$$

де $W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{an}, W_{b1}, W_{b2}, \dots, W_{bn}$ – вагові коефіцієнти (або коефіцієнти впливу).

У загальному вигляді алгоритм вирішення задач апроксимації та класифікації із застосуванням нейронних мереж, відповідно до [12], представлений на рис. 2.

Великою перевагою нейронних мереж є можливість використання так званої нечіткої інформації: експертні думки, судження «сильний», «слабкий», «достатній залишковий ресурс», «велика довговічність» тощо. Таким чином, на відміну від детермінованого підходу, ми можемо певним чином враховувати таку інформацію. У процесі навчання така гібридна мережа підлаштовує ваги вхідних нейронів і навчається найкращим чином відповідати зв'язку між вхідними і вихідними змінними. Іншими словами, створюється математична модель процесу чи явища. Ця модель найчастіше адекватна складній і громіздкій аналітичній моделі, створюється простіше і швидше. При зміні деяких констант (зовнішніх умов, показників і якостей об'єкта) вона легко перенавчається.

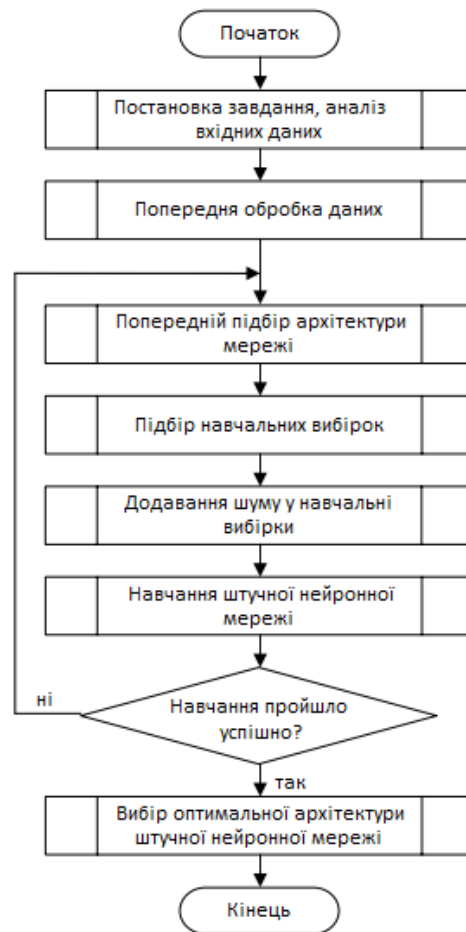


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму вирішення задач діагностики із застосуванням нейронних мереж

Висновки.

1. Застосування комплексного підходу до визначення залишкового ресурсу з використанням різних методів краще використання будь-якої однієї методики.

2. Запропоновано використання сучасного мікропроцесорного обладнання з можливістю розширення архітектури для реалізації перспективних досліджень у галузі теорії нейронних мереж та експертного аналізу

3. На основі застосування ймовірнісного аналізу отримано методику контролю прогнозного залишкового ресурсу енергетичного обладнання.

Список літератури

1. Rawi Z. Machinery Predictive Analytics. *SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*. 2010. doi: 10.2118/128559-MS.
2. Stone P. Introducing Predictive Analytics: Opportunities. *Digital Energy conference and exhibition*. 2007. doi: 10.2118/106865-MS.
3. Vlasov A. I., Yudin A. V., Salmira M. A., Shakhnov V. A., Ussov K. A. Design Methods of Teaching the Development of Internet of Things Components with Considering Predictive Maintenance on the Basis of Mechatronic Devices. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12, no. 20. P. 9390–9396.
4. Власов А. И., Григорьев П. В., Жалнин В. П. Применение методов и средств радиочастотной идентификации в корпоративных информационных производственных системах. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2017. Т. 1. С. 272–277.

5. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей. *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 2 (22). С. 26–35. doi: 10.21685/2307-4205-2018-2-4.
6. Гиря М. П., Штабский Л. М., Бронников А. Г., Манузин А. А., Митюшева И. А. Вопросы продления сроков эксплуатации электротехнического оборудования АЭС. *Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит*. 2007. № 9. С. 39–44.
7. Ширмовская Н. Г. Спецпроцессорное средство диагностики предаварийных и аварийных состояний объекта управления. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2014. № 5. С. 58–64.
8. Ширмовская Н. Г. Компьютеризированная система диагностирования квазистационарных объектов на основе кластерных моделей. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. № 1 (42). С. 155–159.
9. Казаков В. С., Слезко В. И., Кондратьева О. В. Диагностика эксплуатационных показателей эффективности работы энергетических установок. *Современные инновации в науке и технике: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф.* 2014. Т. 2. С. 201–205.
10. РД 26.260.004-91. *Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации*. Москва: Концерн Химнефтемаш, 1991. 96 с.
11. Казаринов Л. С., Шнайдер Д. А., Хасанов А. Р. Метод оценки текущего состояния контролируемого оборудования в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических работ. *Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2006. Вып. 4, № 14 (69). С. 84–87.
12. Осовский С. *Нейронные сети для обработки информации* / пер. с польского Рудинского И. Д. Москва: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
- radio frequency identification methods and tools in corporate production information systems]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. 2017, Vol. 1, pp. 272–277.
5. Vlasov A. I., Grigoryev P. V., Krivoshein A. I. Model' prediktivnogo obsluzhivaniya oborudovaniya s primeneniem besprovodnykh sensorynykh setey [Reliability and Quality of Complex Systems]. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2018, no. 2 (22), pp. 26–35. doi: 10.21685/2307-4205-2018-2-4.
6. Giryа M. P., Shtabskiy L. M., Bronnikov A. G., Manuzin A. A., Mityusheva I. A. Voprosy prodleniya srokov ekspluatatsii elektrotekhnicheskogo oborudovaniya AES [Issues of extending the service life of nuclear power plant electrical equipment]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2007, no. 9, pp. 39–44.
7. Shirmovskaya N. G. Spetsprotsessornoe sredstvo diagnostiki predavariynykh i avariynykh sostoyaniy ob"ekta upravleniya [Specialprocessor means of diagnostics of precritical and critical conditions of object of management]. *Bulletin of Brest State Technical University*. 2014, no. 5, pp. 58–64.
8. Shirmovskaya N. G. Komp'yuterizirovannaya sistema diagnostirovaniya kvazistatsionarnykh ob"ektov na osnove klasternykh modeley [Computerised diagnostic system for quasi-stationary objects based on cluster models]. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2013, no. 1 (42), pp. 155–159.
9. Kazakov V. S., Slezko V. I., Kondrat'eva O. V. Diagnostika ekspluatatsionnykh pokazateley effektivnosti raboty energeticheskikh ustanovok [Diagnosis of the operational performance of power plants]. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike: sb. st. IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* 2014, Vol. 2, pp. 201–205.
10. RD 26.260.004-91. *Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii* [Guiding Document 26.260.004-91. Methodological guidelines. Prediction of residual life of equipment according to changes in parameters of its technical condition during operation]. Moscow, Kontsern Khimneftemash Publ., 1991. 96 p.
11. Kazarinov L. S., Shnayder D. A., Khasanov A. R. Metod otsenki tekushchego sostoyaniya kontroliruemogo oborudovaniya v zadache operativnogo planirovaniya remonto-profilakticheskikh rabot [Method for assessing the current state of monitored equipment in the task of operational planning of repair and maintenance work]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics"*. 2006, Vol. 4, no. 14 (69), pp. 84–87.
12. Osowski S. *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Warszawa, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000. (Russ. ed.: Osovskiy S. *Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 s.)

References (transliterated)

Надійшла (received) 12.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Важинський Антон Іванович (Важинский Антон Иванович, Anton Ivanovich Vzhinskiy) – кандидат технічних наук, начальник управління ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», м. Кривий Ріг, Україна; e-mail: v.anton0304@gmail.com.

Жуков Станіслав Федорович (Жуков Станислав Федорович, Stanislav Fedorovich Zhukov) – доктор технічних наук, професор, генеральний директор ННВЦТУ «Квантум», м. Маріуполь, Україна; e-mail: sfg8800@gmail.com.

Д. А. ГАПОН, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, А. О. ЗУЄВ, Т. С. ДОНЕЦЬКА

ОБЛІК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ НИЗЬКІЙ ЇІ ЯКОСТІ

Розглядається питання обліку електроенергії за низької її якості. Викликає особливу увагу перевірка схеми обліку приєднання при низькій якості електричної енергії. Показано, що конкретне схемне рішення може впливати на точність обліку електричної енергії за умови поганої якості електричної енергії. У розподільних мережах, призначених для електропостачання промислових підприємств реактивна потужність також активна. За наявності у споживача компенсуючих пристроїв напрями активної та реактивної потужності можуть бути протилежними. Зазначається, що трансформатори струму, вибрані з урахуванням струму короткого замикання або характеристик релейного захисту, не забезпечують точність обліку через підвищений коефіцієнт трансформації, що змушує встановлювати додатковий комплект трансформаторів струму або переносити лічильники в іншу точку мережі. Таким чином справжній коефіцієнт трансформації трансформатора струму дещо відрізняється від номінального, а вектор вторинного струму утворює з вектором первинного деякий кут. Похибка по напрузі проявляється у деякому зменшенні вторинної напруги при навантаженні. Кутова похибка характеризується деяким кутом між векторами первинної та вторинної напруги. Значення похибок залежать від потужності навантаження трансформатора. Гранично допустиме значення падіння напруги трансформатора визначає клас точності. Для кожного класу точності встановлюється номінальна потужність. Таким чином, трансформатор напруги в залежності від навантаження може працювати в різних класах точності. Зміна класів точності призводить до похибок у вимірах приладів обліку і потребує відповідної корекції. Стаття розкриває причини виникнення таких похибок, що дозволяє розробити методики, і як наслідок, створити прилади із запобігання описаних похибок приладів обліку.

Ключові слова: показники якості електроенергії, трансформатор струму, номінальна потужність, облік електричної енергії, втрата потужності, електрична енергія.

Д. А. ГАПОН, О. Г. ГРИБ, И. Т. КАРПАЛЮК, А. О. ЗУЕВ, Т. С. ДОНЕЦКАЯ

УЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НИЗКОМ ЕЕ КАЧЕСТВЕ

Рассматривается вопрос учета электроэнергии при низком качестве. Вызывает особое внимание проверка схемы учета присоединения при низком качестве электрической энергии. Показано, что конкретное схемное решение может влиять на точность учета электрической энергии при плохом качестве электрической энергии. В распределительных сетях, предназначенных для электроснабжения промышленных предприятий, реактивная мощность также активна. При наличии у потребителя компенсирующих устройств направления активной и реактивной мощности могут быть противоположными. Отмечается, что трансформаторы тока, выбранные с учетом тока короткого замыкания или характеристик релейной защиты, не обеспечивают точность учета из-за повышенного коэффициента трансформации, заставляющего устанавливать дополнительный комплект трансформаторов тока или переносить счетчики в другую точку сети. Таким образом, настоящий коэффициент трансформации трансформатора тока несколько отличается от номинального, а вектор вторичного тока образует с вектором первичного некоторый угол. Погрешность по напряжению проявляется в некотором уменьшении вторичного напряжения при нагрузке. Угловая погрешность характеризуется некоторым углом между векторами первичного и вторичного напряжения. Значение погрешностей зависит от мощности нагрузки трансформатора. Предельно допустимое значение падения напряжения трансформатора определяет класс точности. Для каждого класса точности устанавливается номинальная мощность. Таким образом, трансформатор напряжения в зависимости от нагрузки может работать в разных классах точности. Изменение классов точности приводит к погрешностям в измерениях приборов учета и требует соответствующей коррекции. Статья раскрывает причины возникновения таких погрешностей, что позволяет разработать методики и как следствия создать приборы по предотвращению описанных погрешностей приборов учета.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, трансформатор тока, номинальная мощность, учет электрической энергии, потеря мощности, электрическая энергия.

D. A. GAPON, O. G. GRYB, I. T. KARPALIUK, A. O. ZUEV, T. S. DONETSKA

ELECTRIC POWER METERING WITH ITS LOW QUALITY

The issue of electricity metering with low quality is being considered. Special attention is paid to checking the connection metering scheme with low quality of electrical energy. It is shown that a specific circuit design can affect the accuracy of metering of electrical energy in case of poor quality of electrical energy. In distribution networks intended for power supply of industrial enterprises, reactive power is also active. If the consumer has compensating devices, the directions of active and reactive power can be opposite. It is noted that current transformers, selected taking into account the short-circuit current or the characteristics of relay protection, do not provide metering accuracy due to the increased transformation ratio, forcing the installation of an additional set of current transformers or transferring the meters to another point in the network. Thus, the current transformation ratio of the current transformer is somewhat different from the nominal one, and the secondary current vector forms a certain angle with the primary current vector. The voltage error is manifested in a slight decrease in the secondary voltage under load. The angular error is characterized by a certain angle between the vectors of the primary and secondary stress. The value of the errors depends on the load power of the transformer. The maximum allowable voltage drop of the transformer determines the accuracy class. A rated power is set for each accuracy class. Thus, the voltage transformer, depending on the load, can operate in different accuracy classes. Changing the accuracy classes leads to errors in the measurements of metering devices and requires appropriate correction. The article reveals the reasons for the occurrence of such errors, which makes it possible to develop methods and, as a consequence, create devices to prevent the described errors of metering devices.

Keywords: power quality indicators, current transformer, rated power, electricity metering, power loss, electrical energy.

Постановка проблеми: В даний час найбільш актуальними напрямками обліку електроенергії за низької її якості є [1–4]:

1. Оснащення енерго- та промислових підприємств та застосування спеціалізованих засобів вимірювань параметрів мережі, метрологічних характеристик та параметрів вимірювальних трансформаторів струму (ТТ) та трансформаторів напруги (ТН), необхідних для інструментального метрологічного забезпечення вимірювань та обліку електроенергії (для паспортизації вимірювальних комплексів, ревізії засобів обліку, енергетичних об'єктів підприємств).

2. Впровадження автоматизованих систем обліку електроенергії.

3. Забезпечення умов застосування засобів вимірювань:

- поділ ланцюгів обліку з ланцюгами релейного захисту і автоматики та телеметрії;
- виключення недовантаження або перевантаження ТТ та ТН;
- захист лічильників від температурних перепадів;
- розвантаження ліній, що з'єднують лічильники з ТН;
- перевірка правильності схем включення вторинних ланцюгів ТТ, ТН та лічильників;
- забезпечення своєчасної повірки (калібрування) ТТ, ТН та лічильників.

4. Заміна фізично та морально застарілих приладів обліку електроенергії, встановлення приладів підвищених класів точності (лічильників, ТТ та ТН).

5. Підвищення точності вимірювання електроенергії в режимах малих навантажень за рахунок:

- установки лічильників прямого включення у мережах 0,4 кВ при струмах навантаження 60–100 А;
- заміни ТТ на трансформатори з меншим коефіцієнтом трансформації;
- заміни індукційних лічильників на цифрові з вищим порогом чутливості та лінійною навантажувальною характеристикою.

6. Вжиття заходів щодо запобігання несанкціонованого доступу до приладів обліку електроенергії, їх захисту від розкрадання та вандалізму;

7. Заміна неізолюваних відгалужень до будівель на ізолювані, у тому числі кабельні та ін.

Перевірка схеми обліку приєднання при низькій якості електричної енергії. На точність обліку впливає відповідність конкретної схеми обліку приєднання правильній схемі. Існує велика кількість варіантів неправильних схем підключення ТТ та ТН до лічильника [5, 6].

Лічильник електроенергії є приладом, що реагує не тільки на значення енергії, але і на напрямок її передачі. Оскільки вимірювана електроенергія пропорційна потужності навантаження, то надалі оперуватимемо поняттям «напрямок потужності».

Як відомо, в електричному ланцюзі активна енергія передається від джерела (генератора) до приймача (навантаження). З метою включення послідовної обмотки вимірювального приладу роз'єднаємо один із проводів, що з'єднують джерело живлення з електроприймачем. Кінець дроту, звернений до джерела живлення, можна назвати генераторним, а інший кінець, звернений до навантаження, навантажувальним.

У розподільних мережах, призначених для електропостачання промислових підприємств активна та реактивна потужності, як правило, передаються в одному напрямку. Це пояснюється тим, що електроприймачі є активно-індуктивними опорами, тобто поряд з активною споживають і реактивну енергію.

За наявності у споживача компенсуючих пристроїв напрями активної та реактивної потужності можуть бути протилежними.

Зауважимо, що напрямок потужності від шин у лінію прийнято вважати позитивним, а від лінії до шин негативним.

Трифазну систему струмів і напруг можна зобразити графічно як векторів, т. е. відрізків певної довжини і напрямки. Напрямок вектора напруги від нульового або нижчого потенціалу до вищого вважають позитивним.

При побудові векторних діаграм трифазної системи слід керуватися наступним [7, 8]:

- для визначення значень лінійної напруги U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} достатньо з'єднати вершини векторів (побудувати трикутник);
- для визначення напрямків векторів у лінійних напруг, що утворюють сторони трикутника, потрібно поставити стрілки у напрямку обертання фаз (рис. 1).

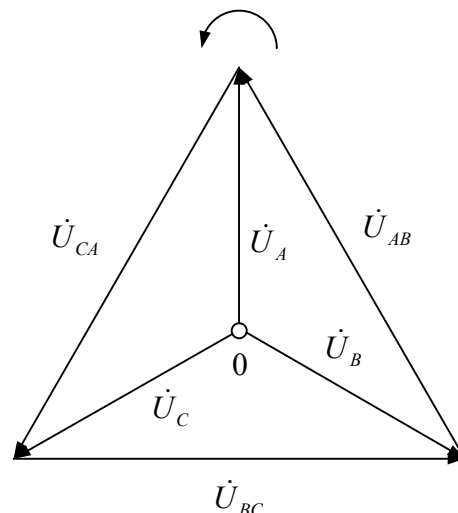


Рисунок 1 – Векторна діаграма напруг трифазної системи

При індуктивному навантаженні активна та реактивна потужності позитивні. В цьому випадку вектор струму I_A посунуто до вектора U_A на деякий кут φ , що відраховується проти годинникової стрілки. Як

прийнято вважати, при індуктивному навантаженні (реактивна потужність позитивна) струм відстає від фазної напруги. Це твердження справедливе і для струму I_C . Якби навантаження було ємнісним (активна потужність позитивна, реактивна негативна), струми випереджали б фазні напруги.

Як буде показано нижче, положення вектора струму, що проходить через послідовну обмотку лічильника, можна визначити за допомогою приладів, а потім, побудувавши векторну діаграму, зробити висновок про правильність включення лічильника.

Перш ніж перейти до розгляду конкретних схем включення лічильників, сформулюємо низку загальних положень [6, 9, 10].

Струм, проходячи від генератора до навантаження, повинен проходити через послідовну обмотку лічильника від її початку до кінця [8]. Іншими словами, генераторний провід мережі повинен бути підключений до генераторного затиску послідовної обмотки.

Початок послідовної обмотки розташований на затискній коробці однофазного лічильника лівіше від кінця і позначається буквою « L », (генератор) або меншим цифровим індексом, – кінець буквою « H » (навантаження) або великим цифровим індексом. Таким чином, при позитивному напрямку потужності до початку послідовної обмотки лічильника прямого включення підключається провід, що йде від шин розподільного пристрою, а при негативному – що йде від лінії.

Якщо лічильник включений через трансформатори струму, то до початку послідовної обмотки підключається провід від того затиску вторинної обмотки трансформатора струму, який однополярний з виведенням первинної обмотки, підключеним до генераторного струмопроводу (про однополярні затискачі вимірювальних трансформаторів буде дано далі). При цьому напрямку струму в послідовній обмотці буде таким самим, як і при безпосередньому включенні.

До затискачів паралельних обмоток зліва направо підключаються фази порядку їх прямого чергування. До середнього затискача обов'язково підключається середня фаза. Мається на увазі вторинна напруга тієї фази, в якій трансформатор струму не використаний у схемі. Такого ж порядку слід дотримуватися і для підключення фаз до послідовних обмоток.

Виконання цих умов забезпечує як правильні напрями струмів, так і правильні їх поєднання з напругами у кожному елементі лічильника.

У трансформаторів струму початок і кінець первинної обмотки позначаються індексами $L1$ і $L2$ (лінія), а початок і кінець вторинної обмотки – відповідно $I1$ та $I2$ (вимірювання). Затискачі $L1$ та $I1$ однополярні. Це означає, що напрямок струму у зовнішньому ланцюгу, підключеному до затискачів $I1$ та $L2$, збігається з напрямком струму в первинному ланцюгу від $L1$ до $L2$. Так, якщо затискач $L1$ є генераторним, то генераторним буде затискач $I1$. У розподільних пристроях прийнято встановлювати

трансформатори струму затиском $L1$ у бік збірних шин. Тоді затискач $I1$ є генераторним за позитивного напрямку потужності. У вбудованих трансформаторів струму однополярними є верхній затискач первинного ланцюга («верх») і затиск A вторинної обмотки.

На паспортній табличці трансформатора струму вказується його коефіцієнт трансформації у вигляді відношення номінальних первинного та вторинного струмів. Номінальний вторинний струм трансформаторів струму зазвичай дорівнює 5 А. У деяких випадках для електроустановок 110 кВ і вище застосовують трансформатори струму з номінальним струмом вторинної обмотки 1 А. Номінальний струм лічильника повинен відповідати номінальному струму вторинної обмотки трансформатора струму. Вторинні обмотки трансформаторів струму при непрямому і напівнепрямому включенні лічильників (з роздільним приєднанням ланцюгів напруги) повинні заземлятися.

Як відомо, трансформатор струму вибирається за умови, щоб його вторинний струм не перевищував 110 % номінального. З іншого боку, трансформатори струму, вибрані із завищеними коефіцієнтами трансформації з урахуванням струму короткого замикання, при малих вторинних струмах мають підвищені похибки.

Трапляються випадки, коли трансформатори струму, вибрані з урахуванням струму короткого замикання або характеристик релейного захисту, не забезпечують точність обліку через підвищений коефіцієнт трансформації. Ця обставина змушує встановлювати додатковий комплект трансформаторів струму або переносити лічильники в іншу точку мережі. Так, для лінії, що відходить від шин підстанції і належить споживачеві, лічильники допускається встановлювати не так на живильному, але в приймальному кінці (введення) в споживача. На силових трансформаторах допускається встановлення лічильників з боку нижчої напруги.

Справжній коефіцієнт трансформації трансформатора струму дещо відрізняється від номінального, а вектор вторинного струму утворює з вектором первинного деякий кут. Іншими словами, трансформатор струму має похибку по струму і по куту. Найбільша допустима похибка визначає клас точності трансформатора струму. Похибка трансформатора струму залежить від його навантаження.

Найбільше навантаження, коли його похибка не виходить за межі класу точності, вказується в паспортній табличці. Наприклад, для трансформаторів струму типу ТПЛ навантаження обмотки класу 0,5 не повинно перевищувати 0,4 Ом. Навантаження трансформатора струму визначається повним опором його зовнішнього вторинного ланцюга, сюди входять опори всіх послідовно включених приладів, а також з'єднувальних проводів та перехідних контактів. У практичних розрахунках допускається арифметичне складання повних опорів, що створює розрахунковий запас.

Паралельні обмотки лічильників у мережі напругою понад 1000 В живляться від трансформаторів напруги. Для цієї мети застосовуються як трифазні, так і групи однофазних трансформаторів напруги. Вторинна міжфазна напруга у них дорівнює 100 В. Таким же має бути і номінальна напруга лічильників, що підключаються до них.

Прийняті позначення висновків трифазного трансформатора напруги для високої напруги – A, B, C , O і для сторони низької напруги – відповідно a, b, c, o . Трансформатор має нульову групу з'єднання, тобто однойменні вектори первинної та вторинної напруги збігаються (якщо знехтувати погіршенням). Два однофазні трансформатори напруги з'єднані за так званою схемою відкритого трикутника (не слід плутати з розімкненим трикутником). Ця схема забезпечує симетричні трифазні напруги U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , тому вона призначена для живлення приладів і реле, включених на міжфазну напругу.

Вторинні обмотки трансформаторів напруги підлягають заземленню. У трифазних трансформаторів напруги заземляється або нульова точка, або виведення фази b . У відкритому трикутнику заземляється загальна точка вторинних обмоток трансформаторів, яка повинна відповідати вторинним затискачам, з'єднаним між собою та підключеним до «середньої» фази.

Трансформатори напруги мають похибку по напрузі і по куту, обумовлену падінням напруги в обмотках від струмів навантаження. Похибка по напрузі проявляється у деякому зменшенні вторинної напруги при навантаженні. Кутлова похибка характеризується деяким кутом між векторами первинної та вторинної напруги [10–12].

Значення похибок залежать від потужності навантаження трансформатора напруги. Чим вона більша, тим більше струми в обмотках. Пропорційно цим струмам збільшуються падіння напруги в обмотках [6, 8, 11, 13].

Гранично допустиме значення падіння напруги трансформатора визначає клас точності [9, 10]. Для кожного класу точності встановлюється номінальна потужність $S_{ном}$. Зазвичай для трансформатора напруг встановлюється два або три класи точності та дві або три відповідні їм номінальні потужності. Таким чином, трансформатор напруги в залежності від навантаження може працювати в різних класах точності.

Висновки. В статті розглянуто питання перевірки каналів обліку електроенергії з підключенням лічильника через трансформатор напруги. Визначення правильності включення лічильників електроенергії на діючих приєднаннях з постійним та змінним навантаженням. Поставлено питання зміни класу точності замірів в залежності від навантаження при наявності погіршеної якості електричної енергії. Описана зміна класів точності призводить до похибок у вимірах приладів обліку і потребує відповідної корекції. Поставлена в статті проблема потребує подальшого дослідження із розробки апаратних засобів корекції класів точності в залежності від потужності і параметрів якості електричної енергії.

Список літератури

1. Гриб О. Г., Гапон Д. А., Сиротин Ю. А., Ієрусалимова Т. С., Дяченко А. В. Мониторинг качества электроэнергии на цифровых подстанциях. *Вестник НТУ «ХПИ». Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.* 2015. № 12 (1121). С. 316–319.
2. Сокол Е. И., Жаркин А. Ф., Васильченко В. И., и др. *Качество электрической энергии. Том 3. Методы и средства повышения качества электрической энергии.* Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2014. 292 с.
3. Сиротин Ю. А., Гриб О. Г., Гапон Д. А., Ієрусалимова Т. С., Швець С. В. Учет неактивных составляющих полной мощности. *Вісник НТУ «ХПИ». Гідрравлічні машини та гідроагрегати.* 2017. № 22 (1244). С. 71–76.
4. Андрійчук Ю. А., Катренко Г. М. *Посібник для працівників енергопостачальних компаній і енергонагляду щодо роботи зі споживачами електроенергії та запобігання крадіжкам електроенергії.* Київ: «КВЩ», 2003. 423 с.
5. Труб И. И. *Обслуживание индукционных счетчиков и цепей учета в электроустановках.* Москва: Энергоатомиздат, 1983. 80 с.
6. Бедерак Я. С., Волошко А. В., Родин Ю. А., Праховник А. В. *Методы проверки схем включения счетчиков и измерительных каналов систем учета электроэнергии: Монография.* Харьков: Изд-во «Форт», 2012. 136 с.
7. Степанов Ю. А., Степанов Д. Ю. *Совершенствование релейной защиты на примерах построения векторных диаграмм.* Москва: Энергоатомиздат, 1999. 128 с.
8. Салей В. Н. Наладка схем трехфазного учета путем анализа векторных диаграмм. *Электронорама.* 2007. № 1-2, 3, 4.
9. ДСТУ ІЕС 60044-1:2008. *Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Трансформатори струму (ІЕС 60044-1:2003, ІДТ).* Київ: Держспоживстандарт України, 2009, 47 с.
10. ДСТУ ІЕС 60044-2:2008. *Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Трансформатори напруги індуктивні (ІЕС 60044-2:2003, ІДТ).* Київ: Держспоживстандарт України, 2009, 42 с.
11. Коменда Н. В., Коменда Т. І., Демов О. Д. Пошук споживачів-регуляторів на основі морфометричного підходу при управлінні добовим навантаженням промислового підприємства. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр.* 2010. Вип. 27. С. 22–26.
12. ГНД 34.09.203-2004. *Нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 35-750 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ. Інструкція. Галузевий нормативний документ.* Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», 2004. 38 с.
13. Вимоги Головного оператора системи комерційного обліку ОРЕ щодо складу, змісту та умов погодження технічних завдань, технічних, робочих та техноробочих проектів на створення автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) ОРЕ. *Додаток до листа ДП «Енергоринок» від 13.06.2014 № 03/35-6204.*

References (transliterated)

1. Gryb O. G., Gapon D. A., Sirotin Yu. A., Ierusalimova T. S., Dyachenko A. V. *Monitoring power quality in digital substations*. Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. 2015, no. 12 (1121), pp. 316–319.
2. Sokol E. I., Zharkin A. F., Vasilchenko V. I., et al. *Quality of electrical energy. Volume 3. Methods and means to improve the quality of electrical energy*. Kharkiv, PP «Graf-Iks» Publ., 2014. 292 p.
3. Sirotin Yu. A., Gryb O. G., Gapon D. A., Ierusalimova T. S., Shvets S. V. *Account inactive components of full power*. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. 2017, № 22 (1244), pp. 71–76.
4. Andriychuk Yu. A., Katrenko H. M. *Guidelines for energy service company and energy*

- watchdog staff on dealing with electricity consumers and preventing electricity theft]. Kyiv, «KVShch» Publ., 2003. 423 p.
5. Trub I. I. *Obsluzhivanie induktsionnykh schetchikov i tsepey ucheta v elektroustanovkakh* [Maintenance of induction meters and metering circuits in electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 80 p.
 6. Bederak Ya. S., Voloshko A. V., Rodin Yu. A., Prakhovnik A. V. *Metody proverki skhem vlyucheniya schetchikov i izmeritel'nykh kanalov sistem ucheta elektroenergii: Monografiya* [Methods for checking the connection schemes of meters and metering channels of electricity metering systems: Monograph]. Kharkiv, Izd-vo «Fort» Publ., 2012. 136 p.
 7. Stepanov Yu. A., Stepanov D. Yu. *Sovershenstvovanie releyroy zashchity na primerakh postroyeniya vektornykh diagram* [Improving relay protection with examples of vector diagrams]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1999. 128 p.
 8. Saley V. N. Naladka skhem trekhfaznogo ucheta putem analiza vektornykh diagramm. *Electropanorama*. 2007, no. 1-2, 3, 4.
 9. DSTU IES 60044-1:2008. *Transformatory vymiryuval'ni. Chastyna 1. Transformatory strumu* (IES 60044-1:2003, IDT) [State Standard IES 60044-1:2008. Measurement transformers. Part 1. Current transformer]. Kyiv, DSSU Publ., 2009, 47 p.
 10. DSTU IES 60044-2:2008. *Transformatory vymiryuval'ni. Chastyna 2. Transformatory napruhy induktyvni* (IES 60044-2:2003, IDT) [State Standard IES 60044-2:2008. Measurement transformers. Part 2. Inductive voltage transformers]. Kyiv, DSSU Publ., 2009, 42 p.
 11. Komenda N. V., Komenda T. I., Demov O. D. Poshuk spozhyvachiv-rehulyatoriv na osnovi morfometrychnoho pidkhotu pry upravlinni dobovym navantazhennyam promyslovoho pidpryyemstva [Finding consumer regulators based on a morphometric approach in daily load management of an industrial plant]. *The Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2010, no. 27, pp. 22–26.
 12. HND 34.09.203-2004. *Normuvannya vytrat elektroenerhiyi na vlasni potreby pidstantsiy 35-750 kV i rozpodil'chykh punktiv 6-10 kV. Instruktsiya. Haluzevyi normatyvnyi dokument* [Industry Document 34.09.203-2004. Electricity consumption rationing for own needs of 35-750 kV substations and 6-10 kV distribution points. Instruction. Industry normative document]. Kyiv, OEP «HRIFRE» Publ., 2004. 38 p.
 13. Vymohy Holovnoho operatora systemy komertsiyoho obliku ORE shchodo skladu, zmistu ta umov pohodzhennya tekhnichnykh zavdan', tekhnichnykh, robochykh ta tekhnorobochykh proektiv na stvorenni avtomatyzovanykh system komertsiyoho obliku elektroenerhiyi (ASKOE) ORE [Requirements of the Main Operator of the System of Commercial Metering of the Wholesale Electricity Market for the composition, content and conditions for the approval of technical tasks, technical, working and technical projects for the creation of automated systems of commercial metering of electricity (ASCME) of the Wholesale Electricity Market]. *Annex to the letter of SE "Energorynok" dated 13.06.2014 No. 03/35-6204*.

Надійшло (received) 08.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гапон Дмитро Анатолійович (Гапон Дмитрий Анатольевич, Dmytro Gapon) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>. e-mail: dima12345go@gmail.com.

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Oleg Gryb) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>. e-mail: oleg47gryb@gmail.com.

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Igor Karpaliuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>. e-mail: humpway@gmail.com.

Зув Андрій Олександрович (Зув Андрей Александрович, Andrey Zuev) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматики та управління в технічних системах, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8206-4304>. e-mail: dakarton@gmail.com.

Донецька Тетяна Сергіївна (Донецкая Татьяна Сергеевна, Tetiana Donetska) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0925-1001>. e-mail: iierusalimovat@gmail.com.

Д. А. ГАПОН, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, Н. В. РУДЕВИЧ

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ОБЛІКУ І ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

В статті показано, що дані, які збирає автоматизована система комерційного обліку електричної енергії, є ансамблем добових реалізацій випадкових процесів електроспоживання системи електропостачання. Основна мета використання автоматизованих систем комерційного та технічного обліку електричної енергії: зменшення витрат електроенергії. Але зазначається, що від операторів автоматизованих робочих місць залежить ефективність використання даних автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії, оперативність та правильне управління енергоспоживанням. Враховуючи стрімке вдосконалення як технічних засобів, так і математичних методів, які можуть бути застосовані для вирішення питань підвищення енергоефективності, виникає необхідність перетворення систем дистанційного збору даних із лічильників електричної енергії з урахуванням якості у вимірювально-інформаційну структуру, яка здатна не лише збирати дані з лічильників електричної енергії, а й їх аналізувати. Наводиться основний метод виявлення недообліку – балансовий метод. На базі балансового методу пропонується автоматично розраховувати небаланс по кожній секції лінії 6, 10 або 110 кВ головних знижувальних підстанцій та розподільних пунктів з урахуванням кількості та класів точності приладів комерційного та технічного обліку. Пропонується для зменшення втрат енергії і для зменшення оплати за електроенергію проводити вирівнювання навантаження на результатах розрахунків, виконаних автоматизованою системою комерційного обліку електричної енергії. В роботі запропоновано, що автоматизована система комерційного обліку електричної енергії має розраховувати коефіцієнти форми, максимуму, завантаження, а також інші морфометричні характеристики графіків електричних навантажень. В роботі звернуто увагу на низку проблем, що виникають при розрахунку зазначених параметрів: електронні лічильники вимірюють дані необхідні для розрахунків, але не із зазначеною дискретністю та, що головне, вимірювання ними даних параметрів якості електричної енергії метрологічно не атестовано, тому спиратися на такі дані можливо тільки як на довідникову інформацію.

Ключові слова: показник якості електроенергії, електрична енергія, автоматизована система, балансовий метод, електронні лічильники, втрати електроенергії.

Д. А. ГАПОН, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, Н. В. РУДЕВИЧ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье показано, что данные, собираемые автоматизированной системой коммерческого учёта электроэнергии, являются ансамблем суточных реализаций случайных процессов электропотребления системы электроснабжения. Основная цель использования автоматизированных систем коммерческого и технического учёта электроэнергии: уменьшение расхода электроэнергии. Но отмечается, что от операторов автоматизированных рабочих мест зависит эффективность использования данных автоматизированной системы коммерческого учёта электроэнергии, оперативность и правильное управление энергопотреблением. Учитывая стремительное усовершенствование как технических средств, так и математических методов, которые могут быть применены для решения вопросов повышения энергоэффективности, возникает необходимость преобразования систем дистанционного сбора данных из счетчиков электрической энергии с учетом качества в измерительно-информационную структуру, способную не только собирать данные со счетчиков электрической энергии, но и их анализировать. Приводится основной способ обнаружения недоучёта – балансовый способ. На базе балансового метода предлагается автоматически рассчитывать небаланс по каждой секции линии 6, 10 или 110 кВ основных понижающих подстанций и распределительных пунктов с учетом количества и классов точности приборов коммерческого и технического учета. Предлагается для уменьшения потерь энергии и уменьшения оплаты за электроэнергию проводить выравнивание нагрузки на результатах расчетов, выполненных автоматизированной системой коммерческого учёта электроэнергии. В работе предложено, что автоматизированная система коммерческого учёта электроэнергии должна рассчитывать коэффициенты формы, максимума, загрузки, а также другие морфометрические характеристики графиков электрических нагрузок. В работе обращено внимание на ряд проблем, возникающих при расчете указанных параметров: электронные счетчики измеряют данные необходимые для расчетов, но не с указанной дискретностью и, что главное, измерение ими данных параметров качества электрической энергии метрологически не аттестовано, поэтому опираться на такие данные можно только как на справочную информацию.

Ключевые слова: показатель качества электроэнергии, электрическая энергия, автоматизированная система, балансовый метод, электронные счетчики, потери электроэнергии.

D. A. GAPON, O. G. GRIB, I. T. KARPALIUK, N. V. RUDEVICH

AUTOMATED METERING AND POWER QUALITY SYSTEMS IN POWER SUPPLY SYSTEMS

The article shows that the data of the collected by the automated commercial electricity metering systems are an ensemble of daily realizations of random processes of power consumption of the power supply system. The main purpose of using automated systems of commercial and technical electricity metering is to reduce power consumption. But it is noted that the efficiency of using data of the automated commercial electricity metering system, efficiency and proper management of energy consumption depends on the operators of automated workstations. Considering the rapid improvement of both technical means and mathematical methods that can be applied to address energy efficiency issues, there is a need to transform remote data collection systems from electricity meters, taking into account quality, into a measuring and information structure capable of not only collecting data from meters, electrical energy, but also analyse them. The main method for detecting undercounts is given - the balance method. On the basis of the balance method, it is proposed to automatically calculate the unbalance for each section of the 6, 10 or 110 kV line of the main step-down substations and distribution points, taking into account the number and accuracy classes of commercial metering and technical metering devices. It is proposed to balance the load on the results of calculations performed by automated commercial electricity metering system in order to reduce energy losses and reduce payment for electricity. It is proposed in the work that the automated commercial electricity metering system should calculate the coefficients of form, maximum, load, as well as other morphometric characteristics of the graphs of electrical loads. The work drew attention to a number of problems arising in the

© Д. А. Гапон, О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, Н. В. Рудевич, 2021

calculation of these parameters: electronic meters measure the data necessary for calculations but not with the specified discreteness and, most importantly, their measurement of these parameters of the quality of electrical energy is not metrologically certified, therefore, such data can only be relied on as background information.

Keywords: power quality indicator, electrical energy, automated system, balance method, electronic meters, power losses.

Постановка проблеми: Як правило, в автоматизованих системах комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ) збираються дані про 30 або 15 хвилинні значення активної та реактивної енергії в точці обліку та показники параметрів її якості. Отримані дані є ансамблем добових реалізацій випадкових процесів електроспоживання системи електропостачання (СЕС). Таку інформацію слід використовувати для обробки та накопичення статистичних даних параметрів режимів з метою їх використання для оптимізації перетікань потужностей у СЕС, вирішення інших завдань.

АСКОЕ вже кілька десятиліть знаходять застосування на понижувальних підстанціях (ПП) для організації та автоматизації обліку електричної енергії. В даний час впроваджено АСКОЕ, які використовуються як так звані AMR (Automated Meter Reading) – систем дистанційного збору даних із лічильників електричної енергії з урахуванням якості. Інформація з первинної бази даних лічильника через цифрові інтерфейси зчитується та передається до центрів їх обробки для аналізу та формування рахунків за поставлену/спожиту електричну енергію. Тобто, впровадження АСКОЕ значно скорочує терміни збору даних, підвищує їх достовірність та дозволяє автоматизувати процес розрахунків за поставлену/спожиту електричну енергію.

Враховуючи стрімке вдосконалення як технічних засобів, так і математичних методів, які можуть бути застосовані для вирішення питань підвищення енергоефективності ПП, виникає необхідність перетворення (на першому етапі) системи типу AMR у систему AMI (Advanced Metering Infrastructure) – вимірювально-інформаційну структуру, яка здатна не лише збирати дані з лічильників електричної енергії, а й їх аналізувати. Це дозволить (на другому етапі) впровадити на ПП інформаційну складову загальної системи. Smart Grid – систему AMM (Advanced Meter Management - система інтелектуальних вимірів).

На рис. 1 наведено типову блок-схему АСКОЕ.

До програмного продукту АСКОЕ входить блок аналізу якості електричної енергії.

Позначення на рис. 1: АРМ – автоматизоване робоче місце користувача АСКОЕ, ПЗПД – пристрій збору та передачі даних, ЛС_о – лічильник основний (о) і дублюючий (д).

Інформація в АСКОЕ (в автоматизованих системах технічного обліку електроенергії (АСТОЕ) аналогічно) відображається у вигляді мнемосхем, таблиць, графіків та діаграм [1].

Від зручності роботи операторів автоматизованих робочих місць АСКОЕ залежить ефективність використання даних АСКОЕ, оперативність та правильне управління енергоспоживанням.

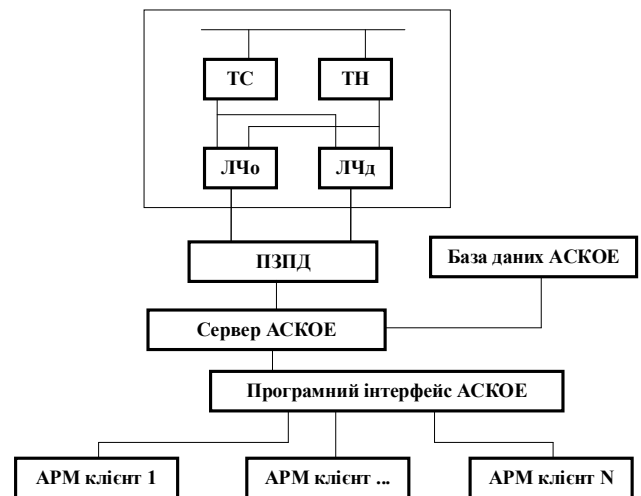


Рисунок 1 – Блок-схема АСКОЕ

В даний час для власників ПП існує основна мета використання АСКОЕ та АСТОЕ: зменшення витрат електроенергії та зменшення розміру оплати за електроенергію.

Зменшення витрати електроенергії та розміру оплати за електроенергію здійснюється шляхом використання наступних заходів:

1. Розрахунок за спожиту електроенергію за наявності економічного ефекту за тарифами, диференційованими за періодами часу.

2. Проведення внутрішньозаводських розрахунків між структурними підрозділами електроенергії.

АСТОЕ зменшує технологічну складову електроспоживання ПП, пов'язане з порушенням технологічного циклу та неефективністю використання обладнання [2].

3. Контроль витрат та вироблення реактивної електроенергії в структурних підрозділах та на підприємстві в цілому.

АСКОЕ і АСТОЕ здатні розраховувати в режимі реального часу оптимальну потужність компенсуючих пристроїв перетікання реактивної потужності в електропостачальній системі промислового підприємства. За даними систем обліку за розрахунковий інтервал визначаються реактивні потужності підстанцій, визначаються відхилення від оптимальних значень та обираються регулюючі впливи на пристрої, що компенсують. Головне завдання при цьому – зменшити перетікання реактивної потужності на межі балансової приналежності електричних мереж споживача та енергопостачальної організації та не допустити генерації реактивної потужності в мережу.

4. Розробка процедури проведення оперативного, короткострокового прогнозування електричного навантаження. Це дозволить уникнути перевищення узгодженого розрахункового навантаження на ПП. Прогнозування може бути виконано або економіко-

математичними методами (наприклад, методом експоненційного згладжування [3]), або методом нейронних мереж [4]. По кожному приєднанню для проведення обліку електроенергії (найдоцільніше це для потужних приєднань) необхідно розрахувати максимальне значення електричного навантаження. Це створить можливість точно отримати значення розрахункового максимуму для точки комерційного обліку електроенергії.

5. Розрахунок у режимі реального часу або за запитом втрат електроенергії в елементах електричної мережі відповідно до формул, зазначених у [5].

6. Розрахунок у режимі реального часу втрат на власні потреби на підстанціях ПП [6].

7. Перевірка якості роботи технологічного чи оперативного персоналу шляхом порівняння питомих норм витрати електроенергії на одиницю продукції або іншого паливно-енергетичного ресурсу за кожну зміну, добу, тиждень тощо.

8. Інтеграція АСКОЕ та АСТОЕ із системами управління ресурсами підприємств, щоб запровадити на виробництві систему контролю та оперативного планування енергоресурсів. Після збору значень факторів, від яких залежить рівень споживання ПЕР, даних обсягу продукції та кількості спожитої сировини система контролю та оперативного планування енергоресурсів має побудувати математичну модель енергоспоживання об'єкта, обчислювати індивідуальні та групові «стандарти» нормального енергоспоживання. Докладно ці питання розглянуті в роботах [7, 8].

9. Інструментальна підтримка процесів впровадження та супроводу енергозберігаючих заходів та технологій, в т.ч. енергетичного аудиту, а також реалізації керуючих впливів у рамках впровадження систем енергетичного менеджменту та енергетичного моніторингу [9].

10. Відомості балансів на підстанціях ПП з метою виявлення недообліку, небалансу, невиробничих втрат з метою їхнього подальшого усунення.

Балансовий метод є основним способом достовірності та виявлення похибок вимірювання електроенергії. Суть методу полягає у порівнянні значень фактичного та допустимого небалансів електроенергії на всій підстанції або секції шин [10].

Фактичний небаланс у відсотках $НБф$ розраховується згідно показань приладів обліку як різниця між електроенергією, що надійшла на об'єкт W_n та відпущеною електроенергією W_o . Крім того, враховуються власні, господарські та виробничі потреби об'єкту W_{in} , а також технічні втрати в елементах обладнання ΔW_{mex} за формулою:

$$НБф = \frac{W_n - W_o - W_{in} - \Delta W_{mex}}{W_n} \cdot 100\%.$$

Значення допустимого небалансу електроенергії у відсотках $НБд$ визначається за формулою, що враховує максимально допустимі відносні похибки δW_i кожного вимірювального каналу, а також частку електроенергії d_i прийому електроенергії, що надійшла по всіх

вимірювальних каналах N_n та частку електроенергії d_j , віддачі електроенергії, що надійшла по всіх вимірювальних каналах N_o з енергооб'єкту:

$$НБд = \pm \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_n} \delta W_i^2 d_i^2 + \sum_{j=1}^{N_o} \delta W_j^2 d_j^2 \right) \cdot 100\%}.$$

Максимально допустима відносна похибка вимірювального каналу розраховується за такою формулою:

$$\delta W_i = \pm \sqrt{\delta_l^2 + \delta_U^2 + \delta_{Лч}^2 + \delta_n^2},$$

де δ_l , δ_U , $\delta_{Лч}$, δ_n – похибки трансформатора струму, трансформатора напруги (ТН), лічильника, внаслідок втрат між ТН та лічильником відповідно.

У випадку, коли $НБф$ не перевищує $НБд$, облік електроенергії може бути визнаний достовірним. При протилежній ситуації облік є недостовірним і персонал підстанції повинен з'ясувати причини небалансу та вжити заходів щодо їх усунення.

Необхідно розраховувати небаланс по кожній секції лінії 6, 10 або 110 кВ головних знижувальних підстанцій та розподільних пунктів з урахуванням кількості та класів точності приладів обліку комерційного обліку та технічного обліку [11].

11. Управління режимами електроспоживання з метою зниження споживання за години пікового навантаження та збільшення його в позапіковий час.

Вирівнювання навантаження має значення як зменшення втрат енергії, так і зменшення оплати за електроенергію. АСКОЕ здатна розраховувати коефіцієнти форми, максимуму, завантаження, а також інші морфометричні характеристики графіків електричних навантажень, запропоновані в роботі [12].

На ПП проводиться моніторинг та контроль наступних поточних технологічних параметрів режимів електроспоживання [13]:

1. Усереднене значення активного та реактивного навантаження за 5, 30 хвилин, годину, добу, декаду, місяць тощо.

2. Пофазні активні потужності; пофазні реактивні потужності; пофазні повні потужності; кути зсуву фаз.

3. Середнє значення фазного або лінійного струму на приєднанні за перелічені вище інтервали часу.

4. Параметри якості електроенергії вимірюються та збираються електронними лічильниками згідно ГОСТ 13109-97 [14]: фазні або лінійні напруги, частота, відхилення напруги, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовністю відповідно та інші). Необхідно зауважити, що вищезазначені параметри електронні лічильники вимірюють, але не із зазначеної в [10] дискретністю та, що головне, вимірювання ними даних параметрів якості електричної енергії метрологічно не атестовано. В роботі [11] запропоновано поєднати АСКОЕ із

системою контролю якості електроенергії. Реєстратори (монітори) якості електроенергії здатні забезпечити частоту отримання даних не менше 5 кГц (5000 вимірювань за секунду), що забезпечує значно кращий контроль за показниками якості електроенергії, ніж електронні лічильники, у яких частота отримання найважливіших даних не перевищує 3 або 5 хвилин. Дані, зафіксовані реєстраторами якості електроенергії, застосовуються з метою використання як доказової бази під час вирішення конфліктних питань з енергопостачальною організацією; з метою коригування рахунків оплати електроенергії; для виявлення винуватця погіршення якості електроенергії.

5. Величина коефіцієнта потужності та коефіцієнта реактивної потужності.

6. Стан (увімкнено, вимкнено) високовольтного вимикача напругою 6÷110 кВ. Інтеграція автоматизованих систем управління електроспоживанням та автоматизованих систем диспетчерського управління допоможе оперативному персоналу краще вести спостереження за станом СЕС.

7. Наявність навантаження на приєднанні, де встановлені прилади обліку.

9. Час роботи (пробігу) основного електрообладнання (силових трансформаторів, електродвигунів напругою 10 (6) кВ). Це дозволить визначити момент виведення в ремонт електродвигунів, силових трансформаторів; розрахувати з більшою точністю втрати енергії у силових трансформаторах.

Зараз на виробництвах «вручну» ведуть журнали пробігу устаткування, якими визначається час роботи електродвигунів. Якщо на приєднанні електродвигуна або силового трансформатора встановлено електронний лічильник, що передає дані електроспоживання в автоматизовану систему управління електроспоживанням, то цю функцію із більшою точністю може виконувати система обліку [15] до того ж без використання ручної праці.

Висновки.

1. Розглянуто питання перевірки каналів обліку електроенергії з трансформаторним включенням лічильника, правильності включення лічильників електроенергії на діючих приєднаннях із постійним та змінним навантаженням.

2. Запропоновано напрями ефективності роботи автоматизованих систем комерційного та технічного обліку електроенергії.

3. Розроблено правила формування скелетної схеми споживання електроенергії структурними підрозділами промислового підприємства.

4. Розглянуто питання верифікації та валідації даних обліку.

Список літератури

1. Самойленко І. О., Гриб О. Г., Запорожець А. О. та ін. *Енергетичний менеджмент та енергоефективність: Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 348 с.

2. Сокол Є. І., Сендерович Г. А., Гриб О. Г. та ін. *Автоматика протипаварійного управління електроенергетичних систем: Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 216 с.
3. Бедерак Я. С. Применение метода экспоненциального сглаживания для восстановления утерянных данных технического учета на промышленных предприятиях. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2014. № 4. С. 61–64. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.12.
4. Буйний Р. О., Зорін В. В., Козирський В. В. Використання інформації від АСКОЕ та нейронних мереж для розрахунку недовідпуску електричної енергії споживачам. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2009. № 2. С. 82–86. doi: 10.20535/1813-5420.2.2009.181008.
5. Железко Ю. С. *Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях*. Москва: НЦ ЭНАС, 2002. 280 с.
6. ГНД 34.09.203-2004. *Нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанції 35-750 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ. Інструкція. Галузевий нормативний документ*. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», 2004. 38 с.
7. Находов В. Ф., Бориченко О. В., Тишко О. В. Удосконалення діючої системи нормалізації енергоспоживання на основі контролю і планування витрат електричної енергії. *«Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро: інформ. зб.*. 2010. № 3. С. 51–58.
8. Сокол Е. И. и др. *Кибербезопасность и качество электрической энергии в системах электроснабжения медицинских объектов*. Харьков: ФОП Панов О. М., 2019. 259 с.
9. Прокопенко В. В., Коцар О. В., Расько Ю. О., Павлова Ю. С. Повнофункціональний інструментарій для реалізації перманентного енергетичного аудиту. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 2. С. 85–92. doi: 10.20535/1813-5420.2.2014.132726.
10. *Інструкція про порядок комерційного обліку електричної енергії, затверджена Радою Оптового ринку електричної енергії України, протокол №12 від 08 жовтня 1998 р. Додаток 10 до Договору між членами Оптового ринку електричної енергії України*. Київ: НКРЕ, 2015.
11. Праховник А. В., Тесик Ю. Ф., Жаркін А. Ф., Новський В. О., Гриб О. Г. та ін. *Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії*. Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. 516 с.
12. Коменда Н. В., Коменда Т. І., Демов О. Д. Пошук споживачів-регуляторів на основі морфометричного підходу при управлінні добовим навантаженням промислового підприємства. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр.*. 2010. Вип. 27. С. 22–26.
13. Волошко А. В., Бедерак Я. С. Система моніторингу режимів електроспоживання промислового підприємства. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 4. С. 50–58. doi: 10.20535/1813-5420.4.2014.121349.
14. *ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, IDT)*. Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 56 с.
15. Бедерак Я. С. Про верифікацію вимірювальної інформації в автоматизованих системах технічного обліку електроенергії. *Енергетика та електрифікація*. 2014. № 11. С. 34–35.

References (transliterated)

1. Samoylenko I. O., Gryb O. H., Zaporozhets' A. O. et al. *Enerhetychny menedzhment ta enerhoefektyvnist': Pidruchnyk dlya studentiv zi spetsial'nosti elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika* [Energy management and energy efficiency: textbook for students in electricity, electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv, FOP Brovin O. V. Publ., 2020. 348 p.
2. Sokol Ye. I., Senderovych H. A., Gryb O. H. et al. *Avtomatyka protyavariynoho upravlinnya elektroenerhetychnykh system: Pidruchnyk dlya studentiv zi spetsial'nosti elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika* [Automation of emergency control of electric power systems: Textbook for students in electricity,

- electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv, FOP Brovin O. V. Publ., 2020. 216 p.
3. Bederak Ya. S. Primenenie metoda eksponentsial'nogo sglazhivaniya dlya vosstanovleniya uteryannykh dannykh tekhnicheskogo ucheta na promyshlennyykh predpriyatiyakh [An exponential smoothing method application to restoring lost data on electric power technical record-keeping in industrial enterprises]. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2014, no. 4, pp. 61–64. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.12.
 4. Buinyi R. O., Zorin V. V., Kozyrskiy V. V. Vykorystannya informatsiyi vid ASKOE ta neyronnykh merezh dlya rozrakhunku nedovidpusku elektrychnoyi enerhiyi spozhyvacham [Use of information from the automated system of commercial electricity accounting and neural networks for calculation electricity discharge consumers]. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2009, no. 2, pp. 82–86. doi: 10.20535/1813-5420.2.2009.181008.
 5. Zhelezko Yu. S. *Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Calculation, analysis and rationing of electricity losses in electricity networks]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2002. 280 p.
 6. HND 34.09.203-2004. *Normuvannya vytrat elektroenerhiyi na vlasni potreby pidstantsiy 35-750 kV i rozpodil'chyykh punktiv 6-10 kV. Instruksiya. Haluzevyyi normatyvnyy dokument* [Industry Document 34.09.203-2004. Electricity consumption rationing for own needs of 35-750 kV substations and 6-10 kV distribution points. Instruction. Industry normative document]. Kyiv, OEP «HRIFRE» Publ., 2004. 38 p.
 7. Nakhodov V. F., Borychenko O. V., Tyshko O. V. Udoskonalennya diyuchoyi systemy normalizatsiyi enerhospozhyvannya na osnovi kontrolyu i planuvannya vytrat elektrychnoyi enerhiyi [Improvement of the current energy normalisation system based on monitoring and planning of electricity consumption]. *Industrial Electricity and Electrical Engineering*. *Promelectro: information bulletin*. 2010, no. 3, pp. 51–58.
 8. Sokol E. I. et al. *Kiberbezopasnost' i kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya meditsynskikh ob'ektov* [Cybersecurity and power quality in health care electricity supply systems]. Kharkiv, FOP Panov O. M. Publ., 2019. 259 p.
 9. Prokopenko V. V., Kotsar O. V., Rasko Yu. O., Pavlova Yu. S. Povnofunktsional'nyy instrumentariy dlya realizatsiyi permanentnoho Enerhetychnoho audytu [Full functional tool for permanent energy audit implementation]. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2014, no. 2, pp. 85–92. doi: 10.20535/1813-5420.2.2014.132726.
 10. *Instruktsiya pro porядok komertsynoho obliku elektrychnoyi enerhiyi, zatverdzhena Radoyu Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy, protokol # 12 vid 08 zhovtnya 1998 r. Dodatok 10 do Dohovoru mizh chlenamy Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy* [Instruction on the Procedure for Commercial Metering of Electricity, approved by the Council of the Wholesale Electricity Market of Ukraine, Minutes No. 12 of 08 October 1998 Annex 10 to the Agreement between Members of the Wholesale Electricity Market of Ukraine]. Kyiv, NERC Publ., 2015.
 11. Prakhovnyk A. V., Tesyk Yu. F., Zharkin A. F., Novskyy V. O., Gryb O. H. ta in. *Avtomatyzovani systemy obliku ta yakosti elektrychnoyi enerhiyi* [Automated electricity metering and quality systems]. Kharkiv, PP «Ranok-NT» Publ., 2012. 516 p.
 12. Komenda N. V., Komenda T. I., Demov O. D. Poshuk spozhyvachiv-rehulyatoriv na osnovi morfometrychnoho pidkhotu pry upravlinni dobovym navantazhenniam promyslovoho pidpryyemstva [Finding consumer regulators based on a morphometric approach in daily load management of an industrial plant]. *The Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2010, no. 27, pp. 22–26.
 13. Voloshko A. V., Bederak Ya. S. Systema monitorynhu rezhymiv elektrospozhyvannya promyslovoho pidpryyemstva [Monitoring system mode power consumption industrial enterprises]. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2014, no. 4, pp. 50–58. doi: 10.20535/1813-5420.4.2014.121349.
 14. *DSTU IEC 61000-4-30:2010. Elektromahnitna sumisnist'. Chastyna 4-30. Metody vyprobuvannya ta vymiryuvannya. Vymiryuvannya pokaznykiv yakosti elektrychnoyi enerhiyi (IEC 61000-4-30:2008, IDT)* [State Standard IEC 61000-4-30:2010. Electromagnetic comparability. Part 4-30. Test and measurement methods. Measurement of electrical energy quality parameters]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 56 p.
 15. Bederak Ya. S. Pro veryfikatsiyu vymiryuval'noyi informatsiyi v avtomatyzovanykh systemakh tekhnichnoho obliku elektroenerhiyi [On verification of metering information in automated electricity metering systems]. *Energy and electrification*. 2014, no. 11, pp. 34–35.

Надійшла (received) 23.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гарон Дмитро Анатолійович (Гарон Дмитрий Анатольевич, Dmytro Garon) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>. e-mail: dima12345go@gmail.com.

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Oleg Gryb) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>. e-mail: oleg47gryb@gmail.com.

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Igor Karpaliuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>. e-mail: humpway@gmail.com.

Рудевич Наталія Валентинівна (Рудевич Наталья Валентиновна, Natalia Rudevich) – доктор педагогічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>. e-mail: n.rudevich@ukr.net.

М. В. ГРИНИШИНА

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ З ТЕРМОПЛАСТИЧНОЮ ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Проблема високовольтних силових кабелів пов'язана зі складними технологічними процесами при їх виготовленні. Одним із головних процесів при виготовленні кабелів є екструзія. Існує величезна кількість параметрів (відомих як параметри процесу) на стадії процесу екструзії, які безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики ізоляції та кабелю в цілому. Показано, що для процесу екструзії важливими параметрами процесу є температура розплаву, швидкість, тиск, швидкість шнека, тип використовуваної матриці та середовище, яке охолоджує, в екструдері. Температура та тиск розплаву є одними з найбільших важливих параметрів в процесі екструзії, які визначають продуктивність процесу. Проаналізовано вплив температури, тиску та коливання цих параметрів на комплекс механічних та електричних характеристик кабелю. Обґрунтовано, що реологічні властивості полімерів схильні до коливань, що викликає проблеми у виробництві кабелів. Складність і велика кількість параметрів процесу, задіяних у виробництві кабелів, ускладнюють процес контролю, що обумовлює появу дефектів у вигляді тріщин, повітряних порожнин і пористості у високовольтній ізоляції. Аргументовано, що застосування силових кабелів з ізоляцією на основі зшитого поліетилену, який є термореактивним ізоляційним матеріалом, обумовлює складність перероблення як на стадії виготовлення, так і в експлуатації. Розвиток технології впровадження термопластичної ізоляції забезпечує вторинну переробку для реалізації проектів силових високовольтних кабелів змінного та постійного струму. Представлено порівняльний аналіз електричних, механічних та теплових параметрів зшитого поліетилену та термопластичних полімерів в якості альтернативи термореактивної ізоляції. В статті наводяться особливості технологічного режиму екструзії полімерної ізоляції на основі термоеластопластів, зокрема, композицій поліпропілену, що обумовлено меншими значеннями коефіцієнту теплопровідності таких композицій в порівнянні з поліетиленом. Представлено моделі для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської, нестисливої, ізотермічної рідини. Обґрунтовано необхідність визначення значень коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності композицій на основі поліпропілену в широкому діапазоні температури для зменшення вірогідності технологічних дефектів у високовольтній термопластичній ізоляції.

Ключові слова: полімерна ізоляція, екструзія, параметри технологічного процесу, поліпропілен, ефективна в'язкість, коефіцієнт теплопровідності, кросс-логарифмічна модель.

М. В. ГРИНИШИНА

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ С ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Проблема високовольтних силових кабелів пов'язана з складними технологічними процесами при їх виготовленні. Одним з головних процесів при виготовленні кабелів є екструзія. Існує величезна кількість параметрів (відомих як параметри процесу) на стадії процесу екструзії, які безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики ізоляції та кабелю в цілому. Показано, що для процесу екструзії важливими параметрами процесу є температура розплаву, швидкість, тиск, швидкість шнека, тип використовуваної матриці та охолоджуюча середовище в екструдері. Температура та тиск розплаву є одними з найбільш важливих параметрів в процесі екструзії, які визначають продуктивність процесу. Проаналізовано вплив температури, тиску та коливання цих параметрів на комплекс механічних та електричних характеристик кабелю. Обґрунтовано, що реологічні властивості полімерів схильні до коливань, що викликає проблеми у виробництві кабелів. Складність і велика кількість параметрів процесу, задіяних у виробництві кабелів, ускладнюють процес контролю, що обумовлює появу дефектів у вигляді тріщин, повітряних порожнин і пористості в високовольтній ізоляції. Аргументовано, що застосування силових кабелів з ізоляцією на основі зшитого поліетилену, який є термореактивним ізоляційним матеріалом, обумовлює складність перероблення як на стадії виготовлення, так і в експлуатації. Розвиток технології впровадження термопластичної ізоляції забезпечує вторинну переробку для реалізації проектів силових високовольтних кабелів змінного та постійного струму. Представлено порівняльний аналіз електричних, механічних та теплових параметрів зшитого поліетилену та термопластичних полімерів в якості альтернативи термореактивної ізоляції. В статті наводяться особливості технологічного режиму екструзії полімерної ізоляції на основі термоеластопластів, зокрема, композицій поліпропілену, що обумовлено меншими значеннями коефіцієнта теплопровідності таких композицій по порівнянню з поліетиленом. Представлено моделі для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської, нестисливої, ізотермічної рідини. Обґрунтовано необхідність визначення значень коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності композицій на основі поліпропілену в широкому діапазоні температури для зменшення вірогідності технологічних дефектів в термоізоляційній ізоляції.

Ключевые слова: полимерная изоляция, экструзия, параметры технологического процесса, полипропилен, эффективная вязкость, коэффициент теплопроводности, кросс-логарифмическая модель.

М. В. ГРИНИШИНА

FEATURES OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF POWER HIGH VOLTAGE CABLES WITH THERMOPLASTIC POLYMERIC INSULATION

The problem of high-voltage power cables is associated with complex technological processes in their manufacture. One of the main processes in the manufacture of cables is extrusion. There is a huge number of parameters (known as process parameters) at the stage of extrusion process that directly affect the performance of isolation and cable as a whole. It is shown that the important parameters of the process of extrusion are the melt temperature, speed, pressure, screw speed, the type of matrix used and the cooling medium in the extruder. The temperature and pressure of the melt are among the largest important parameters in the process of extrusion that determine the productivity of the process. The influence of temperature, pressure and fluctuations of these parameters on a complex of mechanical and electrical characteristics of the cable are analyzed. It is substantiated that the rheological

© М. В. Гринишина, 2021

properties of polymers are prone to oscillations, which causes problems in the production of cables. The complexity and large number of process parameters involved in the production of cables are complicated by the process of control, which determines the appearance of defects in the form of cracks, air cavities and porosity in high-voltage isolation. It is argued that the use of power cables with a cross-linked polyethylene, which is a thermosetting insulating material, causes the complexity of processing both in the manufacturing stage and in operation. Development of technology for the introduction of thermoplastic isolation provides secondary processing to implement projects of power-high-voltage variable and direct current cables. A comparative analysis of electrical, mechanical and thermal parameters of cross-linked polyethylene and thermoplastic polymers as an alternative of thermosetting isolation is presented. The article presents the features of the technological regime of extrusion of polymer isolation based on thermoelastoplasts, in particular, polypropylene compositions, which are due to the lower values of the coefficient of thermal conductivity of such compositions in comparison with polyethylene. Models are presented to describe the process of extrusion of thermoplastic isolation of power cables, taking into account the flow of molten polymeric material as a non-Newtonian, uncompressive, isothermal fluid. The necessity of determining the values of the coefficients of thermal conductivity and heat capacity of polypropylene compositions in a wide temperature range to reduce the likelihood of technological defects in high-voltage thermoplastic isolation is substantiated.

Keywords: polymer insulation, extrusion, process parameters, polypropylene, effective viscosity, thermal conductivity, cross-logarithmic model.

Постановка проблеми. Електроізоляційні матеріали, як-от зшитий поліетилен (сілано- або пероксидозшитий), вже кілька десятиліть домінують на ринку ізоляційних матеріалів для силових кабелів в наземних мережах змінного та постійного струму високої напруги. Зшитий поліетилен залишається кращим матеріалом для виготовлення екструдованих високовольтних кабелів з високими термомеханічними і електричними властивостями. Однак його нелегко переробляти, що висуває екологічні проблеми при експлуатації силових кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією [1–3].

Альтернативою зшитій поліетиленовій ізоляції силових кабелів є застосування кабельних композицій на основі термопластичних високопродуктивних термопластичних полімерів, в тому числі на основі поліпропілену [1–3]. Кабелі з термопластичною ізоляцією мають додаткові переваги. По-перше, тривалість технологічного процесу суттєво скорочується завдяки відсутності стадій вулканізації ізоляції та дегазації кабелю. По-друге, застосування високої чистоти ізоляційних матеріалів забезпечує застосування більш тонких фільтрів для розплаву полімеру на технологічній стадії екструзії, що зменшує вірогідність утворення дефектів в товщі полімерної ізоляції на етапі передчасного розкладання хімічних сполук-ініціаторів зшивання (рис. 1) [4].

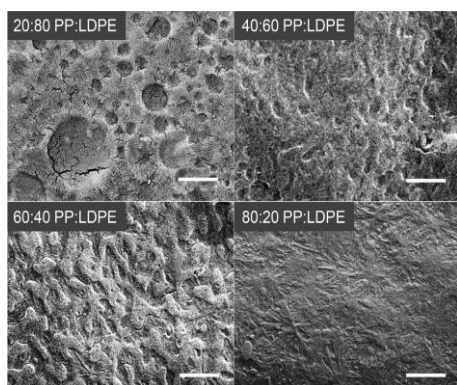


Рисунок 1 – Мікрофотографії криофрактурованих та витравлених зразків термопластичної ізоляції в залежності від масової долі поліпропілену (PP) та поліетилену низької щільності (LDPE) (масштаб: смуга відповідає 2 мкм) [4]

Аналіз публікацій. Величезна кількість параметрів процесу на стадії екструзії безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики ізоляції та

кабелю в цілому. Так, гідродинамічні та хімічні явища пов'язані, принаймні, із залежністю транспортних реологічних властивостей (в'язкості, коефіцієнту дифузії, коефіцієнту теплопровідності, тощо) розплаву полімеру як функція температури, тиску, швидкості обертання шнеку, типу формуючого інструменту та середовища, що охолоджує, і складу самого матеріалу.

Як правило, потік розплаву полімеру є ламінарним, але його важко моделювати через його тривимірність і нестационарність характеру. Крім того, розплавлені полімери не є ньютонівськими і їх властивості можуть змінюватися вздовж екструдера (просторові та тимчасові змінення) внаслідок процесу змішування та/або змінню хімічної реакції. Крім того, дифузійний процес також необхідно враховувати, оскільки він може стати важливим обмежуючим кроком на молекулярному рівні в масштабах змішування. Нарешті, необхідно враховувати теплопередачу через в'язку дисипацію та хімічні реакції в розплавленому полімері.

Більшість моделей процесу екструзії мають спрощене моделювання, нехтуючи деякими параметрами.

В даний час застосування математичних підходів для прогнозування розвитку тиску та продуктивності екструдерів є недостатніми. Більшість існуючих моделей розглядають гранули полімеру як однорідну компактную масу з насипною густиною, яка вважається відомою. Застосування методу дискретних елементів (DEM) з використанням програмного забезпечення з відкритим кодом LIGGGHTS® в поєднанні з пакетом обчислювальної гідродинаміки OpenFOAM® дозволяє включити зону плавлення при моделюванні [5].

Так, процес екструзії у зоні змішування оптимізовано завдяки включенню стінки-ковзання на поверхнях циліндру та гвинта [5]. Для моделювання використовується програмне забезпечення CFD для кінцевих елементів, розроблене ANSYS [5].

При чисельному аналізі потоку полімерів у обертаних шнеках вважається, що матеріал є рідким при виході із зони живлення (подачі) [6]. З іншого боку, експериментально доведено, що на матеріал впливають такі фактори, як швидкість подачі, швидкість шнека та швидкість зсуву, що вказує на те, що плавлення є поступовим процесом. Так, проведені експерименти [6, 7] показують, що плавлення починається раніше, коли швидкість подачі

збільшується через більш швидке формування пластифікованої маси.

В роботі [7] досліджено тривимірне математичне моделювання гідродинаміки течії полімерних розплавів у зоні дозування одношнекового екструдера. Деякі результати тривимірного моделювання тепломасообміну при ламінарному потоці для поліетилену низької щільності в одношнековому екструдері на підставі моделі Карро-Ясуда представлено в [8], яка включає п'ять параметрів для опису реологічної поведінки розплаву полімеру.

Встановлено вплив геометрії шнека в діапазоні співвідношення довжина/ діаметр (L/D) від 1 до 3 на структуру потоку та перепад тиску при швидкості обертання до 60 об/хв [9].

У [10] зазначається, що в даний час важко отримати точне аналітичне рішення навіть для спрощеної математичної моделі процесу екструзії (одновимірний неньютонівський потік). Аналітичні розв'язки задачі про ізотермічну течію неньютонівської рідини в каналі для одношnekових екструдерів, які відрізняються за способом вирішення системи диференціального рівняння, наведено в [10].

Напіваналітичним розв'язанням подібної задачі присвячено декілька робіт, де реологічна поведінка полімеру описується степеневим законом, зокрема, в [11].

Залежність в'язкості полімеру від швидкості зсуву визначається диференціальними рівняннями в частинних похідних, тобто є нелінійними, що вимагає використання чисельних методів: метод скінченних об'ємів (FVM) та метод скінченних елементів (FEM) [12].

Мета статті. Аналіз моделей для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської рідини з обґрунтуванням необхідності визначення значень коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності композицій на основі поліпропілену в широкому діапазоні температури для зменшення вірогідності технологічних дефектів у високовольтній термопластичній ізоляції силових кабелів.

Екструзія полімерів. Характеристики довговічності кабелів забезпечуються завдяки налаштованого процесу екструзії та адаптованого до властивостей полімерних матеріалів екструдерів. Вибір гвинта та його конструкція, а також співвідношення L/D дозволяють ефективно переробляти різні полімерні матеріали для ізоляції силових кабелів з високою продуктивністю та якістю.

При цьому вибір формуючих інструментів (дорна та матриці) також впливає на якість кабелю. Часто дефекти ізоляції виникають власне внаслідок використання інструментів. З правильною системою керування та системами комп'ютерного контролю важливо встановити правильні параметри обробки залежно від використовуваної суміші полімерів.

З огляду на вимоги високої швидкості, спеціальних застосувань і високовольтних кабельних

ліній, параметри процесу повинні контролюватися з найвищим ступенем точності. Ключові фактори, що впливають на продуктивність кабелів, пов'язані, насамперед, з параметрами процесу.

Перша машина для екструзії термопластичних матеріалів була побудована приблизно в 1935 році Паулем Троестером у Німеччині. До цього часу екструдери в основному використовувалися для екструзії гуми. Шнекові екструдери поділяються на одношnekові та багатшnekові. Одношnekовий екструдер є найважливішим типом екструдера, який використовується в кабельній промисловості. Його ключовими перевагами є відносно низька вартість, проста конструкція, міцність, надійність і сприятливе співвідношення продуктивність/вартість.

Теоретично процес матеріального потоку в екструдері можна розділити на чотири частини: подача в екструдер, транспортування маси, потік через матрицю і вихід із матриці з подальшою обробкою. Під час обробки матеріалу маса трансформується в основному силами зсуву, тиском, швидкістю охолодження, формуванням та часом перебування [13]. Подача полімерного матеріалу, як правило в гранулах, на формуючий інструмент здійснюється за допомогою шнека (гвинта Архімеда) (рис.2). Умовно екструзійний канал ділиться на три частини (рис. 2): зона подачі (1, живлення), перехідна зона (2, плавлення) і зона дозування (3). У зоні подачі матеріал під впливом температури і тиску розм'якшується і набуває пластичної форми. Матеріал нагрівається в цій зоні шляхом зовнішнього нагрівання. Рівень нагрівання залежить від типу сировини, а точніше від температури плавлення полімеру. Так, для нагрівання циліндра використовують кільцеві нагрівачі. Але близько 80 % тепла, необхідного для плавлення або розплавлення маси, подається за рахунок тепла, що виділяється завдяки тертю між гвинтом і циліндром, що призводить до зсуву прошарків полімеру. Решта тепла – від зовнішніх джерел [13].

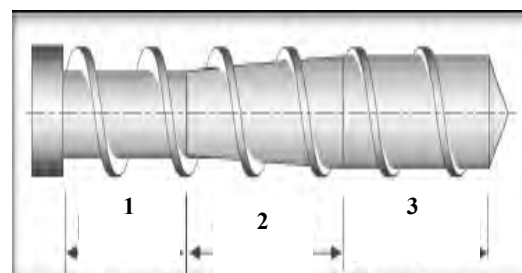


Рисунок 2 – Зони екструзійного каналу [13]

Пластифікований матеріал транспортується вперед в зону змішування – перехідну зону і, нарешті, зону дозування.

Час обробки матеріалу в екструдері, тобто час розподілу, є важливим параметром якості продукції. Шнек може мати різну довжину в залежності від матеріалу, що переробляється (рис. 2). По мірі просування по спіралі гвинта полімер прогрівається до потрібної температури і гомогенізується, з нього видаляються гази.

Основними параметрами процесу є тиск, температура, час перебування та коефіцієнт стиснення. Так, коефіцієнт стиснення (співвідношення площі в зоні дозування та зоні подачі) для зшитого поліетилену становить 3:1, а для гуми та безгалогенних матеріалів з низьким димоутворенням – 1:11. Характерним параметром для екструдера є також відношення L/D шнека. У США, стандартні розміри екструдера: 3/4, 1, 1-1/2, 2, 2-1/2, 3-1/2, 4-1/2, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 і 24 дюйми.

У Європі стандартними розмірами екструдера є 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 і 600 міліметрів. Більшість екструдерів представлені в розмірі від 1 до 6 дюймів або від 25 до 150 мм. У шнеку великих розмірів (80 мм, 120 мм) є спеціальний канал для циркуляції води, що служить для охолодження (термостатування). Це робиться для того, щоб уникнути перегріву розплаву через великі напруження зсуву.

Типове співвідношення L/D коливається від 20 до 30, причому 24 є найбільш поширеним.

Використовуються екструдери для вилучення легких речовин (екструдери з вентиляцією) із співвідношенням L/D до 35 або 40, а іноді навіть вище.

Типове співвідношення між L шнека та його D для зшитого поліетилену та полівілхлоридного пластикату становить 24:1, для гуми – 15:1.

Неньютонівські рідини. Моделі для визначення ефективної в'язкості розплавів полімерів. У процесі екструдювання полімерні матеріали зазнають низки змін: із твердого стану в рідкий. Переміщення шарів розплавленого (рідкого) полімеру один щодо одного зі швидкістю V відбувається під дією сил внутрішнього тертя. Сила внутрішнього тертя $F_{тр}$ пропорційна градієнту швидкості [13, 14]:

$$F_{тр} = -\eta \frac{dV}{dz} S, \quad (1)$$

$$\sigma_{\tau} = -\eta^* \cdot \dot{G}, \quad (2)$$

де $\sigma_{\tau} = \frac{F_{тр}}{S}$ – дотична напружка,

$\dot{G} = \frac{dV}{dz} = \frac{dy}{dt}$ – швидкість зсуву шарів,

η^* – коефіцієнт пропорційності, що залежить від в'язкості.

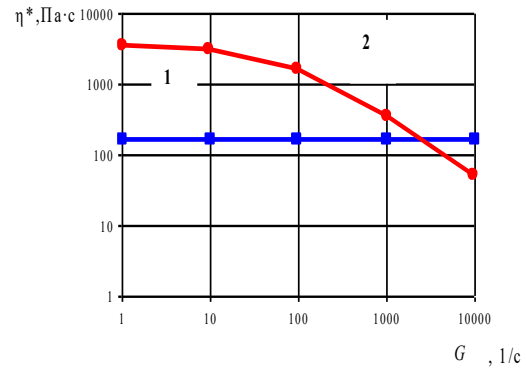
Для ньютонівських низькомолекулярних рідин σ_{τ} прямо пропорційна швидкості зсуву G , а η^* є динамічною в'язкістю та залежить лише від температури T і не залежить від умов перебігу рідини (рис. 3 а, крива1) [14]:

$$\eta = \eta_0 e^{E_a/kT}, \quad (3)$$

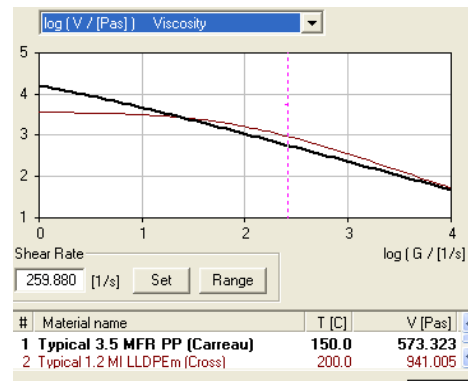
де E_a – енергія активації процесу перескоку молекул у нове положення під дією дотичних напружок у рідині,
 k – постійна Больцмана.

Розплави полімерів відносяться до неньютонівських високомолекулярних рідин, для яких

характерне прискорене зростання швидкості зсуву при певних напружках зсуву $\sigma_{кр}$, обумовленого руйнуванням міжмолекулярних зв'язків та орієнтацією макромолекул у напрямку течії. У цьому випадку в (2) коефіцієнт пропорційності η^* – ефективна в'язкість, яка залежить від умов течії розплаву (рис. 3 а, крива 2, рис. 3 б) та температури.



а



б

Рисунок 3 – Розрахункові залежності ефективної в'язкості неньютонівської високомолекулярної рідини для лінійного поліетилену низької щільності (PE) при температурі 200 °C від швидкості зсуву (а); поліпропілену (PP) та PE (б)

Як доводять результати експериментальної перевірки впливу швидкості обертання шнеку на неізотермічну поведінку потоку розплавів полімерів в зоні вимірювання [8] в діапазоні швидкості шнека від 25 об/хв до 200 об/хв, процес екструзії можна вважати ізотермічним для поліпропілену та поліетилену низької густини. Неізотермічна поведінка спостерігається у випадку поліетилену високої густини завдяки високій молекулярній ваги: матеріал демонструє виражене в'язке нагрівання при великих обертах шнека.

Значення η^* визначають експериментально за даними полімерної віскозиметрії [16] та на підставі розрахунків за умови визначених теплових властивостей полімерів (табл. 1) [14, 15].

При дослідженні процесів течії розплаву полімерів в екструдері найбільше розповсюдження отримали експоненційна модель (модель Карр'є), степенева та кросс-логарифмічна [13, 14].

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалу ізоляції

Матеріал	Щільність ρ , кг/м ³		Теплоємність C , Дж/кг·°C		Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/м·°C		Температура плавлення T , °C
	Твердого	Розплаву	Твердого	Розплаву	Твердого	Розплаву	
Поліетилен низької щільності	920	750	2300	2300	0,28	0,24	110
Поліетилен високої щільності	954	770	2500	2250	0,4	0,25	133
Поліпропілен	907	735	1700	2100	0,22	0,22	163

Так, відповідно до кросс- та логарифмічно-експоненційної моделі ефективна в'язкість визначається на підставі:

$$\eta^* = \frac{Af(T)}{1 + [rf(T)\dot{G}]^{1-n}} \quad (4)$$

$$\ln(\eta^*) = a_1 + a_2 \ln(\dot{G}) + a_3 \ln^2(\dot{G}) + a_4(T - T_r) + a_4(T - T_r)^2 + a_4(T - T_r) \ln(\dot{G}), \quad (5)$$

де A , n , r , a – постійні моделі,
 T_r – температура розплаву,
 $f(T)$ – температурна функція, яка визначається із залежності

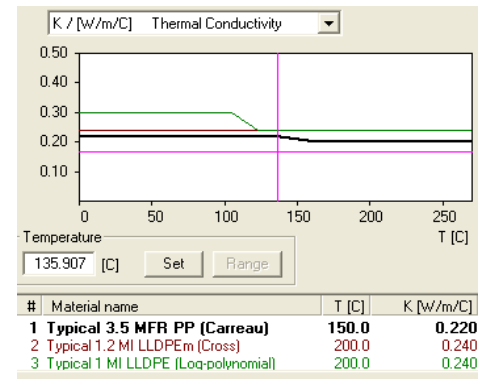
$$f(T) = e^{-b(T-T_r)}, \quad (6)$$

де b – постійна, яка визначається з рівняння Арреніуса:

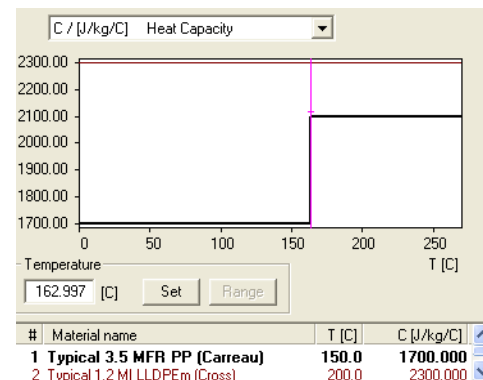
$$b = \frac{A}{(T_r + 273,15)^2}$$

На рис. 4 представлені чисельні розрахунки коефіцієнту теплопровідності (рис. 4 а) та коефіцієнту теплоємності (рис. 4 б) для поліпропілену на підставі моделі Карр'є, лінійного поліетилену низької густини на підставі кросс- та логарифмічно-експоненційної моделі в широкому діапазоні температури. При температурі 150 °C коефіцієнт теплопровідності становить 0,22 Вт/м·К. При температурі 170 °C спостерігається фазовий перехід, обумовлений плавленням поліпропілену, що призводить до

зростання коефіцієнту теплоємності з 1700 до 2100 Дж/кг·К. В той же час, напруга зсуву S для розплавів поліпропілену та лінійного поліетилену низької густини несуттєво відрізняється при змінній швидкості зсуву G шарів в діапазоні від 10 до 10⁴ 1/с (рис. 5).



а



б

Рисунок 4 – Порівняльний аналіз розрахункових значень коефіцієнтів теплопровідності (а) та теплоємності (б) кабельних композицій на основі поліпропілену та поліетилену

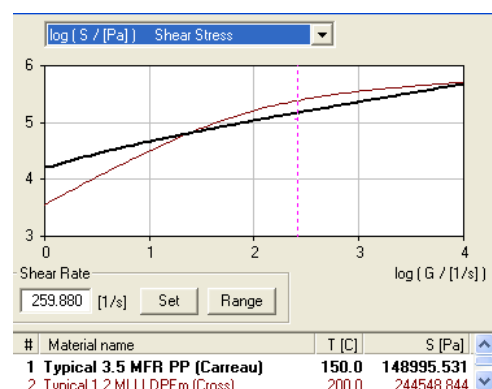


Рисунок 5 – Лістинг порівняльного аналізу розрахункових значень напруги зсуву в залежності від швидкості зсуву поліпропілену та поліетилену

Менші значення коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності обумовлюють, по-перше, більшого часу знаходження розплаву полімеру в зоні подачі та зоні плавлення для досягнення гомогенізації, а, по-друге, більший вірогідності окиснення полімеру (рис. 6), і, по-

третє, більший тепловий опір ізоляції кабелю за однакової товщини з поліетиленовою (табл. 1, рис. 4).

Інтенсивна смуга поглинання при значенні хвильового числа 1720 1/см обумовлена валентними коливаннями карбонільної групи >C=O, що утворилася в результаті окиснення поліетилену в екструдері [16].

Наявність метильної групи (CH₃) в структурі поліпропілену [-CH₂-CH(CH₃)-]_n забезпечує високі електричні, механічні та теплові характеристики. Ізотактичний поліпропілен (іPP), який має високу температуру плавлення 160 °С, але є занадто жорстким, і, як наслідок, нижчу електричну міцність, ніж у зшитого поліетилену. Цей факт унеможливило безпосереднє застосування ізотактичного поліпропілену в системі ізоляції високовольтних кабелів. На рис. 7 наведені результати моделювання в'язкості при подовженні поліпропілену та поліетилену, що опосередковано підтверджує більшу жорсткість поліпропілену.

АНАЛІЗ ПЗ ПО ИК-СПЕКТРАМ

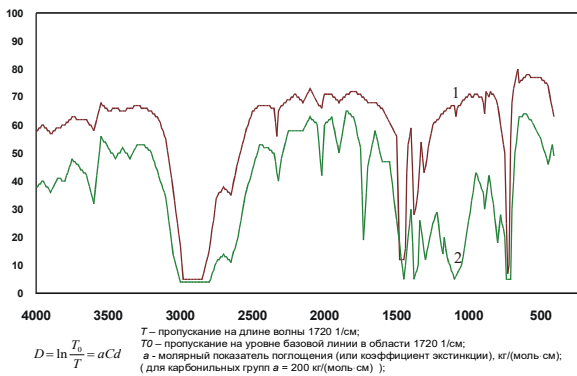


Рисунок 6 – інфрачервоні спектри поліетилену до (крива 1) та після (крива 2) екструзії [16]

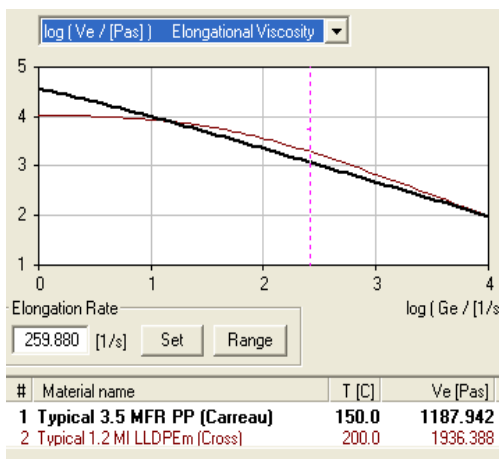


Рисунок 7 – Лістинг результатів чисельного моделювання в'язкості при подовженні кабельних композицій на основі поліпропілену та поліетилену

Змішування ізотактичного поліпропілену (іPP) з поліетиленом низької густини забезпечує компроміс між механічними та електричними характеристиками (рис. 8), що уможливило застосування таких термопластичних композицій для ізоляції високовольтних кабелів.

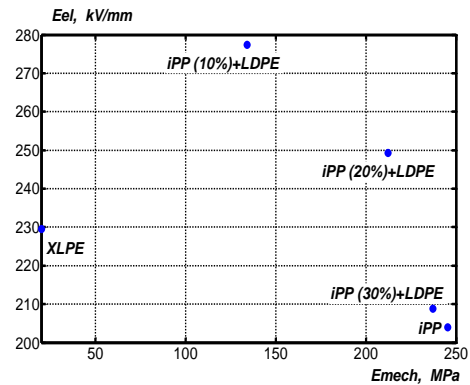


Рисунок 8 – Кореляційна залежність між модулем пружності та електричної міцності в залежності від вмісту поліетилену низької густини композицій на основі ізотактичного поліпропілену

Висновки. Виконано аналіз сучасних математичних підходів для опису процесу екструзії, який визначає експлуатаційні характеристики ізоляції та силових високовольтних кабелів.

Дослідження процесів течії в каналах екструдерів відіграють суттєву роль щодо вибору та обґрунтуванню раціонального технологічного обладнання та потребують визначення реологічних властивостей сучасних термопластичних полімерних матеріалів на основі поліпропілену.

Представлено моделі для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської рідини.

Виконані чисельні розрахунки доводять, що коефіцієнт теплопровідності поліпропілену має менші значення в порівнянні з лінійним поліетиленом низької густини, при цьому спостерігається суттєве його зміння в широкому діапазоні температури.

Список літератури

- Huang X., Zhang J., Jiang P., Tanaka T. Material progress toward recyclable insulation of power cables part 2: Polypropylene-based thermoplastic materials. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020. Vol. 36, no. 1. P. 8–18. doi: 10.1109/MEI.2020.8932973.
- Du B. *Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission*. Handbook. Singapore, Springer, 2021. 674 p.
- Mazzanti G., Marzinotto M. *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission*. New Jersey, Wiley, 2013. 384 p.
- Ouyang Y. et al. High-temperature creep resistant ternary blends based on polyethylene and polypropylene for thermoplastic power cable insulation. *Journal of Polymer Science*. 2021. Vol. 59, no. 11. P. 1084–1094. doi: 10.1002/pol.20210147.
- Celik O., Bonten C. Three-dimensional simulation of a single screw extruder's grooved feed section. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1779. P. 050004. doi: 10.1063/1.4965509.
- Lewandowski A., Wilczyński K. J., Nastaj A., Wilczyński K. A composite model for an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder and its experimental verification. *Polymer Engineering & Science*. 2015. Vol. 55, no. 12. P. 2838–2848. doi: 10.1002/pen.24175.
- Kim N., Kim H., Lee J. Numerical analysis of internal flow and mixing performance in polymer extruder I: single screw element. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2006. Vol. 18, no. 3. P. 143–151.
- Marschik C., Roland W., Löw-Baselli B., Miethlinger J. A heuristic method for modeling three-dimensional non-Newtonian flows of polymer melts in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 248. P. 27–39. doi: 10.1016/j.jnnfm.2017.08.007.

9. Kadyirov A., Gataullin R., Karaeva J. Numerical Simulation of Polymer Solutions in a Single-Screw Extruder. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 24. P. 5423. doi: 10.3390/app9245423.
10. Bessonova M., Ponomareva M., Yakutenok V. Numerical solution of polymer melt flow problem in a single screw extruder. *Himičeskaâ fizika i mezoskopîâ*. 2019. Vol. 21, no. 2. P. 198–217. doi: 10.15350/17270529.2019.2.22.
11. Krueger H. Extruder for non-Newtonian melt analysis and performance prediction. *Plastics*. 1963. No. 53. P. 711–722.
12. Rauwendaal C. Finite element studies of flow and temperature evolution in single screw extruders. *Plastics, Rubber and Composites*. 2004. Vol. 33, no. 9–10. P. 390–396. doi: 10.1179/174328904x24880.
13. Rauwendaal C. *Polymer Extrusion*. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. 925 p.
14. Беспрозванных А. В., Морозов И. А. Эффективная вязкость полимерных материалов оптического модуля. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2005. № 42. С. 55–58.
15. Rao N. S., Schott N. R. *Understanding plastics engineering calculations*. Munich, Hanser, 2012. 196 p.
16. Набока Б. Г., Беспрозванных А. В., Гладченко В. Я. *Физические основы измерений вязкости жидких диэлектриков и показателей текучести расплавов полимеров. Учебно-методическое пособие для студентов специализации «Электроизоляционная и кабельная техника»*. Харьков: «ХДПУ», 2000. 71 с.
17. Беспрозванных А. В., Васильева О. В., Гладченко В. Я., Набока Б. Г. Сравнительный анализ экструдированной высоковольтной полиэтиленовой изоляции. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 1999. Вып. 69.
6. Lewandowski A., Wilczyński K. J., Nastaj A., Wilczyński K. A composite model for an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder and its experimental verification. *Polymer Engineering & Science*. 2015, vol. 55, no. 12, pp. 2838–2848. doi: 10.1002/pen.24175.
7. Kim N., Kim H., Lee J. Numerical analysis of internal flow and mixing performance in polymer extruder I: single screw element. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2006, vol. 18, no. 3, pp. 143–151.
8. Marschik C., Roland W., Löw-Baselli B., Miethlinger J. A heuristic method for modeling three-dimensional non-Newtonian flows of polymer melts in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2017, vol. 248, pp. 27–39. doi: 10.1016/j.jnnfm.2017.08.007.
9. Kadyirov A., Gataullin R., Karaeva J. Numerical Simulation of Polymer Solutions in a Single-Screw Extruder. *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, no. 24, pp. 5423. doi: 10.3390/app9245423.
10. Bessonova M., Ponomareva M., Yakutenok V. Numerical solution of polymer melt flow problem in a single screw extruder. *Himičeskaâ fizika i mezoskopîâ*. 2019. Vol. 21, no. 2, pp. 198–217. doi: 10.15350/17270529.2019.2.22.
11. Krueger H. Extruder for non-Newtonian melt analysis and performance prediction. *Plastics*. 1963, no. 53, pp. 711–722.
12. Rauwendaal C. Finite element studies of flow and temperature evolution in single screw extruders. *Plastics, Rubber and Composites*. 2004, vol. 33, no. 9–10, pp. 390–396. doi: 10.1179/174328904x24880.
13. Rauwendaal C. *Polymer Extrusion*. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. 925 p.
14. Besprozvannykh A. V., Morozov I. A. Effektivnaya vyazkost' polimernykh materialov opticheskogo modulya [Effective viscosity of polymer materials optical module]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2005, no. 42, pp. 55–58.
15. Rao N. S., Schott N. R. *Understanding plastics engineering calculations*. Munich, Hanser, 2012. 196 p.
16. Naboka B. G., Besprozvannykh A. V., Gladchenko V. Ya. *Fizicheskie osnovy izmereniy vyazkosti zhidkikh dielektrikov i pokazateley tekuchesti rasplavov polimerov. Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsializatsii «Elektroizolyatsionnaya i kabel'naya tekhnika»* [Physical basis for measurements of liquid dielectric viscosity and flow properties of polymer melts. Textbook for students of specialisation «Electrical insulation and cable engineering»]. Kharkiv, «KhDPU» Publ., 2000. 71 p.
17. Besprozvannykh A. V., Vasil'eva O. V., Gladchenko V. Ya., Naboka B. G. Sravnitel'nyy analiz ekstrudirovannoy vysokovol'tnoy polietilenovoy izolyatsii [Comparative analysis of extruded high voltage polyethylene insulation]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 1999, no. 69.

Надійшла (received) 17.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гринишина Маргарита Володимирівна (Гринишина Маргарита Владимировна, Margaryta Volodymyrivna Grynyshyna) – технічний директор ТОВ «Інтеркабель Київ», аспірантка кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: m.grynyshyna@interkabel.ua.

О. М. ДОВГАЛЮК, Р. В. БОНДАРЕНКО, І. С. ЯКОВЕНКО, К. А. МИРОШНИК, В. О. ВИСОКИХ

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З КОМПОЗИТНИМИ ОПОРАМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 35-330 КВ

На основі виконаного аналізу технічного стану обладнання електричних мереж ОЕС України, сучасних викликів щодо розвитку енергетичної галузі та наявних технологій передачі електричної енергії обґрунтована доцільність використання опор з композитних матеріалів при розвитку, реконструкції та проектуванні нових повітряних ліній електропередачі для електричних мереж різного класу напруги. Досліджено особливості експлуатації опор із композитних матеріалів в електричних мережах багатьох країн світу, на основі чого сформульовані перспективи використання таких опор для повітряних ліній електропередачі в Україні в умовах запровадженого лібералізованого ринку електричної енергії, а також вимоги щодо показників роботи електричних мереж із досліджуваними опорами з композитних матеріалів. Виконано аналіз основних характеристик та властивостей композитних матеріалів, які найчастіше використовуються для виготовлення опор в сучасних енергосистемах, а також порівняння фізико-механічних властивостей опор з різних матеріалів. Аналіз одержаних результатів підтверджує певні переваги опор з композитних матеріалів, які сприяють поширенню впровадження таких опор в енергосистему України. Для дослідження впливу типу композитного матеріалу та конструкції опор на показники режимів роботи електричних мереж був виконаний механічний розрахунок опор, який проводився методом граничних станів. З використанням одержаних результатів розроблені математичні моделі повітряних ліній електропередачі з композитними опорами для електричних мереж напругою 35-330 кВ, які враховують технічні характеристики елементів повітряних ліній електропередачі та умови роботи електричних мереж, а також дозволяють виконати прогнозування кількісних показників подальшої експлуатації досліджуваних електричних мереж.

Ключові слова: електрична мережа, повітряна лінія електропередачі, композитна опора, схема розташування проводів, деформація, механічне напруження, межа міцності, граничний стан, прогин.

О. Н. ДОВГАЛЮК, Р. В. БОНДАРЕНКО, И. С. ЯКОВЕНКО, К. А. МИРОШНИК, В. О. ВЫСОКИХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С КОМПОЗИТНЫМИ ОПОРАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-330 КВ

На основе выполненного анализа технического состояния оборудования электрических сетей ОЭС Украины, современных вызовов развития энергетической отрасли и имеющихся технологий передачи электрической энергии обоснована целесообразность использования опор из композитных материалов при развитии, реконструкции и проектировании новых воздушных линий электропередачи для электрических сетей разного класса напряжения. Исследованы особенности эксплуатации опор из композитных материалов в электрических сетях многих стран мира, на основе чего сформулированы перспективы использования таких опор для воздушных линий электропередачи в Украине в условиях введенного либерализованного рынка электрической энергии, а также требования к показателям работы электрических сетей с исследуемыми опорами из композитных материалов. Выполнен анализ основных характеристик и свойств композитных материалов, которые чаще всего используются для изготовления опор в современных энергосистемах, а также сравнение физико-механических свойств опор из различных материалов. Анализ полученных результатов подтверждает определенные преимущества опор из композитных материалов, которые способствуют расширению внедрения таких опор в энергосистему Украины. Для исследования влияния типа композитного материала и конструкции опор на показатели режимов работы электрических сетей был выполнен механический расчет опор, который проводился методом предельных состояний. С использованием полученных результатов разработаны математические модели воздушных линий электропередачи с композитными опорами для электрических сетей напряжением 35-330 кВ, которые учитывают технические характеристики элементов воздушных линий электропередачи и условия работы электрических сетей, а также позволяют выполнить прогнозирование количественных показателей дальнейшей эксплуатации исследуемых электрических сетей.

Ключевые слова: электрическая сеть, воздушная линия электропередачи, композитная опора, схема расположения проводов, деформация, механическое напряжение, предел прочности, предельное состояние, прогиб.

О. М. DOVGALYUK, R. V. BONDARENKO, I. S. YAKOVENKO, K. A. MIROSHNYK, V. O. VYSOKYKH

MODELLING OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES WITH COMPOSITE TOWERS FOR 35-330 KV ELECTRIC POWER NETWORKS

Based on the analysis of the technical condition of the equipment of the electric power networks of the UES of Ukraine, current challenges in the development of the energy sector and existing technologies for the transmission of electric energy, the expediency of using towers made of composite materials in the development, reconstruction and design of new overhead transmission lines for electric networks of different voltage classes is substantiated. The peculiarities of operation of towers made of composite materials in electric networks of many countries of the world are investigated, on the basis of which the prospects of using such towers for overhead transmission lines in Ukraine in the conditions of the introduced liberalised electricity market, as well as the requirements for the performance of electric power networks with the investigated towers made of composite materials are formulated. The article analyses the main characteristics and properties of composite materials that are most commonly used for the manufacture of towers in modern energy systems, as well as compares the physical and mechanical properties of towers made of different materials. The analysis of the obtained results confirms certain advantages of towers made of composite materials, which contribute to the widespread introduction of such towers in the Ukrainian energy system. To investigate the influence of the type of composite material and the design of the towers on the performance of electrical networks, a mechanical calculation of the towers was performed using the method of limit states. Using the obtained results, mathematical models of overhead transmission lines with composite towers for electric power networks with a voltage of 35-330 kV were developed, which take into account the technical characteristics of overhead transmission line elements and the operating conditions of electric power networks, and also allow forecasting quantitative indicators of further operation of the investigated electric power networks.

© О. М. Довгалюк, Р. В. Бондаренко, І. С. Яковенко, К. А. Мірошник, В. О. Високих, 2021

Keywords: electric power network, overhead transmission line, composite tower, wire layout, deformation, mechanical stress, tensile strength, limit state, deflection.

Постановка проблеми. Протягом останнього часу однією з тенденцій розвитку енергетики у світі є використання опор із композитних матеріалів (ОКМ), які мають ряд переваг у порівнянні з опорами з деревини металу та залізобетону. Так, їм властиві простота конструкції, кращі механічні характеристики, мала вага, високі діелектричні властивості, тривалий термін служби [1]. У зв'язку з цим сьогодні такі опори застосовуються в електричних мережах практично у будь-яких класах напруги – від мереж освітлення напругою 0,4 кВ до магістральних електричних мереж напругою 500 кВ.

Одними з перших застосовувати ОКМ почали енергетичні компанії США та Канади, де такі опори експлуатуються у складних кліматичних умовах, які утворюються через потужні пориви вітру, утворення значних ожеледео-паморозових відкладень тощо. За таких умов опори повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) піддаються впливу значно більших навантажень, а значно вища еластичність композитного матеріалу порівняно із залізобетоном, металом та деревиною дозволяє їм витримувати тимчасові навантаження без пошкоджень та незворотних деформацій. На сьогоднішній день крім зазначених країн ОКМ успішно експлуатуються в Норвегії, Китаї, Польщі, Італії, Туреччині, Індії, Австралії та багатьох інших країнах. В Україні дані опори поки що застосовуються лише у розподільних електричних мережах, у той час як перспективи їх використання є вельми широкими та мають значні переваги в сучасних умовах запровадження лібералізованого ринку електроенергії.

Аналіз технічного стану електричних мереж України показує, що термін експлуатації значної частини опор повітряних ЛЕП перевищує 40 років [2], що свідчить про потребу реконструкції таких мереж для забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів. В таких умовах доцільним є розгляд застосування ОКМ при розробці можливих варіантів для реконструкції електричних мереж. Слід зазначити, що обґрунтування доцільності застосування ОКМ вимагає детального вивчення всіх особливостей їх проектування, експлуатації та впливу даних опор як на навколишнє середовище, так і на режими роботи електричних мереж.

Для вирішення зазначених задач необхідно дослідити показники впливу та діапазони зміни параметрів режиму електричних мереж за умови застосування в них опор, які виконані з композитних матеріалів і мають особливості зміни властивостей за певних кліматичних умов оточуючого середовища. Оскільки натурні експерименти для вирішення цих задач будуть характеризуватись значним часом та великою вартістю, то найбільш результативним в цьому випадку є використання математичних моделей ОКМ, які дозволяють проводити аналіз потрібних показників стану досліджуваних опор та їх впливу на

характеристики роботи електричних мереж в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, питання моделювання повітряних ЛЕП з ОКМ, що дає змогу дослідити показники режимів роботи електричних мереж з такими опорами, є важливим для аналізу умов подальшої їх експлуатації в досліджуваних електричних мережах та обґрунтування заходів щодо їх реконструкції і розвитку.

Аналіз публікацій. В останні роки вченими багато уваги приділяється вивченню питань, пов'язаних з визначенням можливих перспектив застосування ОКМ під час реконструкції електричних мереж, які значний час знаходяться в експлуатації, а також при проектуванні нових ЛЕП. Зокрема, велика кількість робіт присвячена питанням ефективності використання ОКМ в електричних мережах різних класів напруги [3, 4]. Так, авторами [3] запропоновано оптимальний варіант застосування ОКМ разом з дерев'яними для ЛЕП 10 кВ, що сприяє скороченню витрат на експлуатацію електричних мереж та значно збільшує термін експлуатації опор. У роботі [4] обґрунтовано, що використання ОКМ є більш економічним порівняно з дерев'яними опорами для повітряних ЛЕП в електричних мережах 132 кВ та дозволить заощаджувати значну кількість коштів при подальшій експлуатації мереж з такими опорами.

Багато досліджень присвячено вивченню ізоляційних властивостей композитних матеріалів та особливостей їх застосування для опор високовольтних ЛЕП [5], що може дозволити впроваджувати нові рішення щодо захисту ЛЕП від прямих ударів блискавки, у тому числі й простіші за традиційно та широко застосовувані на сьогодні. Такі методи ґрунтуються на збільшенні електричної міцності фазної ізоляції завдяки застосуванню композитного матеріалу для опор [6]. В роботі [7] було проведено дослідження різних методів заземлення ОКМ, а також виконано аналіз стійкості опор даного типу до дії ударів блискавки за різних параметрів грозової активності, за підсумками якого було визначено, що використання ОКМ сприяє збільшенню захищеності ЛЕП від впливу грозової активності.

Слід також відмітити важливість і велику практичну значущість досліджень, присвячених аналізу механічної міцності [8, 9] та динамічної поведінки ОКМ в різних умовах експлуатації [10, 11]. Суттєвими є дослідження щодо специфіки використання таких опор в енергосистемах різних країн, що характеризуються істотними відмінностями технічних, кліматичних та економічних умов функціонування електричних мереж [12, 13].

Для України питання використання ОКМ є не вирішеним остаточно до теперішнього часу, оскільки наразі не затверджено нормативних документів, які дозволяють проводити розрахунок та обґрунтовувати проектні рішення для повітряних ЛЕП з ОКМ. У той

же час використання таких опор в енергетичній системі України дає змогу отримати значний позитивний ефект завдяки зниженню витрат на обслуговування та ремонт електричних мереж, зниженню втрат, підвищенню грозостійкості та зменшенню габаритних розмірів ЛЕП. Ці перспективи набувають особливої актуальності в умовах запровадженого в Україні лібералізованого ринку електричної енергії та зазначених напрямків стратегічного розвитку енергосистеми для об'єднання на паралельну роботу з енергосистемою континентальної Європи ENTSO-E [14], для забезпечення яких необхідним є виконання вимог щодо показників роботи електричних мереж. У свою чергу, практична реалізація цих питань потребує обґрунтування, яке базується на кількісному порівнянні різних варіантів побудови електричних мереж та прогнозуванні відповідних особливостей їх подальшої експлуатації. Вирішення цієї задачі можливо за умови застосування математичного моделювання ЛЕП з врахуванням особливостей характеристик їх окремих елементів.

Світовий досвід експлуатації ОКМ. В багатьох країнах світу ОКМ знаходяться в експлуатації вже понад 10 років, що є достатнім для визначення основних особливостей їх застосування в різних умовах. Актуальність застосування ОКМ для повітряних ЛЕП визначається наступними факторами:

1. необхідність проведення реконструкції повітряних ЛЕП, особливо у важкодоступних місцях і віддалених районах з нерозвинутою мережею автомобільних доріг, де проїзд великовантажного транспорту стає проблематичним і доставка залізобетонних або сталевих опор пов'язана зі значними труднощами і витратами;

2. будівництво нових повітряних ЛЕП з гарантованим терміном експлуатації понад 50 років;

3. створення естетично привабливих локацій, які можливо використовувати при плануванні паркових зон, скверів, а також гармонійно застосувати в населених пунктах через їх ефектне поєднання з іншою міською архітектурою.

Аналіз світового досвіду використання ОКМ показує, що найчастіше використання таких опор відбувається в регіонах зі складними кліматичними і природними умовами експлуатації (сильні вітрові навантаження, велика ймовірність утворення ожеледопаморозевих відкладень), а також у важкодоступній місцевості (при проходженні трас повітряних ЛЕП по гірським і болотистим територіям, лісовим масивам).

В електричних мережах США ОКМ успішно експлуатуються з 2000-х років переважно в регіонах із складними кліматичними умовами і за цей час вони неодноразово довели свої переваги під час випробування в екстремальних погодних катаклізмах. Так, у штаті Західний Кентуккі у 2008 р. пройшов сильний ураган "Айк" з поривами вітру до 40 м/с, під час якого понад 120 дерев'яних опор ЛЕП зазнали руйнування, внаслідок чого система електропостачання на декілька діб вийшла з ладу. Лише ОКМ залишилися без руйнувань. У 2009 р.

територією США пройшов масштабний крижаний шторм, під час якого понад 1600 дерев'яних опор ЛЕП зазнали руйнування під товстим шаром криги, внаслідок чого Кентуккі на 5 діб залишився без електрики, а на повну ліквідацію проблем у фахівців пішло понад 20 днів. Тільки ОКМ, які застосовувала компанія WKRECC, залишилися неушкодженими в таких погодних умовах.

У Норвегії виготовлені канадською компанією легкі склопластикові опори RStandard спочатку були встановлені під час реконструкції лише 2 км ділянки повітряної ЛЕП 132 кВ. За результатами їх експлуатації були зроблені висновки щодо високої ефективності використання таких опор і розглянута можливість їх застосування у важкодоступній гірській місцевості з суворими кліматичними умовами. Оскільки електричні мережі в Норвегії часто перетинають складну місцевість (переважно гірські райони без під'їзних доріг), це спонукає до широкого використання гелікоптерів для транспортування матеріалів і зведення опор під час будівництва ЛЕП. Досить гарним рішенням за таких умов стало використання саме ОКМ для різних класів напруги. Норвезька компанія Statnett згодом почала власну розробку концептуально нових конструкцій опор із скловолокна для ЛЕП в системі електропередачі 420 кВ [15].

Значний досвід використання ОКМ для ЛЕП низької та середньої напруги має Австралія та частина європейських країн (Італія, Великобританія та Польща), які вже проводять заміну старих дерев'яних опор на композитні для розподільчих мереж, особливо на ділянках, що проходять біля доріг та в міській місцевості [16]. В Китаї в даний час склопластик широко використовується в конструкції ґратчастих і однополюсних опор для ЛЕП 220 кВ і нижче, а також для окремих елементів опор на більш високі класи напруги [17, 18]. Крім того ОКМ успішно експлуатують у Туреччині, Індії та багатьох інших країнах [19, 20]. При цьому композитні полімерні матеріали, армовані склопластиком, широко застосовуються в якості поперечних конструкцій в ґратчастих опорах ЛЕП. Вдосконалення цих композитних конструкцій забезпечує чудові експлуатаційні характеристики від механічних навантажень завдяки кращій жорсткості, кращій поведінці при згинанні, покращеному поглинанню енергії та збільшеній несучій здатності.

В Україні ОКМ поки що застосовують тільки в розподільчих електричних мережах. Виготовленням і монтажем ОКМ займаються декілька компаній, серед яких ТОВ «МІКО» (м. Харків), що поставляє виготовлені у Туреччині на інтегрованому заводі ASAŞ Aluminium конічні ОКМ для електричних мереж різного класу напруги, в тому числі паркові й декоративні, опори освітлення, а також опори з внутрішнім RGB-підсвічуванням [21]. Компанія «STOLB» (м. Київ) займається створенням вуличного і паркового освітлення із застосуванням композитних паркових опор освітлення [22], компанія «Алютал» веде діяльність у Києві, Львові, Дніпрі, де займається виготовленням та монтажем опор для розподільчих

електричних мереж, серед яких значна кількість є композитними [23].

Враховуючи досвід експлуатації ОКМ в електричних мережах багатьох країн світу, а також умови розвитку енергетичного сектору України, можна стверджувати, що перспективи використання ОКМ є доволі широкими і привабливими для енергетики нашої держави. До них слід віднести наступні:

1. електричні мережі, траси яких розташовані на узбережжі Чорного та Азовського морів, для яких використання ОКМ сприятиме збільшенню терміну експлуатації в умовах з підвищеною вологістю та зниженню витрат на обслуговування таких мереж;

2. застосування ОКМ для промислових електричних мережах, які розташовуються в агресивному середовищі через особливості технологічного процесу, сприятиме збереженню властивостей і тривалого терміну експлуатації опор через їх стійкість до впливу шкідливого оточуючого середовища;

3. доцільним є використання ОКМ для ЛЕП, що розташовані в районах з потужними вітровими навантаженнями і значними показниками утворення ожеледо-паморозевих відкладень, де під час експлуатації ЛЕП піддаються значним тяжинням та навантаженням;

4. для спорудження або реконструкції ЛЕП, розташованих у важкодоступних місцях, як то гірська і заболочена місцевість, територія із ускладненими умовами для проїзду великовантажного транспорту;

5. створення естетичних локацій на території населених пунктів.

Слід зазначити, що при впровадженні ОКМ важливим є забезпечення всіх вимог щодо роботи електричних мереж на рівні світових показників. В першу чергу це стосується всіх параметрів мережі та режиму, а також показників надійності та якості надання послуг з електропостачання відповідно до вимог [24]. За таких умов дієвим інструментом для розробки та обґрунтування проектів з впровадження ОКМ стає математичне моделювання для досконалого аналізу умов їх подальшої експлуатації.

Аналіз характеристик і властивостей композитних матеріалів. ОКМ є новим типом опор, термін використання яких становить трохи більше 15 років, проте за цей час вони встигли зарекомендувати себе в якості пріоритетних конструкцій, що за певних умов експлуатації ЛЕП мають переваги через ряд незвичайних властивостей сучасних композитних матеріалів, які становлять певний інтерес з точки зору зниження витрат на монтаж та подальше обслуговування, а також значне підвищення експлуатаційної надійності електричних мереж.

Композитні матеріали є полімерними, їх властивості залежать від вибору вихідних компонентів та їх співвідношення, взаємодії між ними, методу і технологічних умов виготовлення виробу (тиску, температури, часу), додаткової обробки виробу і ряду інших чинників. Аналіз властивостей сучасних композитних матеріалів [25, 26] показує, що від ряду інших матеріалів їх відрізняють властивості, серед

яких найбільш важливими є наступні: невелика питома вага; високі показники механічної міцності; високі діелектричні показники; висока корозійна, хімічна і температурна стійкість; низька теплопровідність; стійкість до дії грибків, бактерій і комах; підвищена вологостійкість та морозостійкість; довговічність; легке виготовлення конструкцій будь-якої форми.

Завдяки своїм властивостям сучасні композитні матеріали здатні скласти конкуренцію деяким сталям і багатьом кольоровим металам, в тому числі й матеріалам, з яких традиційно виготовляють опори для повітряних ЛЕП. За статистикою використання на сьогоднішній день найбільш поширеним матеріалом для виробництва ОКМ для ЛЕП є склопластик, для якого в якості наповнювача застосовують скловолокно (кварцеве або скляне волокно), а в якості матриці – термопластичний полімер. Друге місце за використанням при виготовленні опор ЛЕП займає базальтопластик.

Для виготовлення ОКМ використовуються армовані полімерні композитні матеріали, з яких виконуються конструкції потрібної форми, переважно циліндричної або конічної, які збираються з окремих модулів. Застосовуватись вони можуть для електричних мереж на всі класи напруги. Такі опори не схильні до гниття та корозії, впливу птахів і комах, стійкі до дії хімічно агресивних середовищ і соляних розчинів, морозостійкі, мають високу вогнестійкість (можуть бути абсолютно негорючими при покритті декількома шарами вогнестійкого засобу). Отже, ОКМ не потребують технічного обслуговування в процесі експлуатації.

Результати порівняння деяких типових значень окремих властивостей композитних й інших матеріалів, що використовуються для виготовлення опор повітряних ЛЕП, наведені у табл. 1, аналіз даних якої показує, що важливою особливістю склопластику в порівнянні із сталевими та залізобетонними конструкціями опор є його еластичність та низька крихкість. Завдяки цьому ОКМ допускають значно більші вигини під впливом несиметричних навантажень, ніж сталеві та залізобетонні. Саме ця властивість ОКМ вказує на доцільність їх застосування в складних кліматичних умовах. Крім того, при виготовленні опор суттєвим фактором є можливість варіювання характеристик композитного матеріалу для забезпечення необхідних показників властивостей з врахуванням особливостей кліматичних умов їх подальшої експлуатації.

Отже, порівняння фізико-механічних властивостей опор з різних матеріалів підтверджує певні переваги ОКМ. Аналізуючи властивості композитних матеріалів та особливості подальшої експлуатації виготовлених з них опор повітряних ЛЕП, можна стверджувати, що за своїми фізико-механічними властивостями ОКМ мають ряд переваг порівняно до їх аналогів:

- мала вага опор у порівнянні з аналогічними за розмірами опорами з металу, деревини або залізобетону, що є особливо важливим при спорудженні ЛЕП у важкодоступних районах (гориста місцевість, болота);

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики матеріалів для опор повітряних ЛЕП

Показник	Матеріал			
	Склопластик	Сталь	Залізобетон	Деревина
Густина, (кг/м ³)	1600-2000	7800	2500	550
Межа міцності при розтягуванні, МПа	1200-2500	410-560	50-300	103
Межа міцності при стисканні, МПа	800-1200	370-450	5-35	48
Межа міцності при згинанні, МПа	690-1240	180-240	5,2-70	86
Модуль пружності при розтягуванні, ГПа	50-70	210	20	10
Допустиме напруження при розтягуванні, МПа	410-800	100-400	0,1-0,7	7-10
Допустиме напруження при стисканні, МПа	410-800	100-400	1-9	10-12
Коефіцієнт лінійного теплового розширення, 10 ⁻⁶ С ⁻¹	5-14	11-14	12-15	3-5 вздовж волокон 7-10 впоперек волокон
Теплопровідність при 20 °С, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	0,3-0,5	46	1,5-2	2,72
Питомий об'ємно-електричний опір, Ом	1·10 ¹⁰	Провідник	Струмопровідна арматура	Провідник
Гігроскопічність, %	0,5	–	7-25	14-20
Довговічність, рік	понад 50 років (65-80)	30-40	20-25	20-30
Стійкість до дії хімічно агресивних середовищ і соляних розчинів	Стійкий	Не стійкий	Не стійкий	Не стійкий
Експлуатаційні витрати	Не потребує технічного обслуговування при експлуатації, регламентні роботи з обслуговування не рідше 1 раз на 10 років	Потребує регламентних робіт з обслуговування не рідше 1-2 разів на рік	Потребує регламентних робіт з обслуговування не рідше 1 разу на 6 років	Потребує регламентних робіт з обслуговування не рідше 1 разу на 3 роки

- спрощення зберігання і транспортування завдяки особливості конструкції опор, які складаються з порожнистих секцій, що дає можливість зберігати і перевозити їх одну в іншій;

- простота монтажу опор, яка полягає у відсутності застосування складних монтажних інструментів та важкої техніки для збору та встановлення ОКМ;

- висока швидкість і невелика вартість монтажу, знижені витрати на логістику;

- не потребують технічного обслуговування в процесі експлуатації, оскільки не схильні до гниття, корозії і містять мінімум сталевих елементів;

- потребують меншої площі постійного відводу землі під опори, що важливо для ЛЕП, розташованих на землях з високою вартістю оренди;

- мають високу міцність та довговічність;

- характеризуються екологічністю та високою вогнестійкістю, завдяки чому при використанні таких опор немає проблем з їх утилізацією, подібних до просиченої креозотом деревини;

- мають хороші діелектричні властивості, завдяки чому самі опори, виконані зі склопластику чи базальтопластику, є ізолятором в системі «провід – земля», що дозволяє спростити конструкцію всієї опори і відмовитися від застосування ізоляторів, замінивши їх ізоляційними траверсами, що також виконані з композитного матеріалу;

- підвищена стійкість до агресивних середовищ (корозії, ультрафіолетового випромінювання, температурних перевантажень, тощо);

- підвищена ударостійкість;

- відносна простота виготовлення конструкцій із сучасних композитних матеріалів, яка не вимагає великих фінансових вкладень в обладнання.

Зазначені переваги сприяють поширенню ОКМ в електричних мережах всіх класів напруги.

Математичне моделювання ОКМ. Для вирішення зазначеної задачі було виконано математичне моделювання стану проміжних та анкерних ОКМ з врахуванням власного тяжіння опори та траверс ЛЕП, а також льодового та вітрового навантаження на її стійку та траверси, які враховувались як сили, що розподілені і прикладені вздовж всієї висоти опори. Загальне розподілення навантажень ОКМ для механічного розрахунку показано на рис. 1.

В різних умовах експлуатації значення навантажень будуть змінюватись в різних діапазонах залежно від сили вітру, які визначають величину горизонтальних розрахункових навантажень, а також конструктивних особливостей опори, які визначають величину вертикальних розрахункових навантажень. Під впливом дій цих навантажень опора зазнає деформації, що визначається прогином конструкції, який показано на рис. 2.

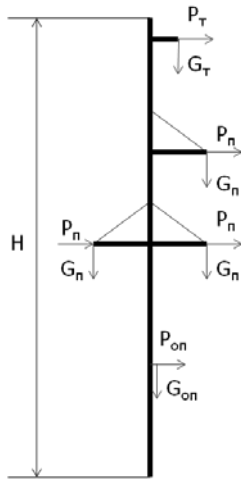


Рисунок 1 – Схема навантаження ОКМ: P_T , P_n , P_{on} – горизонтальні вітрові розрахункові навантаження на грозозахисний трос, проводи та опору;
 G_T , G_n , G_{on} – вертикальні навантаження від ваги грозозахисного тросу, проводів та опори, включаючи всі її елементи (фундаменти, траверси, гірлянди ізоляторів, проводи, троси, арматуру та все встановлене обладнання)

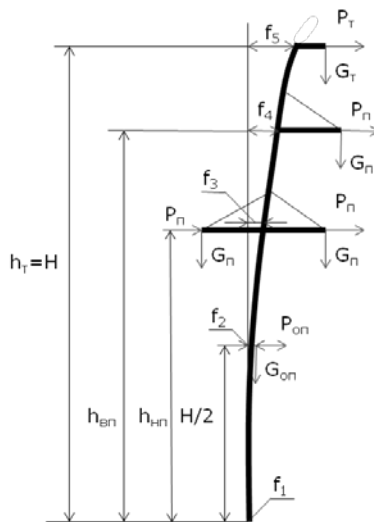


Рисунок 2 – Прогини під час деформації опори

Оскільки ОКМ мають високу пружність, в горизонтальній площині, величини прогинів f_i вздовж стійки опори будуть різні. Для врахування цієї властивості та одержання більш точного результату розрахунку висота стійки опори H при моделюванні була розбита на m ділянок, кожна з яких має висоту h_i та характеризується однаковою постійною жорсткістю E_j . Такий підхід до врахування особливості дії розподілених навантажень на стійку опори без спрощувальних припущень дозволяє отримати більш точний результат розрахунку пружних прогинів ОКМ.

Для визначення величини прогинів стійки ОКМ застосовуємо вираз:

$$f_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{E_j} \int \overline{M}_i(h) [M_0(h) + M(f_1, \dots, f_m, h)] dh, \quad (1)$$

де f_i – прогин на рівні верхньої межі i -ої ділянки стійки опори, $i = 1, \dots, m$;

$M_0(h)$ – момент від навантаження в недеформованому стані опори;

$M(f_1, \dots, f_m, h)$ – момент від вертикальних навантажень внаслідок деформації;

$\overline{M}_i(h)$ – згинальний момент від одичної, горизонтальної сили, прикладеної лише на рівні h .

Величини діапазонів вильоту траверси опори при визначених прогинах в результаті деформації визначаються за виразом:

$$x_{f_i} = x_0 + \Delta x_{f_i}, \quad (2)$$

де x_{f_i} – величина вильоту траверси опори на рівні верхньої межі i -ої ділянки стійки опори;

x_0 – координата крайньої точки траверси в недеформованому стані опори;

Δx_{f_i} – координата крайньої точки траверси в деформованому стані, що призвів до прогину f_i стійки на рівні верхньої межі i -ої ділянки.

Розроблені математичні моделі дають змогу більш точно врахувати механічні властивості матеріалу опор та особливості їх експлуатації в реальних кліматичних умовах.

Аналіз механічних властивостей ОКМ. Для дослідження впливу конструкції та типу матеріалу опор на показники режимів роботи електричних мереж був виконаний механічний розрахунок опор, який проводився методом граничних станів. Для проведення дослідження були використані найбільш поширені типові конструкції ОКМ для повітряних ЛЕП, які застосовуються в електричних мережах різних класів напруги США, Канади, Китаю, Австралії та Туреччини [27]. Був виконаний аналіз і класифікація основних типів таких опор, серед яких виділені найбільш перспективні для застосування в Україні (рис. 3).

Для вибраних типів опор різної конструкції були виконані розрахунки механічних та технічних характеристик внаслідок деформацій від різних впливів, що є характерними для експлуатації повітряних ЛЕП. Приклад такого розрахунку для опори PRS на 110 кВ представлений на рис. 4.

З використанням одержаних значень механічних характеристик досліджуваних ОКМ був проведений розрахунок їх оптимальних габаритів та гранично допустимих відхилень під час деформацій в результаті різних впливів при експлуатації повітряних ЛЕП. Для вирішення цієї задачі з використанням запропонованих виразів (1) і (2) були одержані значення прогинів стійок опор для електричних мереж різної номінальної напруги, які дозволяють визначити габарити повітряних ЛЕП та гранично допустимі відхилення. Результати розрахунку представлені в табл. 2.

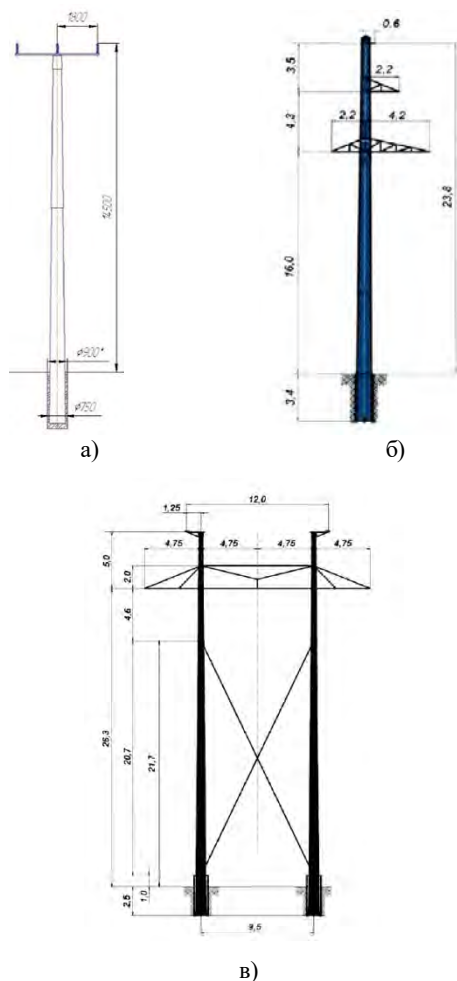


Рисунок 3 – Опори, виготовлені з композитних матеріалів:
а) опора типу ПК-35; б) опора типу PIRS 110-1.170-275-071;
в) опора типу PPRS 330-1.263-338-0309

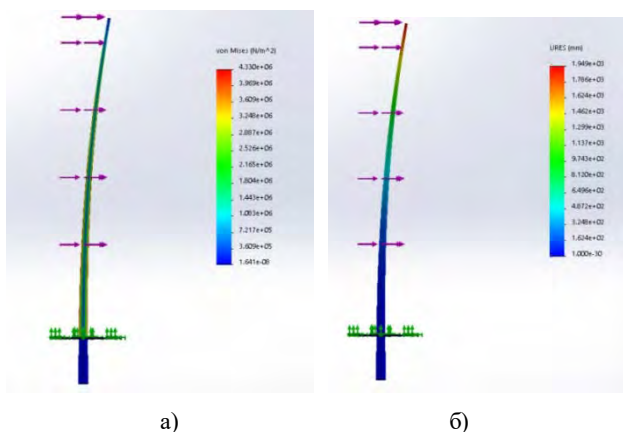


Рисунок 4 – Результати розрахунку механічних характеристик для опори PIRS 110-1.170-275-071:
а) епюра напруг; б) епюра деформацій опори

Розрахунок проводився відповідно до умов вітрового навантаження та утворення ожеледо-паморозевих відкладень для Харківської області відповідно [28]:

- значення вітрового тиску відповідають 3 кліматичному району, для якого значення максимального вітрового тиску становить 500 Па;

- значення утворення ожеледо-паморозевих відкладень відповідають 2 кліматичному району, для якого при визначається лінійне навантаження ожеледо-паморозевих відкладень, середня вага яких дорівнює 12 Н/м, а стінка ожеледі становить 16 мм.

Таблиця 2 – Прогини стійок ОКМ для досліджуваних електричних мереж 330, 110 і 35 кВ

Номинальна напруга електричної мережі	Величина прогину стійки опори, м		
	на рівні грозозахистного тросу f_5	на рівні верхньої траверси f_4	на рівні нижньої траверси f_3
330 кВ	3,07	2,85	1,73
110 кВ	2,35	2,18	1,32
35 кВ	1,41	1,32	0,81

Аналіз даних табл. 2 показує, що максимальна величина прогину стійки, що спостерігається у верхній точці ОКМ, становить 10-12 % від висоти опори. Це на 30 % менше від граничного стану опори за умовами руйнування.

Подальший розрахунок положення проводів, тросів в прогоні мають бути уточнені відповідно до одержаних значень прогинів стійок опор. Отже, розроблені математичні моделі дають змогу більш точно врахувати механічні властивості матеріалу опор та особливості їх експлуатації в реальних кліматичних умовах.

Результати розрахунку повністю підтверджують, що у порівнянні із залізобетонними та металевими опорами досліджувані ОКМ мають кращі механічні характеристики, більш високу гнучкість до руйнування або залишкової деформації, а також більші значення відхилень для стійок та траверс, що значно впливає на ширину коридору повітряної ЛЕП та потребує врахування в нормативних проектних документах. Крім того, за умови дотримання ізоляційних відстаней між проводами використання ОКМ дозволяє змінювати параметри ЛЕП, що дозволить знизити втрати в електричних мережах.

Висновки. Виконаний аналіз світового досвіду експлуатації ОКМ показав, що використання таких опор у важкодоступній місцевості та для регіонів із складними кліматичними та природними умовами цілком себе виправдовує і дає гарні результати за показниками механічної міцності опор та надійності роботи електричних мереж. Беручи до уваги цей досвід та технічний стан обладнання електричних мереж ОЕС України, обґрунтовано доцільність та гарні перспективи впровадження ОКМ для енергетики нашої країни під час розвитку, реконструкції та спорудження нових ЛЕП в електричних мережах 35-330 кВ.

Аналіз основних характеристик та властивостей композитних матеріалів, які використовуються для виготовлення опор, дозволив виконати порівняння фізико-механічних властивостей опор з різних матеріалів, а також виконати уточнене математичне моделювання стану проміжних та анкерних опор повітряних ЛЕП з врахуванням механічних

властивостей матеріалу опор, особливостей їх конструкції та реальних кліматичних умов експлуатації. Одержані результати моделювання підтверджують переваги ОКМ по відношенню до опор з металу, деревини та залізобетону за різних умов експлуатації, а також можуть бути застосовані для більш досконалого визначення показників впровадження таких опор в електричні мережі.

Список літератури

- Sarmento M., Lacoursiere B. A. State of the Art Overview Composite Utility Poles for Distribution and Transmission Applications. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. Caracas, Venezuela. 2006. P. 1–4.
- Національна енергетична компанія «Укренерго», Електричні мережі Укренерго. URL: <https://ua.energy/about/merezhi-ukrenergo/> (дата звернення 03.11.2021).
- Fursanov M. I., Sazonov P. A. Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2019. Vol. 62, no. 1. P. 15–23.
- Tonne E., Dale V., Foosnes J. A. Experiences from a test project in Norway using composite poles in 132 kV overhead lines. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Stockholm, Sweden. 2013. P. 1–4. doi: 10.1049/cp.2013.1216.
- Kumosa M., Armentrout D., Burks B., Hoffman J., Kumosa L., Middleton J., Predecki P. Polymer matrix composites in high voltage transmission line applications. *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju Island, Korea. 2011. P. 1–6.
- Zhijun L., Han-Ming L., Min D., Shi-Cong D., Ding-xie G., Qian-Hu W. Study on grounding design for lightning of tubular composite material towers in 110 kV overhead transmission line. *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. New Orleans, USA. 2010. P. 473–475, doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640725.
- Hu C. et al. Investigation on 110kV composite material pole: Effects of grounding methods on insulation of conductor-pole gaps. *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Chengdu, China. 2016. P. 1–5, doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800782.
- Mohd Zainuddin N. et al. Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 120053–120081, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004578.
- Arhat R., Puzyr R., Kulynych V., Sira Y., Shchetynin V., Vorobyov V., Research of the Stress State While Obtaining Tapered Flares on the Connecting Elements of Electrical Wires. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenichuk, Ukraine. 2021. P. 1–6, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598606.
- Bhowmik C., Chakraborti P., Das S. S., Singh R. Modal Analysis of 132 kV Double Circuit Electric Power Transmission Tower Made up with Composite Material Thermoplastic Long Carbon Fiber Nylon 66. P. 891–899. In book: Kumar M. et al. *Advances in Interdisciplinary Engineering*. Advances in Interdisciplinary Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, doi: 10.1007/978-981-13-6577-5_86.
- Vasconcelos G. C. et al. Creep and Aging Evaluation of Phenol-Formaldehyde Carbon Fiber Composites in Overhead Transmission Lines. *Applied Composite Materials*. 2021. Vol. 28, P. 1697–1714, doi: 10.1007/s10443-021-09935-6.
- Dovgalyuk O., Bondarenko R., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Rationale for the introduction of composite supports in Ukrainian electricity networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 705–708, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570076.
- Bhowmik E. C., Gupta K., Chakraborti P. Stability analysis of Glass Fiber Polyamide Composite Transmission Tower. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2020. P. 1–14, doi: 10.1177/0731684420937357.
- Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (дата звернення 03.11.2021).
- Statnett. Composite and aluminium towers. URL: <https://www.statnett.no/en/about-statnett/innovation-and-technology-development/our-prioritised-projects/composite-and-aluminium-towers/> (дата звернення 05.11.2021).
- Mohammed A. A., Manalo A. C., Ferdous W., Zhuge Y., Vijay P.V., Alkinani A.Q., Fam A. State-of-the-art of prefabricated FRP composite jackets for structural repair. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23, Iss. 5. P. 1244–1258.
- Hu Y., Liu T. Experimental research on performance of composite materials pole of 110 kV transmission line. *Voltage Engineering*. 2011. Vol. 37 (4). P. 801–807.
- An L., Wu J., Zhang Z., Zhang R. Failure analysis of a lattice transmission tower collapse due to the super typhoon Rammasun in July 2014 in Hainan Province, China. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 2018. Vol. 182. P. 295–307.
- Zhu Y., Wang L., Yu J., Fang J. Optimal insulation design for new-type transmission tower with composite cross-arm. In *Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials*. 2017. Vol. 2. P. 578–581.
- Abd Rahman M. S., Ab Kadir M. Z. A., Ab-Rahman M. S., Osman M., Mohd Nor S. F., Mohd Zainuddin N. Effects of a Crossarm Brace Application on a 275 kV Fiberglass-Reinforced Polymer Crossarm Subjected to a Lightning Impulse. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 6248.
- Компанія МКО. Опори освітлення, енергетичні опори, світильники, енергетична арматура. URL: <https://miko.ua/> (дата звернення 03.11.2021).
- Компанія STOLB. Композитні опори вуличного освітлення. URL: <https://stolb.com.ua/> (дата звернення 03.11.2021).
- Компанія Alutal. Композитні опори. URL: <https://www.alutal.com.ua/> (дата звернення 03.11.2021).
- Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Офіційний веб-сайт. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=11895> (дата звернення 03.11.2021).
- Pleša I., Nottinger P. V., Schlögl S., Sumereder C., Muhr M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers (Basel)*. 2016. Vol. 8(5), no. 173. P. 1–63, doi: 10.3390/polym8050173.
- Czapla A., Ganesapillai M., Drewnowski J. Composite as a Material of the Future in the Era of Green Deal Implementation Strategies. *Processes*. 2021. Vol. 9(12). P. 2238, doi: 10.3390/pr9122238.
- Dovgalyuk O., Bondarenko R., Miroshnyk K., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Features Analysis of Composite Supports Application for Electric Power Networks in Ukraine. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 103–108, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250150.
- Правила улаштування електроустановок*. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

References (transliterated)

- Sarmento M., Lacoursiere B. A. State of the Art Overview Composite Utility Poles for Distribution and Transmission Applications. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. Caracas, Venezuela. 2006. P. 1–4.
- Natsionalna enerhetychna kompaniia «Ukrenerho», Elektrychni merezhi Ukrenerho. URL: <https://ua.energy/about/merezhi-ukrenergo/> (data zvernennia 03.11.2021).
- Fursanov M. I., Sazonov P. A. Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2019. Vol. 62, no. 1. P. 15–23.
- Tonne E., Dale V., Foosnes J. A. Experiences from a test project in Norway using composite poles in 132 kV overhead lines. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Stockholm, Sweden. 2013. P. 1–4. doi: 10.1049/cp.2013.1216.
- Kumosa M., Armentrout D., Burks B., Hoffman J., Kumosa L., Middleton J., Predecki P. Polymer matrix composites in high voltage

- transmission line applications. *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju Island, Korea. 2011. P. 1–6.
6. Zhijun L., Han-Ming L., Min D., Shi-Cong D., Ding-xie G., Qian-Hu W. Study on grounding design for lightning of tubular composite material towers in 110 kV overhead transmission line. *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. New Orleans, USA. 2010. P. 473–475, doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640725.
 7. Hu C. et al. Investigation on 110kV composite material pole: Effects of grounding methods on insulation of conductor-pole gaps. *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Chengdu, China. 2016. P. 1–5, doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800782.
 8. Mohd Zainuddin N. et al. Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 120053–120081, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004578.
 9. Arhat R., Puzyr R., Kulynych V., Sira Y., Shchetynin V., Vorobyov V., Research of the Stress State While Obtaining Tapered Flares on the Connecting Elements of Electrical Wires. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2021. P. 1–6, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598606.
 10. Bhowmik C., Chakraborti P., Das S. S., Singh R. *Modal Analysis of 132 kV Double Circuit Electric Power Transmission Tower Made up with Composite Material Thermoplastic Long Carbon Fiber Nylon 66*. P. 891–899. In book: Kumar M. et al. *Advances in Interdisciplinary Engineering*. Advances in Interdisciplinary Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, doi: 10.1007/978-981-13-6577-5_86.
 11. Vasconcelos G. C. et al. Creep and Aging Evaluation of Phenol-Formaldehyde Carbon Fiber Composites in Overhead Transmission Lines. *Applied Composite Materials*. 2021. Vol. 28, P. 1697–1714, doi: 10.1007/s10443-021-09935-6.
 12. Dovgalyuk O., Bondarenko R., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Rationale for the introduction of composite supports in Ukrainian electricity networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 705–708, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570076.
 13. Bhowmik E. C., Gupta K., Chakraborti P. Stability analysis of Glass Fiber Polyamide Composite Transmission Tower. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2020. P. 1–14, doi: 10.1177/0731684420937357.
 14. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». Skhvaleno rozporiadzheniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18.08.2017 r. № 605-r. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (data zvernennia 03.11.2021).
 15. Statnett. Composite and aluminium towers. URL: <https://www.statnett.no/en/about-statnett/innovation-and-technology-development/our-prioritised-projects/composite-and-aluminium-towers/> (data zvernennia 05.11.2021).
 16. Mohammed A. A., Manalo A. C., Ferdous W., Zhuge Y., Vijay P.V., Alkinani A.Q., Fam A. State-of-the-art of prefabricated FRP composite jackets for structural repair. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23, Iss. 5. P. 1244–1258.
 17. Hu Y., Liu T. Experimental research on performance of composite materials pole of 110 kV transmission line. *Voltage Engineering*. 2011. Vol. 37 (4). P. 801–807.
 18. An L., Wu J., Zhang Z., Zhang R. Failure analysis of a lattice transmission tower collapse due to the super typhoon Rammasun in July 2014 in Hainan Province, China. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2018. Vol. 182. P. 295–307.
 19. Zhu Y., Wang L., Yu J., Fang J. Optimal insulation design for new-type transmission tower with composite cross-arm. In *Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials*. 2017. Vol. 2. P. 578–581.
 20. Abd Rahman M. S., Ab Kadir M. Z. A., Ab-Rahman M. S., Osman M., Mohd Nor S. F., Mohd Zainuddin N. Effects of a Crossarm Brace Application on a 275 kV Fiberglass-Reinforced Polymer Crossarm Subjected to a Lightning Impulse. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 6248.
 21. Kompaniia MIKO. Opory osvittlenia, enerhetychni opory, svitylky, enerhetychna armatura. URL: <https://miko.ua/> (data zvernennia 03.11.2021).
 22. Kompaniia STOLB. Kompozytni opory vulychnoho osvittlenia. URL: <https://stolb.com.ua/> (data zvernennia 03.11.2021).
 23. Kompaniia Alutal. Kompozytni opory. URL: <https://www.alutal.com.ua/> (data zvernennia 03.11.2021).
 24. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh (NKREKP). Ofitsiinyi veb-sait. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=11895> (data zvernennia 03.11.2021).
 25. Pleša I., Nožingher P. V., Schlögl S., Sumereder C., Muhr M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers (Basel)*. 2016. Vol. 8(5), no. 173. P. 1–63, doi: 10.3390/polym8050173.
 26. Czaplá A., Ganesapillai M., Drewnowski J. Composite as a Material of the Future in the Era of Green Deal Implementation Strategies. *Processes*. 2021. Vol. 9(12). P. 2238, doi: 10.3390/pr9122238.
 27. Dovgalyuk O., Bondarenko R., Miroshnyk K., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Features Analysis of Composite Supports Application for Electric Power Networks in Ukraine. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 103–108, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250150.
 28. *Pravyly ulashtuvannia elektroustanovok. Kyiv: Minenerhovuhillia Ukrainy, 2017. 617 s.*

Надійшла (received) 18.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Довгалюк Оксана Миколаївна (Довгалюк Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1994-619X>; e-mail: Oksana.Dovhaliuk@kphi.edu.ua.

Бондаренко Роман Вікторович (Бондаренко Роман Викторович, Bondarenko Roman Viktorovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6081-5020>; e-mail: elektrotehnika245@ukr.net.

Яковенко Іван Сергійович (Яковенко Иван Сергеевич, Yakovenko Ivan Serhiyovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-2841>; e-mail: i.c.jakovenko@gmail.com.

Мірошник Костянтин Артурович (Мірошник Константин Артурович, Miroshnyk Kostiantyn Arturovych) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e-mail: Kostiantyn.Miroshnyk@ieee.kphi.edu.ua.

Високих Владислав Олегович (Високих Владислав Олегович, Vysokykh Vladyslav Olegovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; e-mail: vladyslav.vysokykh@ieee.kphi.edu.ua.

Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КІРІЧЕНКО, К. О. МІНАКОВА, А. М. ДРОЗДОВ, Д. С. ШКОДА

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ЗРАЗКІВ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Досліджено можливості збільшення коефіцієнта корисної дії більш ніж на 20 % для кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Методом комп'ютерного моделювання встановлено, що час життя нерівноважних носіїв заряду, який становить 520 мкс, реалізований у таких фотоелектричних перетворювачах, не обмежує можливості підвищення їх ефективності більш ніж на 20 %. Показано, що збільшення щільності фотоструму до 43,1 мА/см² призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії до 20,1 %, а зниження густини струму насичення діода до 3,1·10⁻¹⁴ А/см² призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії до 20,4 %. Одночасна зміна цих характеристик діода призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії до 23,1 %. У роботі запропоновано фізико-технологічні підходи до збільшення густини фотоструму та зменшення густини струму насичення діода у готових фотоелектричних перетворювачах. У статті проведено дослідження впливу робочої температури на коефіцієнт корисної дії кристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів. Показано, що з підвищенням робочої температури відносно зниження коефіцієнта корисної дії монокристалічних приладів становить -0,7 відсотних %/С, що значно вище, ніж у конструкціях приладів європейського виробництва та за рахунок нетрадиційного зниження короткого замикання. Математичне моделювання впливу характеристик світлодіодів на коефіцієнт корисної дії кристалічних кремнієвих сонячних батарей показало, що зниження коефіцієнта корисної дії конструкцій приладів при підвищенні робочої температури обумовлено не тільки збільшенням густини струму насичення діода з 10⁻¹³ А до 3·10⁻¹³ А, що становить 300 %, а також за рахунок зниження опору шунта з 2,5 кОм до 1,5 кОм. Дослідження впливу робочої температури на струм насичення діода показало, що висота потенціального бар'єру в досліджуваних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах становить 0,87 еВ, що обумовлено недостатнім рівнем легування основного матеріалу. Обмежена висота потенціального бар'єру призводить до нетрадиційного зниження опору шунта при підвищенні робочої температури.

Ключові слова: кремній, фотоелектричні перетворювачі, сонячна енергія, PV/Г системи, електричні параметри, ефективність, моделювання, оптимізація.

Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КИРИЧЕНКО, К. А. МИНАКОВА, А. Н. ДРОЗДОВ, Д. С. ШКОДА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследованы возможности повышения коэффициента полезного действия кремниевых фотоэлектрических преобразователей китайского производства более чем на 20 %. Методом компьютерного моделирования установлено, что время жизни неравновесных носителей заряда, составляющее 520 мкс, реализуемое в таких фотоэлектрических преобразователях, не ограничивает возможности повышения их коэффициента полезного действия более чем на 20%. Показано, что увеличение плотности фототока до 43,1 мА/см² приводит к увеличению коэффициента полезного действия до 20,1 %, а уменьшение плотности тока насыщения диода до 3,1·10⁻¹⁴ А/см² приводит к увеличению коэффициента полезного действия до 20,4 %. Одновременное изменение этих характеристик диодов приводит к увеличению коэффициента полезного действия до 23,1 %. В статье предложены физические и технологические подходы к увеличению плотности фототока и снижению плотности тока насыщения диодов в готовых фотоэлектрических преобразователях. В статье проведено исследование влияния рабочей температуры на коэффициент полезного действия фотоэлектрических преобразователей из кристаллического кремния. Показано, что при повышении рабочей температуры относительное снижение коэффициента полезного действия монокристаллических устройств составляет -0,7 отн. %/С, что значительно выше, чем в приборных конструкциях европейского производства, и за счет нетрадиционного снижения короткого замыкания. Математическое моделирование влияния характеристик светодиодов на коэффициент полезного действия солнечных элементов из кристаллического кремния показало, что снижение коэффициента полезного действия приборных структур с повышением рабочей температуры связано не только с увеличением плотности тока насыщения диода с 10⁻¹³ А до 3·10⁻¹³ А, что составляет 300 %, но также за счет уменьшения сопротивления шунта с 2,5 кОм до 1,5 кОм. Исследование влияния рабочей температуры на ток насыщения диода показало, что высота потенциального барьера в исследованных кремниевых фотоэлектрических преобразователях составляет 0,87 эВ из-за недостаточного уровня легирования основного материала. Ограниченная высота потенциального барьера приводит к необычному уменьшению сопротивления шунта с увеличением рабочей температуры.

Ключевые слова: кремний, фотоэлектрические преобразователи, солнечная энергия, фотоэлектрические системы, электрические параметры, эффективность, моделирование, оптимизация.

R. V. ZAITSEV, M. V. KIRICHENKO, K. A. MINAKOVA, A. N. DROZDOV, D. S. SHKODA

IMPROVING THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL SAMPLES OF SILICON SOLAR ELEMENTS

Possibilities of increasing the efficiency by more than 20 % for silicon photoelectric converters made in China have been investigated. It has been established by the method of computer simulation that the life-times of nonequilibrium charge carriers, which are 520 μs, realized in such photoelectric converters, do not limit the possibility of increasing their efficiency by more than 20 %. It is shown that an increase in the photocurrent density to 43.1 mA/cm² leads to an increase in efficiency to 20.1 %, and a decrease in the diode saturation current density to 3.1·10⁻¹⁴ A/cm² leads to an increase in efficiency to 20.4 %. Simultaneous change of these diode characteristics leads to an increase in efficiency to 23.1 %. The paper proposes physical and technological approaches to increase the photocurrent density and reduce the diode saturation current density in ready-made photovoltaic converters. The study of the influence of operating temperature on the efficiency of crystalline silicon photoelectric converters is carried out in the article. It is shown that with increasing operating temperature the relative decrease in the efficiency of single-crystal devices is -0.7 relative %/C, which is significantly higher than in the instrument structures of European production and due to non-traditional decrease in short-circuit current density. Mathematical modeling of the influence of light-emitting diode characteristics on the efficiency of crystalline silicon solar cells showed that the decrease in the efficiency of instrument structures with increasing operating temperature is due not only to an increase in diode saturation current density from 10⁻¹³ A to 3·10⁻¹³ A, which is 300 %, but also by reducing the shunt resistance from 2.5 kOhm to 1.5 kOhm. A study of the effect of operating temperature on

© Р. В. Зайцев, М. В. Кіріченко, К. О. Мінакова, А. М. Дроздов, Д. С. Шкода, 2021

the diode saturation current showed that the height of the potential barrier in the studied silicon photovoltaic converters is 0.87 eV, due to the insufficient level of doping of the base material. The limited height of the potential barrier leads to an unconventional decrease in the shunt resistance with increasing operating temperature.

Keywords: silicon, photovoltaic converters, solar energy, PV/T systems, electrical parameters, efficiency, modelling, optimization.

Вступ. Основною проблемою широкомасштабного наземного використання найбільш поширених фотоелектричних панелей (ФЕП) на основі кристалічного кремнію є забезпечення конкурентоспроможності виробленої такими приладовими структурами електричної енергії порівняно з традиційними джерелами електроенергії [1]. Це може бути досягнуто шляхом зниження вартості 1 Вт пікової потужності за рахунок збільшення коефіцієнта перетворення (ККД) сонячної енергії та зменшення собівартості технології їх виготовлення [1].

В даний час західними фірмами розроблено та реалізовано конструктивно-технологічні рішення (КТР) ФЕП на основі кристалічного кремнію (ФЕП) з ефективністю понад 20 % в умовах промислового виробництва [2–4]. Реалізація у промислових масштабах у Росії таких КТР вимагає технічного переозброєння вітчизняних підприємств електронного профілю, що займаються промисловим випуском ФЕП на основі кристалічного кремнію, за рахунок закупівлі дорогого наукомісткого обладнання, яке не має вітчизняних аналогів.

Нині, внаслідок різкого збільшення інвестицій у розвиток виробництва, провідні китайські фірми знизили вартість ФЕП з ККД лише на рівні 18 % більш ніж 1,4 рази, а найближчі три роки вартість буде знижено ще 1,3 рази [5]. Таким чином, економічно доцільно, як вихідні приладові структури використовувати Si-ФЕП китайського виробництва. При цьому актуальним завданням слід вважати аналіз ефективності фотоелектричного перетворення в таких структурах приладів для дослідження можливості підвищення ККД готових ФЕП китайського виробництва понад 20 %.

Методика проведення експерименту. В умовах промислового виробництва при контролі технологічного процесу шляхом аналітичної обробки світлової вольт-амперної характеристики (ВАХ) визначають вихідні параметри ФЕП: напруга холостого ходу (U_{XX}), щільність тока короткого замикання ($J_{KЗ}$), фактор заповнення світлової ВАХ (FF) та коефіцієнт корисної дії (ККД). Однак ці параметри являють собою технічні характеристики приладу, що не мають однозначного зв'язку з фотоелектричними процесами, що визначають роботу ФЕП. Тому поруч із вихідними параметрами необхідно аналізувати світлові діодні характеристики, однозначно визначають однодіодну модель ФЕП [6]. До таких діодних характеристик відносяться щільність фотоструму (J_{Φ}), щільність діодного струму насичення (J_0), коефіцієнт ідеальності (A), шунтуючий ($R_{Ш}$) та послідовний ($R_{П}$) опори, розраховані на одиницю площі ФЕП. Зв'язок ефективності ФЕП зі світловими діодними характеристиками в неявному вигляді описується теоретичною світловою ВАХ ФЕП [6]:

$$J_H = -J_{\Phi} + J_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(U_H - J_H R_{П})}{A k T} \right] - 1 \right\} + \frac{U_H - J_H R_{П}}{R_{Ш}}, \quad (1)$$

де J_H – щільність току, що протікає через навантаження;

e – заряд електрона;

k – стала Больцмана;

T – температура сонячного елемента;

U_H – падіння напруги на навантаженні.

Шляхом апроксимації експериментально отриманих значень I_H та U_H теоретичним виразом (1) можна визначити вихідні параметри, світлові діодні характеристики та ККД ФЕП. Аналітична обробка світлових ВАХ досліджуваних ФЕП проводилася за допомогою персонального комп'ютера за розробленою програмою. Відповідно до програми аналітичний вираз для світлової ВАХ (1) перетворюється на вираз:

$$J_H = A_0 - A_1 U_H - A_2 \exp(A_3 U_H + A_4 U_H), \quad (2)$$

де

$$A_0 = \frac{(J_{\Phi} + J_0) R_{Ш}}{R_{П} + R_{Ш}}; A_1 = \frac{1}{R_{П} + R_{Ш}}; \\ A_2 = \frac{J_0 R_{Ш}}{R_{П} + R_{Ш}}; A_3 = \frac{e}{A k T}, A_4 = \frac{e R_{П}}{A k T}.$$

Використовуючи вираз (2) та експериментально отримані значення J_H та U_H , шляхом варіювання значень, вказаних вище коефіцієнтів A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 , програма здійснює найкращу апроксимацію експериментальних даних $I_H = I_H(U_H)$ кривою, що описується перетвореним теоретичним виразом (2). Зазвичай при аналітичній обробці середньоквадратичне відхилення не перевищує 10^{-8} , що відповідає відносній похибці у визначенні вихідних параметрів та світлових діодних характеристик на рівні не більше 1 %. Після знаходження вказаних коефіцієнтів, що забезпечують найкращу апроксимацію, визначаються вихідні параметри ФЕП: $J_{KЗ}, U_{XX}, FF, ККД$. Світлові діодні характеристики $R_{П}, R_{Ш}, A$ та I_0 обчислюються за знайденими коефіцієнтами A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 . Світлові ВАХ ФЕП вимірювалися за допомогою лабораторного стенду при опроміненні приладових структур імітатором сонячного випромінювання у наземних умовах з потужністю світлового потоку 100 мВт/см². Як джерело, що імітує сонячне випромінювання, була використана галогенова лампа потужністю 1000 Вт, підключена до стабілізованого блоку живлення.

Ефективність фотоелектричних процесів – генерації, дифузії, дрейфу, поділу та збирання генерованих під дією світла нерівноважних носіїв

заряду істотно залежить від часу їхнього життя. Тому під час аналізу ефективності ФЕП ми шляхом спаду напруги холостого ходу визначали час життя нерівноважних носіїв заряду в досліджуваних приладових структурах [7].

Дослідження спектральної залежності коефіцієнта квантової ефективності $Q(\lambda)$ дозволяє аналізувати інтегральну ефективність фотоелектричних процесів залежно від енергії падаючого випромінювання [7]. Тому такі дослідження також є необхідними під час оптимізації КТР ФЕП. Між струмом короткого замикання $I_{КЗ}$ та величиною $Q(\lambda)$ існує функціональний зв'язок, що описується при досить великому шунтуючому опорі $R_{Ш}$ співвідношенням [7]:

$$I_{КЗ} = e \int_0^{\lambda_{КР}} Q(\lambda) \cdot N(\lambda) d\lambda - I_{Д}, \quad (3)$$

де λ – довжина хвилі світла;

$\lambda_{КР}$ – червона межа фотоэффекту;

$N(\lambda)$ – швидкість надходження фотонів на поверхню ФЕП;

$I_{Д}$ – діодний струм ФЕП.

В реальних умовах інтенсивність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню СЕ, така, що при значенні послідовного опору, що спостерігалось, приладової структури $I_{Д} \ll I_{КЗ}$, тому вираз (3) перетворюється до вигляду:

$$I_{КЗ} = Q(\lambda) \cdot N(\lambda). \quad (4)$$

Величина $N(\lambda)$, що входить до рівняння (4) може бути виражена через інтенсивність світла $I_C(\lambda)$, що надходить на поверхню ФЕП:

$$Q(\lambda) = \frac{I_{КЗ}(\lambda) \cdot E(\lambda)}{eS \cdot I_C(\lambda)}. \quad (5)$$

При проведенні досліджень спектральної залежності фотовідгуку ФЕП розміщувався на вихідній щілині подвійного монохроматора та проводився вимір $I_{КЗ}$ при плавній зміні довжини хвилі падаючого випромінювання з наступним розрахунком $Q(\lambda)$, використовуючи співвідношення (5). Інтенсивність світла $I_C(\lambda)$ є характеристикою використовуваного джерела світла як, якого використовувалася 1000 Вт галогенова лампа.

Експериментальні дослідження промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Для досліджень було обрано найефективніші промислові зразки ФЕП китайського виробництва.

Були виміряні світлові ВАХ 10 структур приладів. Результати свідчать про те, що ККД складає від 17,7 % до 18,4 %.

Для аналізу було обрано світлову ВАХ ФЕП з характерним значенням ККД – 18.1% (рис. 1, крива 1).

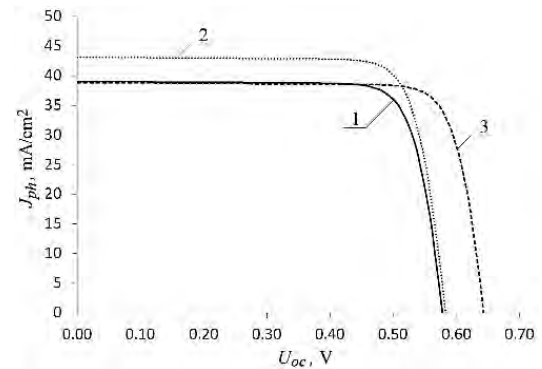
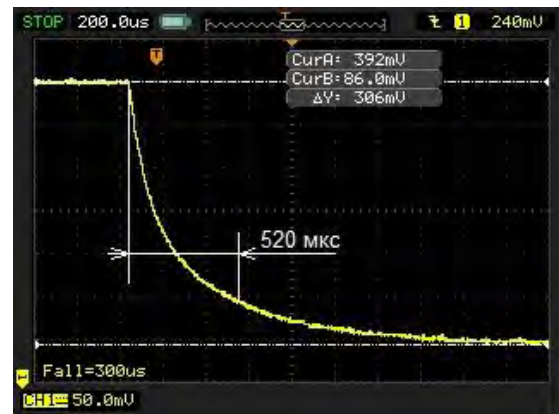
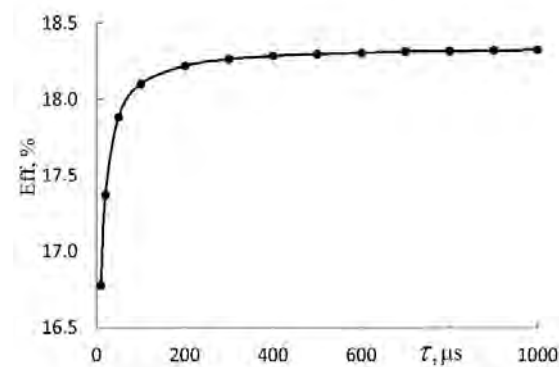


Рисунок 1 – Світлові вольт-амперні характеристики:
1 – вихідна, $J_{\Phi}=39,0$ мА/см², $J_0=5,4 \cdot 10^{-13}$ А/см², ККД=18,02 %
2 – $J_{\Phi}=43,0$ мА/см², $J_0=5,4 \cdot 10^{-13}$ А/см², ККД=20,02 %
3 – $J_{\Phi}=39,0$ мА/см², $J_0=3,1 \cdot 10^{-14}$ А/см², ККД=20,4 %



а)



б)

Рисунок 2 – Дослідження часу життя нерівноважних носіїв заряду у промислових зразках ФЕП китайського виробництва (а) та моделювання впливу часу життя на їх ККД (б)

Аналітична обробка світлової ВАХ дозволила визначити вихідні параметри та світлові діодні характеристики ФЕП (таблиця 1).

Дослідження вихідних параметрів та світлових діодних характеристик були доповнені дослідженнями часу життя. За спадом напруги холостого ходу (див. рис. 2 а) було встановлено, що час життя нерівноважних носіїв заряду становить 520 мкс.

Таблиця 1 – Вихідні параметри та світлові діодні характеристики ФЕП, отримані в результаті експерименту та моделювання

Вихідні параметри та світлові діодні характеристики	Експериментальний зразок	Моделювання впливу J_0	Моделювання впливу J_ϕ	Моделювання впливу J_ϕ і J_0
$J_{кз}$, мА/см ²	39,0	39,0	43,1	43,1
$U_{хх}$, мВ	578	643	583	658
FF , відн. од.	0,80	0,82	0,80	0,82
η , %	18,1	20,4	20,1	23,1
J_ϕ , мА/см ²	38,8	39,0	43,1	43,1
$R_{л}$, Ом·см ²	0,45	0,45	0,45	0,45
$R_{ш}$, Ом·см ²	1013	1013	1013	1013
A , відн. од.	0,9	0,9	0,9	0,9
J_0 , А/см ²	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-14}$	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-14}$

Результати дослідження спектральної залежності коефіцієнта квантової ефективності (рис. 3 крива 1) показують, що спектральний інтервал фоточутливості ФЕП становить 0,42–1,20 мкм. Максимальне значення $Q(\lambda)$ спостерігається у спектральному інтервалі 0,90–1,10 мкм, а починаючи з 0,80 мкм, $Q(\lambda)$ суттєво знижується.

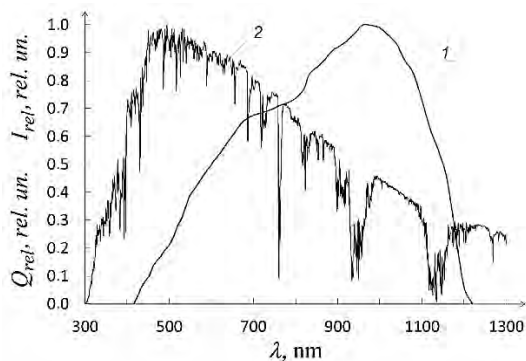


Рисунок 3 – Спектральні залежності коефіцієнта квантової ефективності ФЕП китайського виробництва
1 – $Q(\lambda)$ ФЕП; 2 – сонячний спектр AM1.5G

Моделювання впливу життя нерівноважних носіїв заряду на ефективність промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Оскільки значення ККД досліджуваних промислових зразків китайського виробництва поступалося ефективності кращих промислових зразків європейського виробництва, що перевищує 20 %, то для пошуку шляхів збільшення ККД було проведено чисельне моделювання параметрів досліджених ФЕП за допомогою персонального комп'ютера. Для моделювання використовувалася програма PC1D 5.9, що була у вільному доступі, розроблена в Університеті Нового Південного Уельсу (Австралія).

За допомогою цього програмного забезпечення було створено електронну модель ФЕП. Такі параметри базового кремнієвого кристала ФЕП, як ширина забороненої зони, відносна діелектрична проникність, власна концентрація носіїв заряду,

рухливості електронів і дірок, входили до складу програмного забезпечення PC1D 5.9. Крім того, при моделюванні враховувалися такі характеристики досліджуваних ФЕП як:

- рівень легування базового кристала p -типу, який складав $1,5 \cdot 10^{16}$ см⁻³;
- товщина n^+ -шару 0,1 мкм, p^+ -шару – 1,15 мкм, середній рівень їх легування при *erfc*-розподіленні – 10^{20} см⁻³ і 10^{18} см⁻³, відповідно;
- товщина покриття, що просвітлює, виготовленого з Si₃N₄– 53 нм;
- висота рельєфу хаотично текстурованої фронтальної поверхні – 3 мкм;
- швидкості рекомбінації на фронтальній та тильній поверхнях $S_n = S_p = 10^3$ м/с;
- послідовний та шунтуючий опори, які були визначені шляхом аналітичної обробки експериментальних світлових ВАХ (таблиця 1).

Моделювання роботи ФЕП проводилося для його температури 25 °С у режимі опромінення AM1.5G при енергетичному освітленні фронтальної поверхні 1000 Вт/м². Параметром, що варіюється, в даній моделі був час життя неосновних носіїв заряду, який змінювався від 10 мкс до 1000 мкс.

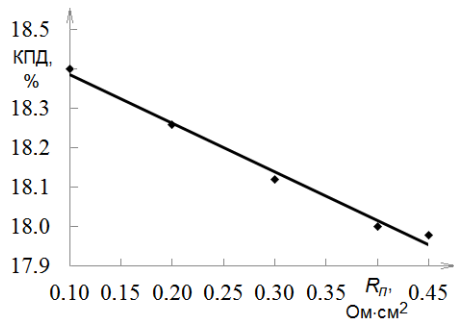
Аналіз отриманих даних (рис. 2 б) показує, що починаючи зі значень часу життя 300 мкс подальше його збільшення не впливає на ККД.

Оскільки для досліджуваних промислових зразків ФЕП експериментальне значення часу життя становило 520 мкс, це свідчить лише тому, що якість базового кристала перестала бути чинником, що обмежує ККД досліджуваних ФЕП лише на рівні 18 %.

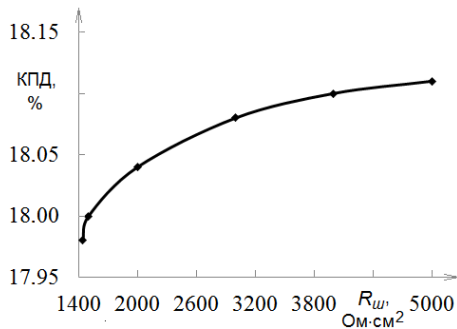
Моделювання впливу світлових діодних показників на ефективність промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Аналізуючи вираз (1), можна показати, що про зростанні J_ϕ , $R_{ш}$ та при зменшенні J_0 , A , $R_{л}$ ефективність ФЕП збільшується. Однак для ідентифікації фізичних механізмів, що визначають ККД ФЕП, корисніше встановлювати кількісний зв'язок між ефективністю приладової структури та її світловими діодними характеристиками. Це дозволяє визначати домінуючі світлові діодні характеристики, зміна яких за зміни КТР ФЕП обумовлює зміну його ККД.

В результаті з'являється можливість суттєво зменшити обсяг подальших експериментальних досліджень щодо встановлення фізичних закономірностей впливу КТР на ефективність ФЕП.

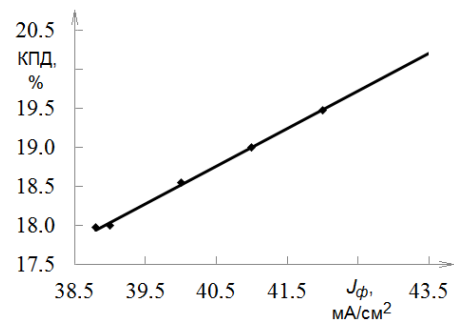
Тож у дослідженні, використовуючи розроблену комп'ютерну програму, проводилося моделювання впливу зміни кожної із світлових діодних характеристик ФЕП на ефективність. При цьому всі світлові діодні характеристики ФЕП, крім однієї, фіксуються, а саме світлова діодна характеристика набуває значення обраного інтервалу.



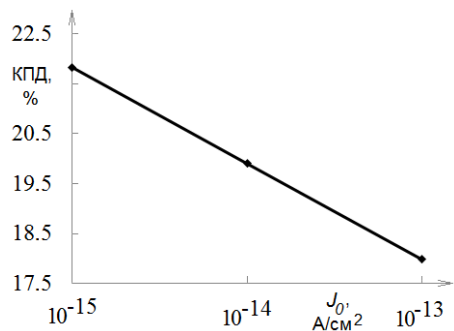
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Моделювання впливу послідовного опору (а), шунтуючого опору (б), щільності фотоструму (в) та щільності діодного струму насичення (з) на КПД Si-ФЕП китайського виробництва

За набором світлових діодних характеристик, відповідно до виразу (1), програма розраховувала теоретичну світлову ВАХ та визначала КПД. Потім вибирається таке значення світлової діодної характеристики вибраного інтервалу та розраховується наступна теоретична світлова ВАХ, з якої визначається

ККД. В результаті ми отримуємо теоретичну залежність ККД від зміни в обраному діапазоні однієї діодної характеристики при фіксованих інших. Подібне моделювання повторюється кожної світлової діодної характеристики ФЕП. Аналізуючи теоретичні залежності ККД від зміни світлових діодних характеристик, ми оцінювали кількісний внесок зміни кожної із світлових діодних характеристик у можливість досягнення ККД понад 20 %.

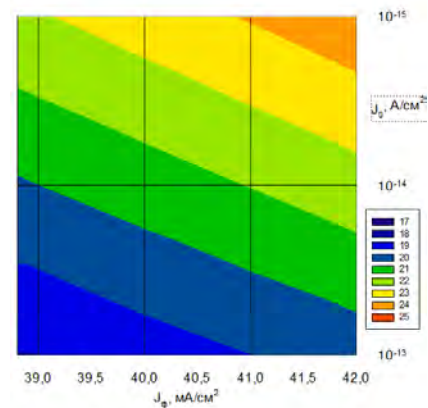
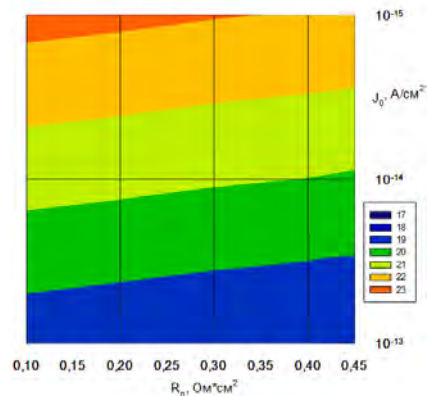
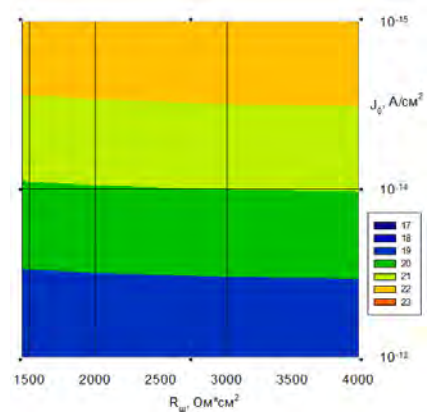


Рисунок 5 – Побудовані за результатами моделювання діаграми розподілу КПД досліджуваних ФЕП

Результати моделювання показують, що збільшення шунтуючого опору та зниження послідовного опору при фіксованих інших діодних характеристиках для ФЕП з ККД 18,1 % не призводить до суттєвого збільшення ефективності (рис. 4 а і б). Так

зростання шунтуючого опору від $R_{III} = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ до $R_{III} = 4000 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ обумовлює зростання ефективності на 0,1 %. Зниження послідовного опору від $R_{II} = 0,45 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ до $R_{II} = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ призводить до зростання ККД на 0,5 %.

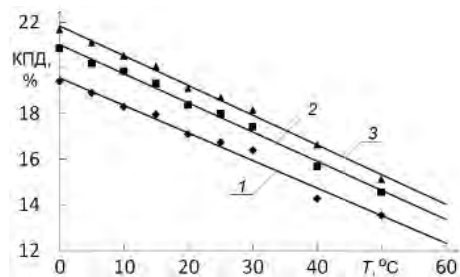
Згідно з експериментальними даними (рис. 3), короткохвильова межа fotocутливості досліджених зразків ФЕП становить 0,42 мкм, тому в приладових структурах не перетворюється ультрафіолетова частина спектра. Тому зростання щільності фотоструму для досліджуваних ФЕП може бути отримане при нанесенні на поверхню готової структури приладової люмінесцентного покриття. Таке покриття поглинає фотони в ультрафіолетовій частині сонячного спектра та генерує фотони в інфрачервоній частині сонячного спектра. Найбільш оптимальним для промислових зразків ФЕП китайського виробництва є економічний хімічний метод, за допомогою якого наноситься, люмінесцентне покриття на основі квантових точок сульфідів свинцю [8]. Такі квантові точки поглинають світло у спектральному діапазоні 0,30–0,40 мкм та генерують фотони з довжиною близько 1,05 мкм [8], що відповідає області максимальних експериментальних значень квантової ефективності, досліджених у роботі ФЕП (рис. 3). Згідно з результатами моделювання, представленими в роботі [8] використання таких люмінесцентних покриттів теоретично дозволяє збільшити вихідну щільність струму короткого замикання більш ніж в 1,1–1,2 рази, що, згідно з результатами проведених нами досліджень, достатньо для досягнення ККД у промислових зразків ФЕП китайського виробництва понад 20 %.

Експериментальні дослідження впливу температури на вихідні параметри і світлові діодні характеристики промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Аналіз показує, що зі зростанням температури спостерігається практично лінійне зниження ККД (рис. 6 а). При цьому коефіцієнт зниження, який описує відносну зміну ККД при зміні температури на один градус, складає $0,7 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$.

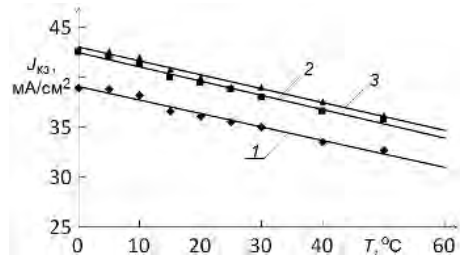
Для напруги холостого ходу і щільності струму короткого замикання також спостерігається зниження їх величини при збільшенні робочої температури (рис. 6 б і в). Було експериментально встановлено, що чинник заповнення світлових ВАХ практично не змінюється зі зростанням температури.

Аналіз світлових діодних характеристик показує, що зафіксоване зниження ККД обумовлено збільшенням щільності діодного струму насичення (рис. 7 а) і зниженням шунтуючого опору (рис. 7 б).

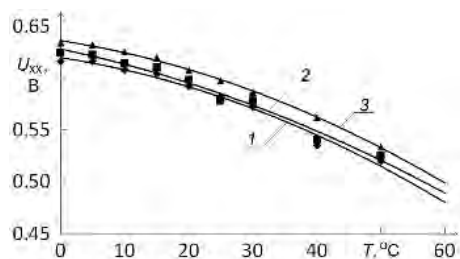
Отримані експериментальні результати лише частково можуть бути прокоментовані в рамках традиційних уявлень про вплив температури на ефективність фотоелектричних процесів в ФЕП, які в узагальненому вигляді викладені в [7].



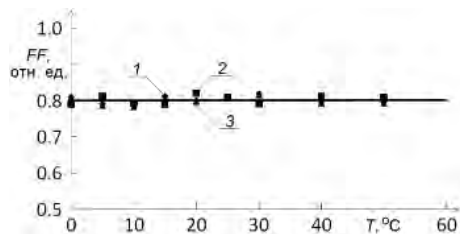
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Вплив робочої температури на ККД (а), щільність струму короткого замикання (б), напругу холостого ходу (в) та фактор заповнення світлової ВАХ (г) досліджуваних ФЕП:

зразок 1 з ККД = 16,7 % при температурі 25 °C;
зразок 2 з ККД = 18,1 % при температурі 25 °C;
зразок 3 з ККД = 18,7 % при температурі 25 °C

Згідно з традиційним уявленням, яке відповідає експериментальним дослідженням ФЕП при збільшенні температури дифузійна довжина нерівноважних носіїв в Si зростає. Це обумовлено тим, що коефіцієнт дифузії не змінюється або збільшується, а час життя неосновних носіїв зростає при підвищенні температури. Збільшення дифузійної довжини неосновних носіїв приводить до зростання щільності струму короткого замикання при збільшенні температури. Проте цей ефект незначний і складає порядку $0,07 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Зниження напруги холостого ходу значно перевищує збільшення щільності струму короткого замикання і складає $0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Плавніша

форма світловий ВАХ при підвищених температурах призводить до зменшення чинника заповнення світловий ВАХ. Тому в цілому підвищення температури призводить до відносного зниження ККД на 0,5 %/°C.

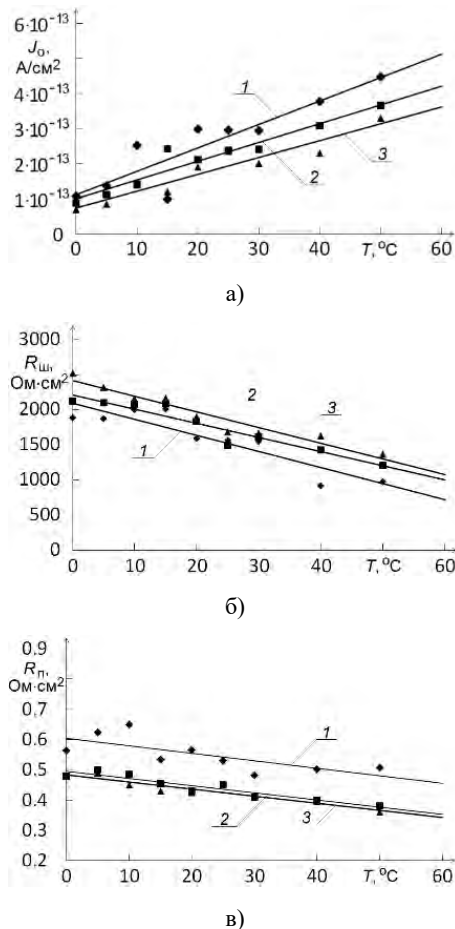


Рисунок 7 – Вплив робочої температури на щільність діодного струму насичення (а), шунтуючий (б) та послідовний (в) опору досліджуваних Si-ФЕП: зразок 1 з ККД = 16,7 % при температурі 25 °C; зразок 2 з ККД = 18,1 % при температурі 25 °C; зразок 3 з ККД = 18,7 % при температурі 25 °C

Згідно з отриманими експериментальними даними у ФЕП китайського виробництва відносно зниження ККД вище і складає 0,7 %/°C. При цьому щільність струму короткого замикання знижується, а чинник заповнення світлових ВАХ практично не змінюється.

Згідно з існуючими фізичними уявленнями щільність діодного струму насичення є найважливішою світловою діодною характеристикою, яка контролює зміну вихідних параметрів ФЕП при зміні робочої температури. Без врахування шунтуючого і послідовного опору теоретичний вираз для щільності діодного струму насичення має вигляд [2]:

$$J_0 = C \cdot T^3 \exp \left(-qE_g/kT \right), \quad (6)$$

де C – параметр, який змінюється при зміні робочої температури T ,

q – заряд електрона,

E_g – ширина забороненої зони.

У цій роботі було показано, що при $C \cdot T^3 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ спостерігається найкраща відповідність між експериментальними температурними змінами вихідних параметрів і їх теоретичними залежностями. Оскільки $C \cdot T^3$ є константою, то експоненціальне збільшення щільності діодного струму насичення свідчить про те, що основним фізичним механізмом збільшення J_0 є термічно активоване зростання концентрації носіїв заряду. Оскільки експериментальні залежності $J_0(T)$ не лінеаризуються в координатах $\ln J_0 - 1000/T$, то вказаний вище механізм не є єдиним. Не його існування вказує зафіксоване експериментальне нетрадиційне зниження щільності струму короткого замикання із зростанням робочої температури. Оскільки експериментальні залежності $J_0(T)$ не лінеаризуються в координатах $\ln J_0 - 1000/T$, то вказаний вище механізм не єдиний. На його існування вказує зафіксоване експериментальне нетрадиційне зниження щільності струму короткого замикання зі зростанням робочої температури.

Аналіз діодних характеристик показує, що аномальне високе зниження ККД і нетрадиційне зменшення щільності струму короткого замикання обумовлене зафіксованим експериментальним зменшенням шунтуючого опору. Струм по ділянках високої провідності зменшує величину внеску фотоструму в струм короткого замикання і є додатковим фізичним механізмом, що знижує ККД. Моделювання впливу зростання щільності діодного струму насичення і зниження шунтуючого опору (рис. 7 а і б) показало, що вони співрозмірні.

Оскільки в ході досліджень було експериментально встановлено високу швидкість зниження КПД ФЕП китайського виробництва, то це в процесі експлуатації нівелює їх досить високі вихідні параметри і обумовлює доцільність їх використання у складі фотоелектричного теплового модуля (PV/T), який представляє гібрид ФЕП і сонячного колектора і дозволяє за рахунок циркуляції теплоносія забезпечувати охолодження кремнієвої приладової структури. Залежно від необхідних технологічних вимог вироблено три основні режими роботи PV/T [8]: забезпечення максимально ефективного вироблення електроенергії, забезпечення максимальної ефективності теплової енергії і забезпечення максимальної сумарної ефективності. У [9] розроблено конструкції, які для забезпечення максимальної електричної потужності забезпечують можливість теплового відходу від лицьової поверхні ФЕП в довкілля і від тильної сторони до контура теплоносія. Основною особливістю конструкції модуля, що відповідає даному режиму роботи, є відсутність повітряного прошарку між ФЕП і світлопрозорим покриттям. При даному режимі роботи температура теплоносія в контурі має бути не більш 35 °C. Але оскільки рідина, що нагрівається модулем, має низьку

температуру, то потрібне її подальше підігрівання, що призводить до необхідності в додатковому устаткуванні. Так, наприклад, такий режим роботи PV/T забезпечує комбінована система гарячого водопостачання, опалювання і кондиціонування на основі теплового насоса і PV/T.

Висновки. Було показано, що реалізовані для промислових зразків Si-ФЕП китайського виробництва часи життя нерівноважних носіїв заряду, що становлять 520 мкс, не обмежують можливості збільшення їх ККД понад 20 %. Досягнуті величини послідовного та шунтуючого опору промислових зразків Si-ФЕП китайського виробництва, які складають 0,45 Ом·см² та 1000 Ом·см², відповідно, не потребують подальшої оптимізації. Показано, що збільшення щільності фотоструму від 39,0 мА/см² до 43,1 мА/см² у промислових зразках Si-ФЕП китайського виробництва без зміни інших діодних характеристик призводить до зростання ефективності до 20,1 %. Для подібного підвищення щільності фотоструму на поверхні готової приладової структури необхідно формувати люмінесцентні покриття, що містять квантові точки сульфиду свинцю. Встановлено, що зниження щільності діодного струму насичення від $5,4 \cdot 10^{13}$ А/см² до $3,1 \cdot 10^{-14}$ А/см² у промислових зразків Si-ФЕП китайського виробництва без зміни інших діодних характеристик призводить до зростання ефективності до 20,4 %. Можливими фізико-технологічними підходами зменшення щільності діодного струму насичення готових ФЕП є нанесення плазмонних покриттів чи обробка приладових структур у магнітному полі. Одночасне збільшення щільності фотоструму та щільності діодного струму насичення до зазначених вище значень дозволяє збільшити ККД до 23,1 %.

Дослідження впливу робочої температури на ефективність кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва показало, що зі зростанням робочої температури зниження ККД складає 0,07 %/°C, що істотно вище, ніж в приладових структурах європейського і вітчизняного виробництва і обумовлено нетрадиційним зниженням щільності струму короткого замикання. Ідентифікована температурна залежність ККД свідчить про доцільність використання фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва в конструкції фотоелектричної теплової установки, яка разом з тепловим насосом входить до складу комбінованої системи гарячого водопостачання, опалювання і кондиціонування.

Список літератури

1. Razykov T. M., Ferekides C. S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H. S., Upadhyaya H. M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*. 2011. Vol. 85, no. 8. P. 1580–1608. doi: 10.1016/j.solener.2010.12.002.
2. Rehman A., Lee S. H. Advancements in n-Type Base Crystalline Silicon Solar Cells and Their Emergence in the Photovoltaic Industry.

Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. P. 1–13. doi: 10.1155/2013/470347.

3. Binetti S., Acciarri M., Le Donne A., Morgano M., Jestin Y. Key Success Factors and Future Perspective of Silicon-Based Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*. 2013. Vol. 2013. P. 1–6. doi: 10.1155/2013/249502.
4. Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*. 2010. Vol. 2, no. 3. P. 96–102. doi: 10.1038/asiamat.2010.82.
5. Bye G., Ceccaroli B. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014. Vol. 130. P. 634–646. doi: 10.1016/j.solmat.2014.06.019.
6. Möller H. J. *Semiconductors for solar cells*. Boston: Artech House, 1993.
7. Raushenbach H. S. *Solar Cells Array Design*. New York: Litton Education Publishing, 1980.
8. Shcherbatyuk G. V., Inman R. H., Wang C., Winston R., Ghosh S. Viability of Using Near Infrared PbS Quantum Dots as Active Materials in Luminescent Solar Concentrators. *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96, no. 19. P. 191901–191903. doi: 10.1063/1.3422485
9. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells. *Optics Express*. 2008. Vol. 16, no. 26. P. 21793–21800. doi: 10.1364/oe.16.021793.
10. Макара В. А., Васильев М. А., Стебленко Л. П., Коплак О. В., Курлюк А. Н., Кобзарь Ю. Л., Науменко С. Н. Вызванные действием магнитного поля изменения примесного состава и микротвердости приповерхностных слоев кристаллов кремния. *Физика и техника полупроводников*. 2008. Т. 42. Вып. 9. С. 1061–1064.

References (transliterated)

1. Razykov T. M., Ferekides C. S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H. S., Upadhyaya H. M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*. 2011, vol. 85, no. 8, pp. 1580–1608. doi: 10.1016/j.solener.2010.12.002.
2. Rehman A., Lee S. H. Advancements in n-Type Base Crystalline Silicon Solar Cells and Their Emergence in the Photovoltaic Industry. *Scientific World Journal*. 2013, vol. 2013, pp. 1–13. doi: 10.1155/2013/470347.
3. Binetti S., Acciarri M., Le Donne A., Morgano M., Jestin Y. Key Success Factors and Future Perspective of Silicon-Based Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*. 2013, vol. 2013, pp. 1–6. doi: 10.1155/2013/249502.
4. Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*. 2010, vol. 2, no. 3, pp. 96–102. doi: 10.1038/asiamat.2010.82.
5. Bye G., Ceccaroli B. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014, vol. 130, pp. 634–646. doi: 10.1016/j.solmat.2014.06.019.
6. Möller H. J. *Semiconductors for solar cells*. Boston: Artech House, 1993.
7. Raushenbach H. S. *Solar Cells Array Design*. New York: Litton Education Publishing, 1980.
8. Shcherbatyuk G. V., Inman R. H., Wang C., Winston R., Ghosh S. Viability of Using Near Infrared PbS Quantum Dots as Active Materials in Luminescent Solar Concentrators. *Applied Physics Letters*. 2010, vol. 96, no. 19, pp. 191901–191903. doi: 10.1063/1.3422485
9. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells. *Optics Express*. 2008, vol. 16, no. 26, pp. 21793–21800. doi: 10.1364/oe.16.021793.
10. Makara V. A., Vasil'ev M. A., Steblenko L. P., Koplak O. V., Kurilyuk A. N., Kobzar' Yu. L., Naumenko S. N. Vyzvannye deystviem magnitnogo polya izmeneniya primesnogo sostava i mikrotverdosti pripoverkhnostnykh sloev kristallov kremniya [Changes in the impurity composition and microhardness of the near-surface layers of silicon crystals caused by the action of a magnetic field]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2008, vol. 42, no. 9, pp. 1061–1064.

Надійшла (received) 07.10.2021

Зайцев Роман Валентинович (Зайцев Роман Валентинович, Roman Zaitsev) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-8452>; e-mail: roman.zaitsev@khpi.edu.ua.

Кіриченко Михайло Валерійович (Кириченко Михаил Валерьевич, Mykhailo Kirichenko) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4847-506X>; e-mail: mykhailo.kirichenko@khpi.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна (Минакова Ксения Александровна, Kseniia Minakova) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-1082>; e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua.

Дроздов Антон Миколайович (Дроздов Антон Николаевич, Anton Drozdov) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5736-0697>; e-mail: anton.drozdov@khpi.edu.ua.

Шкода Дмитро Сергійович (Шкода Дмитрий Сергеевич, Dmytro Shkoda) – аспірант кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-9755>; e-mail: dmytro.skoda@khpi.edu.ua.

***В. М. ЗОЛОТАРЬОВ, С. Ю. АНТОНЕЦЬ, А. Л. ОБОЗНИЙ, Ю. П. АНТОНЕЦЬ, Ю. Г. ГОНТАР,
Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. Г. КЕССАЄВ***

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ІЗ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

В роботі розглянуто сучасний нормативний підхід до визначення навантажувальної здатності силових кабелів зі зшитю поліетиленовою ізоляцією та запропоновано застосування моделі визначення допустимих струмових навантажень конкретного кабелю середньої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену для дослідження його перевантажувальної здатності в умовах виробництва, розглянуто результати її експериментальної перевірки. Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену мають безперечні переваги перед традиційними маслоснаповненими, що зумовило їх повсюдне застосування у всіх розвинених країнах і помітне скорочення використання інших типів кабелю. Актуальність дослідження зумовлена зміною методів випробування напругою кабелів зі зшитю поліетиленовою ізоляцією в усьому світі. В стаціонарному тепловому режимі (100 % коефіцієнт навантаження) за діючими міжнародними стандартами ІЕС (серія 60287) навантажувальну здатність визначають як гранично допустимий (номінальний) струм, який залежить від теплофізичних параметрів конкретного кабелю і від нормованих теплофізичних параметрів навколишнього середовища. Запропоновано використання математичної моделі, яка за рахунок поєднання конструктивних і теплофізичних параметрів конкретного кабелю з умовами зовнішнього середовища при прокладанні в повітрі, дозволяє визначити параметри стаціонарного теплового режиму кабелю за будь-якого тривалого струму навантаження. Показана можливість побудови номограм для визначення параметрів допустимих перевантажень кабелів зі зшитю поліетиленовою ізоляцією середньої напруги в діапазоні тривалих струмових навантажень в експлуатації. Робота спрямована на подальше дослідження конструкції зовнішніх захисних покривів кабелю зі зшитю поліетиленовою ізоляцією на динаміку його нагрівання з метою створення методу випробувань на перевантажувальну здатність конкретного кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену в умовах виробництва.

Ключові слова: силовий кабель середньої напруги, ізоляція зі зшитого поліетилену, пропускна здатність, модель теплового балансу, допустимий струм, теплофізичні параметри.

***В. М. ЗОЛОТАРЕВ, С. Ю. АНТОНЕЦ, А. Л. ОБОЗНИЙ, Ю. А. АНТОНЕЦ, Ю. Г. ГОНТАРЬ,
Л. А. ЩЕБЕНЮК, А. Г. КЕССАЕВ***

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ СО СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В работе рассмотрен современный нормативный подход к определению нагрузочной способности силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией и предложено применение модели определения допустимых токовых нагрузок конкретного кабеля среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена для исследования его перегрузочной способности в условиях производства. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют несомненные преимущества перед традиционными маслоснаполненными, что обусловило их повсеместное применение во всех развитых странах и заметное сокращение использования других типов кабелей. Актуальность исследования обусловлена изменением методов испытания напряжением кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией во всем мире. В стационарном тепловом режиме (100% коэффициент нагрузки) по действующим международным стандартам ІЕС (серия 60287) нагрузочную способность определяют как предельно допустимый (номінальний) ток, который зависит от теплофизических параметров конкретного кабеля и от нормированных теплофизических параметров окружающей среды. Предложено использование математической модели, которая за счет сочетания конструктивных и теплофизических параметров конкретного кабеля с условиями внешней среды при прокладке в воздухе позволяет определять параметры стационарного теплового режима кабеля при любом длительном нагрузочном токе. Показана возможность построения номограмм для определения параметров допустимых нагрузок кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией среднего напряжения в диапазоне длительных токовых нагрузок в эксплуатации. Работа направлена на дальнейшие исследования конструкции внешних защитных слоев кабеля со сшитой полиэтиленовой изоляцией на динамику его нагрева с целью создания метода испытаний на перегрузочную способность конкретного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в условиях производства.

Ключевые слова: силовой кабель среднего напряжения, изоляция из сшитого полиэтилена, пропускная способность, модель теплового баланса, допустимый ток, теплофизические параметры.

***V. ZOLOTAROV, S. ANTONETS, A. OBOZNYI, YU. ANTONETS, YU. GONTAR, L. SHCHEBENIUK,
O. KIESSAIEV***

RESEARCH OVERLOAD CAPABILITY POWER CABLES MEDIUM VOLTAGE OF XLPE INSULATION

The modern normative approach to determining the load capacity of power cables with cross-linked polyethylene insulation is considered and the application of the model of determining the allowable current loads of a specific medium voltage cable with cross-linked polyethylene insulation to study its overload capacity in production conditions. Power cables with cross-linked polyethylene insulation have clear advantages over traditional oil-filled ones, which has led to their widespread use in all developed countries and a significant reduction in the use of other types of cable. The relevance of the study is due to changes in voltage testing methods of cables with cross-linked polyethylene insulation around the world. In stationary thermal mode (100% load factor) according to current international standards IEC (series 60287) load capacity is defined as the maximum allowable (rated) current, which depends on the thermophysical parameters of a particular cable and the normalized thermophysical parameters of the environment. The use of mathematical model is proposed, which due to the combination of structural and thermophysical parameters of a particular cable with environmental conditions during laying in air allows to determine the parameters of stationary thermal regime of the cable for any long load current. The possibility of constructing nomograms for determining the parameters of permissible loads of cables with cross-linked polyethylene insulation of medium voltage in the range of long-term current loads in operation is shown. The work is aimed at further studies of the design of the outer protective coatings of cable

© В. М. Золотарьов, С. Ю. Антонєць, А. Л. Обозний, Ю. П. Антонєць, Ю. Г. Гонтар, Л. А. Щєбенюк, О. Г. Кєссаєв, 2021

with cross-linked polyethylene insulation on the dynamics of its heating in order to create a method of testing the overload capacity of a particular cable with cross-linked polyethylene insulation in production conditions.

Keywords: medium voltage power cable, cross-linked polyethylene insulation, transmission capacity, thermal balance model, allowable current, thermophysical parameters.

Вступ. Кабельні лінії середньої напруги є основою систем електропостачання промислових підприємств, комунальних та побутових об'єктів [1–4]. Тенденції їх розвитку полягають у використанні в електричних мережах силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) [2,5]. Такі кабелі мають ряд особливостей, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації:

- більша, ніж у традиційних маслонаповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °С), що зумовлює залежність процесу нагрівання кабелю від теплофізичних параметрів елементів конструкції і суттєве збільшення навантажувальної здатності [6, 7];

- суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури (питома теплоємність поліетилену при температурі 20 °С складає 2300 Дж/кг·°С, а при 80 °С – 3750 Дж/кг·°С) та наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до 50 °С·м/Вт), що змінює тепловий режим роботи ізоляції порівняно з режимом роботи традиційних маслонаповнених кабелів [7–10].

Ці особливості створюють додаткові проблеми при визначенні допустимих струмових навантажень в умовах експлуатації, які для маслонаповнених кабелів вирішувались на основі майже півторастолітнього досвіду їх дослідження і експлуатації [4, 6, 12, 15].

Застосування більш нагрівостійкої твердої полімерної ізоляції в високовольтних кабелях змінило не тільки тепловиділення в жилі і температуру ізоляції, змінилися електрофізичні і теплофізичні процеси в ізоляції. Зокрема в макроскопічно однорідному твердому полімері під дією сильного постійного електричного поля утворюються об'ємні електричні заряди, що в свою чергу повністю змінило методи випробування напругою ЗПЕ-кабелів в усьому світі [9, 11–15].

Саме особливості електрофізичних і теплових процесів в макроскопічно однорідному твердому полімері разом із значним підвищенням допустимої температури ізоляції зумовили те, що в ізоляції ЗПЕ-кабелю зосереджено дію максимальних енергетичних впливів, теплового, електричного і механічного, при цьому внутрішні механічні напруження в полімерах зумовлені, в першу чергу саме різницею температур в об'ємі полімеру [7, 9, 11, 13].

Тому для сучасних ЗПЕ-кабелів основною науковою проблемою є дослідження процесів одночасного впливу максимальних енергетичних навантажень (теплового, електричного і механічного) на макроскопічно однорідний твердий полімер в умовах експлуатації. Нерозривною з нею є проблема визначення граничних струмових навантажень на кабель із зшитою поліетиленовою ізоляцією в умовах виробництва і експлуатації [13, 18, 19, 21]. Ця проблема

може вирішуватись тільки на основі універсальної моделі теплового балансу: гранично допустима потужність тепловиділення обмежена потужністю, що може бути відведена в оточуюче середовище [10, 14–15]. Саме тепловий баланс визначає допустимі теплові й електричні навантаження [7].

Тому дослідження перевантажувальної здатності ЗПЕ-кабелів є необхідним для вирішення наукових і технічних проблем впровадження інноваційної для вітчизняної кабельної техніки продукції.

Аналіз літератури. Одночасний вплив максимальних енергетичних навантажень (теплового, електричного і механічного) на реальний типовий ЗПЕ-кабель аналізують емпірично шляхом співставлення розрахованих граничних струмових навантажень з результатами тривалих випробувань за цих навантажень: випробування long term test [4, 7, 19, 20]. Такі випробування є тривалими і дорогими, відповідно до них ЗПЕ-кабелі піддають сотням циклів нагріву з одночасною дією напруги, в процесі дії циклів нагріву контролюють всі основні параметри:

- електричні (тангенс кута діелектричних втрат, рівень часткових розрядів);
- теплові (температура в елементах конструкції кабелю і на його поверхні).

В той же час пропускна спроможність силових кабелів визначається виключно розрахунком в номінальних умовах, тобто в стаціонарному режимі навантаження (100 % коефіцієнт навантаження) [7, 8]. Відповідно, номінальний струм I_n – необмежене тривалий, за якого встановлюється максимальна температура жили при номінальних умовах оточуючого середовища [7, 8, 13].

Оскільки в умовах експлуатації кабель практично ніколи не працює в стаціонарному гранично допустимому режимі, то для перевірки працездатності конкретних кабелів використовують або спеціальні лабораторії [10, 20], або кабель приймають під гарантії виробника. Останнє означає необхідність відповідних досліджень у виробника.

Очевидно, що нормовані розрахунки є необхідними, але для інноваційної продукції, яка суттєво відрізняється від традиційної, використання тільки нормованих методів є недостатнім. Наприклад, в роботі [11] запропоновано метод використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей. Показано, що для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові параметри кабелю [7, 11, 13].

Мета роботи. Розробити і перевірити експериментально в умовах виробництва модель визначення допустимих струмових перевантажень конкретного кабелю середньої напруги з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Одержані результати. В основу визначення граничних струмових навантажень на кабель із зшитого поліетиленовою ізоляцією покладено аналогію процесів тепломасообміну, зокрема процесів перенесення зарядів і процесу перенесення тепла [7, 13]. Відповідні моделі однакові за своєю структурою, вони включають базові різницю потенціалів (електричних чи теплових), потік, опір, провідність. Відповідно всі інші елементи моделей, що описують той чи інший процес, є похідними від цих величин, і математичний опис того чи іншого процесу в системі диференціальних рівнянь є досить універсальним та уніфікованим [13, 16]. Саме цей підхід застосовано в усіх модифікаціях розрахункових моделей граничного струмового навантаження конкретних конструкцій силових кабелів в діючих міжнародних стандартах [8, 20].

Розрахунок потужності тепловиділення кабелю, що складається з втрат в жилі, діелектричних втрат та електромагнітних втрат в металевих захисних елементах конструкції визначений нормативною міжнародною документацією для широкого спектру конкретних конструкцій силових кабелів [8]. При використанні [8] для ЗПЕ-кабелю діелектричними втратами за промислової частоти (десяті долі Вт/м) можна знехтувати порівняно із втратами в жилі (кілька сотень Вт/м) [13]. Відтак потужність тепловиділення кабелю P_k є сумою втрат в жилі P_g і в металевих елементах конструкції, серед яких обов'язковим є мідний екран, втрати в якому пропорційні втратам в жилі, оскільки за своєю природою є індукційними втратами:

$$P_k = P_g + P_c = I^2 R_g(\Theta_g) + I^2 R_g(\Theta_g) k_c, \quad (1)$$

де k_c – коефіцієнт взаємодіяння між жилою та екраном, $k_c = P_c / P_g = \omega^2 M^2 R_c / (R_c^2 + \omega^2 M^2) R_g$;

ω – кругова частота;

R_c – електричний опір мідного екрану за температури екрану в даному режимі навантаження;

$R_g(\Theta_g)$ – електричний опір жили за температури жили в даному стаціонарному режимі навантаження [13].

Для розрахунку потужності теплового потоку, який може бути переданий від кабелю до оточуючого середовища є застосовними методи розрахунку електричних ланцюгів [9, 10]. Якщо елементи конструкції кабелю – це послідовно нанесені радіальні шари різних матеріалів, а границі між ними є ізотермами, то різниця температур τ_i (різниця потенціалів) на i -му елементі конструкції дорівнює добутку потужності теплового потоку P_i через цей елемент на його тепловий опір S_i : $\tau_i = P_i \cdot S_i$, а сума різниць температур на всіх коаксіальних n -елементах конструкції є різницею температур між жилою Θ_g і поверхнею кабелю Θ_s :

$$\Theta_g - \Theta_s = \sum P_i \cdot S_i, \text{ де } i = 1 \dots n. \quad (2)$$

Формула (2) визначає різницю температур між жилою Θ_g і поверхнею кабелю Θ_s для конструкцій ЗПЕ-кабелю без металеві герметизуючої оболонки і металеві броне [7,13]. Відповідно для одножильного кабелю застосовна відома нормативна формула для визначення граничного струмового навантаження I в стаціонарному тепловому режимі і при температурі оточуючого середовища Θ_o [8]:

$$I = \{(\Theta_g - \Theta_o) / R_g(\Theta_g) \cdot [S_1 + (1 + k_c)(S_2 + S_3)]\}^{0.5} \quad (3)$$

де S_1, S_2, S_3 – відповідно теплові опори ізоляції, захисних покривів і оточуючого середовища.

Визначення теплових опорів елементів конструкції кабелю як послідовно нанесених радіальних шарів різних матеріалів, границі між якими є ізотермами, основане на відомій моделі радіального теплового потоку. Але тепловий потік від поверхні кабелю до оточуючого середовища, наприклад повітря, не є ні симетричним, ні стабільним в часі чи в просторі [18]. Він включає процеси теплопередачі через теплопровідність (міжмолекулярний процес передачі тепла), конвективний теплообмін (перемішування часток речовини з різною температурою в просторі), випромінювання (передача електромагнітної енергії від більш нагрітого тіла) [16, 18].

Наприклад, для визначення коефіцієнту теплопередачі з поверхні силових кабелів у повітрі є рекомендації відповідних міжнародних стандартів у вигляді емпіричних графічних залежностей ключових теплофізичних параметрів від конкретних умов прокладання кабелю в повітрі [8, 19]. Тому визначення потужності теплового потоку, який може бути переданий з поверхні кабелю в оточуюче середовище в кожному конкретному випадку має бути перевірено і розрахунком, і експериментально, а особливо для інноваційних конструкцій з суттєвими конструктивними і теплофізичними особливостями.

Наприклад, в [11] для конкретного високовольтного ЗПЕ-кабелю на напругу 110 кВ прокладеного експериментально показано, що для кабелів відносно великого діаметру коефіцієнт теплопередачі α з поверхні горизонтально розташованого кабелю у повітрі визначається як конвекцією, так і випромінюванням (внеском випромінювання в охолодження кабелю в повітрі не можна знехтувати [7, 11]). Значення α є залежним нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$, і не може бути використаним в теплових розрахунках кабелю як незмінний параметр. Відповідно тепловий опір повітря, який загалом визначають відомою формулою

$$S_3 = (\pi d \alpha)^{-1}, \quad (4)$$

де d – діаметр кабелю, який теж залежить нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ [7].

Тобто застосовними є рекомендації міжнародної електротехнічної комісії [8] визначати коефіцієнт

теплопередачі α з поверхні кабелю як функцію двох параметрів:

$$\alpha = h \cdot \Delta\theta_s^m, \quad (5)$$

де h – коефіцієнт теплового розсіяння з поверхні кабелю, Вт/м²К^{5/4};

$\Delta\theta_s = \theta_s - \theta_0$ – різниця температур поверхні кабелю і довкілля.

Відповідно до двох основних процесів охолодження кабелю в повітрі (конвективного теплообміну і випромінювання) α може бути представлене сумою відповідно до нормативної формули (5) [7, 8, 13]:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_b = (h_k + h_b) \cdot \Delta\theta_s^m, \quad (6)$$

де α_b – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням;

α_k – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, інтенсивність якої характеризує спеціальний критерій Нуссельта Nu :

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda/d,$$

де d – діаметр циліндричного горизонтально розташованого твердого тіла;

λ – питома теплопровідність повітря, $\lambda = 0,025$ Вт/(м·К),

Значення Nu в свою чергу визначається порядком добутку двох інших теплофізичних критеріїв, – Грасгофа Gr і Прандтля Pr , значення яких традиційно використовують для визначення параметрів охолодження кабелів у повітрі [13]:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda/d = C_1 (Gr \cdot Pr)^m \cdot \lambda/d; \quad (7)$$

$$Gr = \beta \cdot \Delta\theta_s \cdot d^3 \cdot g / \nu^2; \quad (8)$$

$$Pr = \nu \cdot c / \lambda, \quad (9)$$

де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря, $\beta = 1/T_{cp}$, К⁻¹, де T_{cp} – середня абсолютна температура повітря;

$\Delta\theta_s$ – різниця температур поверхні кабелю θ_s і довкілля θ_0 : $\Delta\theta_s = \theta_s - \theta_0$;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

ν – кінематична в'язкість повітря, $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

c – питома теплоємність повітря, $c = 1,01 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

C_1, m – параметри критерію Нуссельта, які залежать від добутку критерію Грасгофа Gr і Прандтля Pr і дорівнюють $C_1 = 0,54$; $m = 0,25$ [7, 13].

Спільний вираз за (5)...(9) дає можливість аналітично виразити коефіцієнт теплового розсіяння при конвекції як функцію різниці температур $\Delta\theta_s$ між поверхнею кабелю і віддаленим від кабелю повітряним середовищем, що є необхідним параметром для визначення навантажувальної здатності [10, 13]:

$$h_k = C_1 (\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot \nu^{-1} \cdot c \cdot \lambda^{-1})^m \cdot \lambda/d. \quad (10)$$

Коефіцієнт відведення тепла з поверхні кабелю

випромінюванням за законом Стефана-Больцмана [7]:

$$\alpha_b = \varphi \cdot \varepsilon_t \cdot C_0 (T_s^4 - T_0^4)/(T_s - T_0), \quad (11)$$

де C_0 – постійна Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴);

φ – коефіцієнт, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю дорівнює 1;

ε_t – коефіцієнт чорноти, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній оболонці знаходиться в діапазоні від 0,8 до 0,9;

T_s, T_0 – абсолютні температури поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища [7, 11, 13].

Оскільки α_k і α_b є функціями різниці температур поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища, позначеної в (5) як $\Delta\theta_s$, зручно для подальших розрахунків записати формулу (11) як функцію $\Delta\theta_s$:

$$\alpha_b = \varepsilon_t \cdot C_0 \Delta\theta_s^{-1} \cdot [(\theta_0 + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_0 + 273)^4], \quad (12)$$

де θ_0 – температура оточуючого середовища, °С.

Відповідно коефіцієнт теплового розсіяння при випромінюванні h_b (Вт/м²К^{5/4}) запишеться як функція $\Delta\theta_s$ [7]:

$$h_b = \varepsilon_t C_0 \Delta\theta_s^{-1} [(\theta_0 + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_0 + 273)^4] \Delta\theta_s^{-m}, \quad (13)$$

У підсумку коефіцієнт теплового розсіяння при конвекції і випромінюванні для горизонтально розташованого окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній зовнішній оболонці діаметром d :

$$h = h_b + h_k = \varepsilon_t C_0 \Delta\theta_s^{-1} [(\theta_0 + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_0 + 273)^4] \cdot \Delta\theta_s^{-m} + C_1 (\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot \nu^{-1} \cdot c \cdot \lambda^{-1})^m \cdot \lambda/d, \quad (14)$$

де ключова для визначення коефіцієнту теплового розсіяння h змінна $\Delta\theta_s$, яка спільно з зовнішнім діаметром кабелю d визначає тепловий опір навколишнього середовища може бути орієнтовно оцінена експериментально $\Delta\theta_s^*$ для конкретного ЗПЕ-кабелю в конкретних умовах шляхом визначення температури поверхні кабелю з урахуванням (2) (неруйнівне випробування) в заданому режимі струмового навантаження I :

$$\Delta\theta_s = \theta_g - \theta_0 - I^2 R_g [S_1 + (1 + k_e)S_2], \quad (15)$$

де θ_g – задана змінна, гранична температура жили, задана за умовами експлуатації;

k_e – коефіцієнт втрат в металевій оболонці кабелю;

S_1, S_2 – відповідно, тепловий опір системи ізоляції і захисних покривів [11, 13, 18].

На рис.1 співставлено результати розрахунку коефіцієнту теплового розсіяння h за (14) спільно з нормативним рівнянням для стаціонарного теплового режиму для ЗПЕ-кабелю діаметром 37 мм з діапазоном можливих значень h за рекомендаціями МЕК [7, 8, 13].

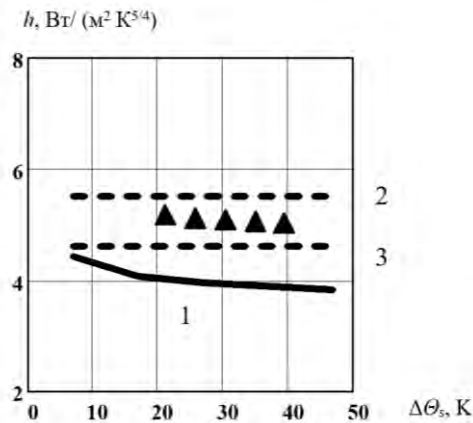


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту теплового розсіяння h від різниці температур поверхні ЗПЕ-кабелю діаметром 37 мм і оточуючого повітря $\Delta\Theta_s$ (формула (14) трикутні точки) спільно з нормативним рівнянням для стаціонарного теплового режиму в порівнянні з діапазоном можливих значень за стандартом [8] (горизонтальні штрихові лінії 2 і 3); крива 1 за [13] для кабелю діаметром 37 мм різниці температур поверхні кабелю діаметром 37 мм і оточуючого повітря, розрахована за формулою (14) в порівнянні з діапазоном можливих значень за стандартом [8, 13]

Введення аналітичного виразу для коефіцієнту розсіяння тепла з поверхні кабелю у повітрі у систему перевірених досвідом нормативних рівнянь для визначення тривалого струмового навантаження кабелю за заданої граничної температури ізоляції, дає можливість визначення параметрів будь-якого потрібного в експлуатації діапазону тривалих струмових навантажень, менших за гранично допустиме [11].

Використання в моделі теплового балансу формули (14) для коефіцієнту розсіяння тепла як функції спектру теплофізичних параметрів конвективного охолодження і випромінювання нагрітого кабелю, з одного боку, і функції параметрів струмового навантаження кабелю, з іншого, є необхідною складовою моделі для визначення навантажувальної здатності кабелю в реальних стаціонарних режимах експлуатації за заданої граничної температури ізоляції за умовами експлуатації Θ_g [7, 13].

Результати розрахунків тривалого струмового навантаження ЗПЕ-кабелю середньої напруги за заданої граничної температури ізоляції і відповідні теплові параметри кабелю наведено на рис. 2.

Результати, представлені на рис. 2 свідчать, що змінні, які дозволяє визначити запропонована модель, а саме струм тривалого навантаження I , коефіцієнт теплового розсіяння h , різниця температури поверхні кабелю і оточуючого повітря не є незалежними. Другий висновок: залежності теплових параметрів від струмових навантажень є нелінійними: коефіцієнт розсіяння тепла h за фізичною суттю є параметром вимушеним: і конвективна, і випромінювальна його складові зростають при збільшенні струмового навантаження на кабель, але по різному, тому користуватись лише одною формулою (14) для

оцінювання впливу h на струм в стаціонарному теплового режимі є помилкою. Формула (14) дає реальну можливість оцінити коефіцієнт розсіяння тепла h саме як невід'ємну частину моделі теплового балансу для конкретного кабелю [10].

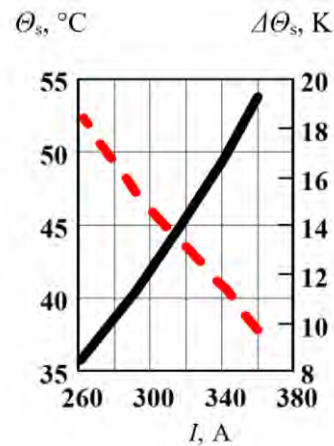


Рисунок 2 – Залежності температури поверхні кабелю Θ_s (штрихова) і різниці температур між поверхнею і віддаленим оточуючим середовищем $\Delta\Theta_s$ (суцільна) від струму тривалого навантаження у повітрі кабелю АПВЄВнг 1×70 на напругу 35 кВ як результати розрахунків за моделлю теплового балансу, що включає формулу (14) для коефіцієнту розсіяння тепла і формулу (15) для оцінки $\Delta\Theta_s$ при заданих значеннях граничної температури ізоляції Θ_g

Менш очевидним і тому головним є висновок, що використання в моделі теплового балансу формули для коефіцієнту розсіяння тепла h (17) як функції спектру теплофізичних параметрів конвективного охолодження і випромінювання нагрітого кабелю, з одного боку, і функції параметрів струмового навантаження кабелю, з іншого, є абсолютно необхідним для визначення навантажувальної здатності кабелю в реальних режимах тривалого струмового навантаження, меншого за гранично допустиме, тобто в режимах реальної експлуатації [10, 13].

Цей висновок підтверджують дані рис. 3, на якому на криві нагрівання кабелю АПВЄВнг 1×70-35 у відкритому повітрі нанесені значення максимальної температури для цього кабелю за різних значень струму навантаження як рішення моделі теплового балансу [7].

Для розрахунку кривих нагрівання на рис. 3 використано відому експоненційну двопараметричну модель [13] з початковими умовами $t = 0$; $\Theta = 0$:

$$\Theta - \Theta_0 = (\Theta_g - \Theta_0)(1 - \exp(-\beta / t)), \quad (16)$$

де β – постійна нагрівання: добуток теплоємності кабелю на тепловий опір кабелю $\beta = C_k \cdot S_k$ [11, 13].

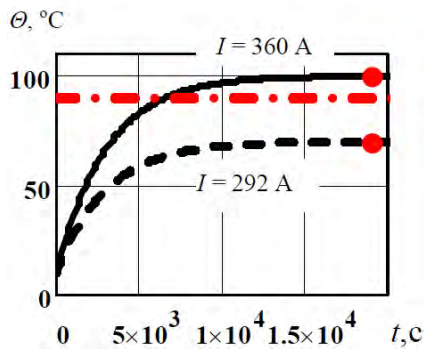


Рисунок 3 – Криві нагрівання кабелю АПВЕВнг 1×70-35 у відкритому повітрі за різних значень струму навантаження: точками нанесені значення максимальної температури як рішення запропонованої моделі теплового балансу; штрих-пунктирною лінією позначено гранично допустиму температуру ізоляції

Достатню для практичних застосувань точність простої експоненційної моделі нагрівання кабелю ілюструє рис.4, на якому представлено експериментальні дані нагрівання кабелю АПВЕВнг 1×70-35 в лінеаризованій системі координат для емпіричної оцінки постійної нагрівання як параметру лінійної функції методом найменших квадратів [16,17,22].

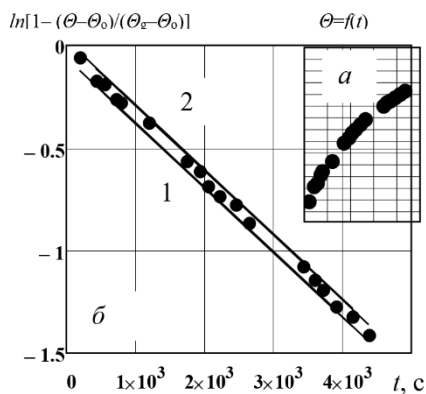


Рисунок 4 – Експериментальні дані нагрівання кабелю АПВЕВнг 1×70-35 в лінеаризованій системі координат

На рис. 4 виміряні значення залежності температури жили від часу нагрівання струмом 400 А у вигляді нелінійної функції $\theta=f(t)$ (а) представлені лінійною функцією $\ln[1 - (\theta - \theta_0) / (\theta_g - \theta_0)] = f(t)$ (б) і методом найменших квадратів визначені оцінки параметрів лінійної функції, зокрема емпірична оцінка сталої нагрівання кабелю $\beta^* = 3174$ с. Визначене розрахунком значення сталої нагрівання як добутку теплоємності кабелю C_k на тепловий опір кабелю S_k за нормальної температури 20 °С: $\beta = C_k \cdot S_k = 4372 \times 0,678 = 2964$ с [7].

В прийнятних для практичних застосувань одиницях виміру годинах одержані оцінки β становлять відповідно 0,88 год і 0,82 год, тобто практично співпадають. На рис.4 б) нанесені верхня і нижня границі, визначені як відхилення $\pm 3\sigma$ від визначеної методом найменших квадратів лінійної

функції, де σ – середньоквадратичне відхилення вимірних значень від цієї функції.

Спільне використання запропонованої моделі теплового балансу і розрахунку кривих нагрівання за відомою експоненційною моделлю (16) [16,22] дає можливість визначення допустимого часу заданого перевантаження для реальних режимів тривалого струмового навантаження, меншого за гранично допустиме, тобто в режимах реальної експлуатації, що ілюструє рис.5.

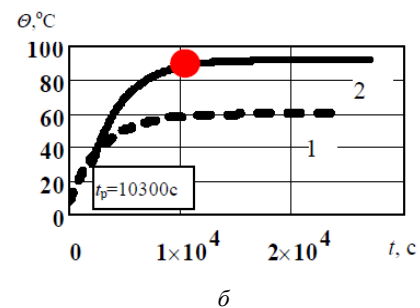
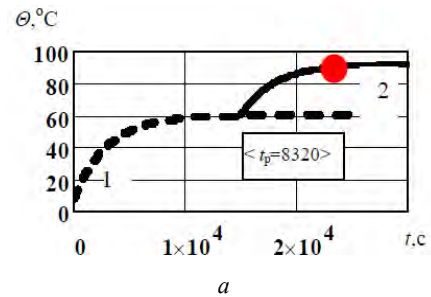


Рисунок 5 – Ілюстрація визначення допустимого часу заданого перевантаження в різні моменти початку перевантаження:

- 1 – нагрівання кабелю від включення на струмове навантаження 75 % від гранично допустимого;
- 2 – нагрівання кабелю при гранично допустимому навантаженні в різні моменти:

- (а) в будь-який момент, коли є стаціонарний тепловий режим при 75 % навантаженні;
- (б) в момент, коли в режимі 75 % навантаження досягнуто температури 40 °С

Зразок використання запропонованої моделі теплового балансу спільно з кривими нагрівання за (16) для конкретного режиму перевантаження конкретного кабелю в конкретних умовах експлуатації наведено на рис. 6.

Подібні номограми можуть бути побудовані для заданого діапазону можливих струмових навантажень, конкретних конструкцій ЗПЕ-кабелів середньої напруги на основі прискорених неруйнівних випробувань на нагрівання в умовах виробництва [5, 7, 13, 15, 18].

Вертикальна штрихова лінія на рис.6 свідчить, що експериментально визначений час нагрівання кабелю до гранично допустимої для ізоляції температури співпадає з допустимим часом перевантаження при включенні струмового навантаження, на 30 % більшого за номінальний струм цього кабелю.

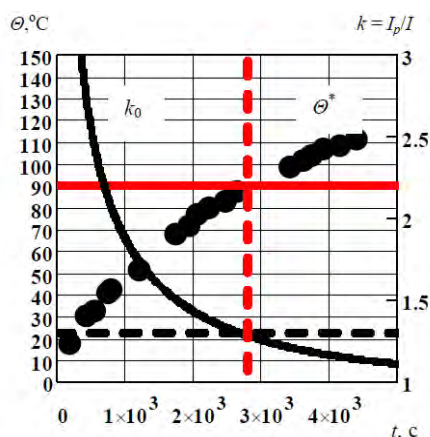


Рисунок 6 – Номограма для визначення параметрів допустимого перевантаження, розроблена на основі запропонованої моделі теплового балансу спільно з кривими нагрівання за відомою експоненційною моделлю (16) для перевантаження $k = I_p/I_n = 1,3$ відносно номінального струму кабелю АПвЕВнг1×70-35 в цеху при $\Theta_0 = 10^\circ\text{C}$:

k_0 – залежність коефіцієнту перевантаження від допустимого часу перевантаження від моменту включення ($t = 0$; $\Theta = \Theta_0$);

Θ^* – виміряна температура жили в момент t

Рисунки 3 і 5 ілюструють можливість побудови подібних номограм для заданого діапазону тривалих струмових навантажень (розрахунок за моделлю і можливих перевантажень за експоненційною моделлю (16). Вихідними даними для такої побудови є:

- конструктивні і технічні параметри ЗПЕ-кабелю середньої напруги;
- експериментально визначена крива нагрівання конкретного кабелю в режимі перевантаження, яке є прискореним випробуванням для перевірки розрахованої сталої нагрівання кабелю і одночасно альтернативним традиційному випробуванню підвищеною постійною напругою, яка не рекомендована для ЗПЕ-кабелів [8, 10].

Висновки.

1. Для ЗПЕ-кабелів, які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки і які суттєво відрізняються від традиційних маслонаповнених кабелів, характерне підвищене значення допустимої температури і відповідно допустимого струму, що збільшує теплове навантаження на елементи конструкції кабелю і вимагає окремого розгляду можливих теплових перевантажень в експлуатації.

2. Розроблена і перевірена експериментально в умовах виробництва модель визначення діапазону тривалих струмових навантажень, менших гранично допустимого, для конкретного ЗПЕ-кабелю середньої напруги, яка основана на

- універсальному принципі теплового балансу в стаціонарному режимі;
- нормованій формулі для визначення коефіцієнту теплопередачі α з поверхні кабелю як

функції двох параметрів: $\alpha = h \cdot \Delta\Theta_s^m$, де h – коефіцієнт теплового розсіяння з поверхні кабелю в $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}^{5/4}$,

- $\Delta\Theta_s = \Theta_s - \Theta_0$, різниця температур поверхні кабелю і довкілля;

- запропонованій моделі для визначення коефіцієнту теплового розсіяння при конвекції і випромінюванні (14) для горизонтально розташованого окремо прокладеного в повітрі кабелю діаметром d в полімерній зовнішній оболонці.

3. Показана можливість побудови номограм для визначення параметрів допустимих перевантажень ЗПЕ-кабелів середньої напруги в діапазоні тривалих струмових навантажень в експлуатації, які зазвичай суттєво менші гранично допустимих, вихідними даними для яких є:

- конструктивні і технічні параметри конкретного ЗПЕ-кабелю середньої напруги;

- експериментально визначена крива нагрівання цього кабелю в режимі перевантаження відносно номінального струму, яка одночасно є альтернативою традиційному випробуванню підвищеною постійною напругою, яка не рекомендована для високовольтних ЗПЕ-кабелів [8, 10].

Список літератури

1. Furse C. M., Kafal M., Razzaghi R., Shin Y.-J. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 888–906. doi: 10.1109/JSEN.2020.2987321.
2. Andritsch T., Vaughan A., Stevens G. C. Novel insulation materials for high voltage cable systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017. Vol. 33, no. 4. P. 27–33. doi: 10.1109/MEI.2017.7956630.
3. Kafal M., Grégis N., Benoit J., Ravot N., Lagomarsini C., Gobat G. Pilot Tests of FasTR Method for Locating Transient Faults in Medium Voltage Underground Power Networks. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 8510–8519. doi: 10.1109/JSEN.2020.3034465.
4. Feng X., Xiong Q., Gattozzi A., Montanari G. C., Seri P., Hebner R. Cable commissioning and diagnostic tests: The effect of voltage supply frequency on partial discharge behaviour. *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 2018. P. 373–376. doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401066.
5. Montanari G. C., Hebner R., Morshuis P., Seri P. An Approach to Insulation Condition Monitoring and Life Assessment in Emerging Electrical Environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019. Vol. 34, no. 4. P. 1357–1364. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2897905.
6. Oluwafemi I., Salau A. O., Laseinde T. Causes of Deterioration in XLPE MV Cables: A Review. *Recent Patents on Engineering*. 2021. Vol. 15, iss. 2. P. 218–224. doi: 10.2174/1872212114666200117110502.
7. Гонтар Ю. Г., Щепенюк Л. А., Антоненко С. Ю. Теплофізичні аспекти визначення навантажувальної здатності силових кабелів середньої напруги з ізоляцією із зшитого поліетилену в стаціонарних режимах експлуатації. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2020. №10 (152). С. 54–64. doi: 10.20998/2313-8890.2020.09.07.
8. IEC 60287-1-1:2006+A1:2014 *Electric cables. Calculation of the current rating. Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014. 136 p.
9. Kucheriava I. M. Electric field enhancement in polyethylene cable insulation with defects. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 11–16. doi: 10.15407/techmed2018.02.011.
10. Krbal M., Pelikan L., Bukvisova Z., Kolcunova I. Heating MV Cables to the Exact Temperature for Combined Test. *Przeglad*

- Elektrotechniczny*. 2019. No. 11. P. 193–199. doi: 10.15199/48.2019.11.48.
11. Шебенюк Л. А., Антонець Т. Ю. Дослідження втрат в ізоляції високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. №4. С. 58–62. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.
 12. Coughlan A., Kearney J., Looby T. Review of the Effectiveness of Impulse Testing for the Evaluation of Cable Insulation Quality and Recommendations for Quality Testing. *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2018. P. 1–6. doi: 10.1109/UPEC.2018.8541845.
 13. Антонець Т. Ю., Гонтар Ю. Г. Вплив динаміки нагрівання полімерної ізоляції силових кабелів середньої напруги на їх пропускну здатність. *Світлотехніка та Електроенергетика*. 2020. № 3 (59). С. 127–130. doi: 10.33042/2079-424X-2020-3-59-127-130.
 14. Zhuang X., Niu H., Wang J., You Y., Sun G. Experimental Study on the Cyclic Ampacity and Its Factor of 10 kV XLPE Cable. *Energy and Power Engineering*. 2013. Vol. 5, no. 4. P. 1221–1225. doi: 10.4236/epe.2013.54B231.
 15. Jahromi A. N., Pattabi P., Densley J., Lamarre L. Medium voltage XLPE cable condition assessment using frequency domain spectroscopy. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020. Vol. 36, no. 5. P. 9–18. doi: 10.1109/MEI.2020.9165695.
 16. Sun B. Parameters Calculation of Underground Cables Using MATLAB. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2020. Vol. 8, no. 11. P. 12–20. doi: 10.4236/jpee.2020.811002.
 17. Alamoudi M., Alamoudi R. () Implementing Lean Methodology in a Power Cable Factory: A Case Study of a Low Voltage Cable. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2019. Vol. 9, no. 12. P. 2083–2097. doi: 10.4236/ajibm.2019.912138.
 18. Brakelmann H., Anders G. A new method for analyzing complex cable arrangements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3094666.
 19. Rerak M., Ocloń P. Thermal analysis of underground power cable system. *Journal of Thermal Science*. 2017. Vol. 26, no. 5. P. 465–471. doi: 10.1007/s11630-017-0963-2
 20. Gontar Yu., Kiessaiev O., Antonets T. Quality control and evaluation of the life cycle insulated power cables XPLE. *The scientific heritage*. 2021. Vol. 1, no. 59. P. 24–26. doi: 10.24412/9215-0365-2021-59-1-24-26.
 21. Беспрозванных А. В., Кессаев А. Г. Технологические и эксплуатационные факторы локального усиления напряженности электрического поля в силовом кабеле коаксиальной конструкции. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 6. С. 54–59. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.09.
 22. Nadeau S. Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma in Higher Education: A Review of Experiences around the World. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2017. Vol. 7, no. 5. P. 591–603. doi: 10.4236/ajibm.2017.75044.
- References (transliterated)**
1. Furse C. M., Kafal M., Razzaghi R., Shin Y.-J. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2021, vol. 21, no. 2, pp. 888–906. doi: 10.1109/JSEN.2020.2987321.
 2. Andritsch T., Vaughan A., Stevens G. C. Novel insulation materials for high voltage cable systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017, vol. 33, no. 4, pp. 27–33. doi: 10.1109/MEI.2017.7956630.
 3. Kafal M., Grégis N., Benoit J., Ravot N., Lagomarsini C., Gobat G. Pilot Tests of FasTR Method for Locating Transient Faults in Medium Voltage Underground Power Networks. *IEEE Sensors Journal*. 2021, vol. 21, no. 6, pp. 8510–8519. doi: 10.1109/JSEN.2020.3034465.
 4. Feng X., Xiong Q., Gattozzi A., Montanari G. C., Seri P., Hebner R. Cable commissioning and diagnostic tests: The effect of voltage supply frequency on partial discharge behaviour. *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 2018, pp. 373–376. doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401066.
 5. Montanari G. C., Hebner R., Morshuis P., Seri P. An Approach to Insulation Condition Monitoring and Life Assessment in Emerging Electrical Environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019, vol. 34, no. 4, pp. 1357–1364. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2897905.
 6. Oluwafemi I., Salau A. O., Laseinde T. Causes of Deterioration in XLPE MV Cables: A Review. *Recent Patents on Engineering*. 2021, vol. 15, iss. 2, pp. 218–224. doi: 10.2174/1872212114666200117110502.
 7. Gontar Yu., Shchebenyuk L., Antonets S. Teplofizychni aspekty vyznachennya navantazhuval'noyi zdatnosti sylovykh kabeliv seredn'oyi napruhy z izolyatsiyeyu iz zshytoho polietylenu v statsionarnykh rezhymakh ekspluatatsiyi [Thermal physical aspects of determination of load capacity medium voltage power cables with cross-polyethylene insulation in stationary operating modes]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2020, no. 10 (152), pp. 54–64. doi: 10.20998/2313-8890.2020.09.07.
 8. IEC 60287-1-1:2006+A1:2014 *Electric cables. Calculation of the current rating. Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses*. General. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014. 136 p.
 9. Kucheriava I. M. Electric field enhancement in polyethylene cable insulation with defects. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2018, no. 2, pp. 11–16. doi: 10.15407/technd2018.02.011.
 10. Krbal M., Pelikan L., Bukvisova Z., Kolcunova I. Heating MV Cables to the Exact Temperature for Combined Test. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019, no. 11, pp. 193–199. doi: 10.15199/48.2019.11.48.
 11. Shchebenyuk L. A., Antonets T. Yu. Doslidzhennya vtrata v izolyatsiyi vysokovol'tnykh sylovykh kabeliv z polimernoyu izolyatsiyeyu [Investigation of losses in insulation of high-voltage power cables with XLPE insulation]. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016, no. 4, pp. 58–62. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.
 12. Coughlan A., Kearney J., Looby T. Review of the Effectiveness of Impulse Testing for the Evaluation of Cable Insulation Quality and Recommendations for Quality Testing. *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/UPEC.2018.8541845.
 13. Gontar Yu., Antonets T. Vplyv dynamiky nahrivannya polimernoyi izolyatsiyi sylovykh kabeliv seredn'oyi napruhy na yikh propusknu zdattist' [Influence of heating dynamics of polymer insulation of medium voltage power cables on their performance]. *Lighting engineering and power engineering*. 2020. Vol. 3, no. 59, pp. 127–130. doi: 10.33042/2079-424X-2020-3-59-127-130.
 14. Zhuang X., Niu H., Wang J., You Y., Sun G. Experimental Study on the Cyclic Ampacity and Its Factor of 10 kV XLPE Cable. *Energy and Power Engineering*. 2013, vol. 5, no. 4, pp. 1221–1225. doi: 10.4236/epe.2013.54B231.
 15. Jahromi A. N., Pattabi P., Densley J., Lamarre L. Medium voltage XLPE cable condition assessment using frequency domain spectroscopy. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020, vol. 36, no. 5, pp. 9–18. doi: 10.1109/MEI.2020.9165695.
 16. Sun B. Parameters Calculation of Underground Cables Using MATLAB. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2020, vol. 8, no. 11, pp. 12–20. doi: 10.4236/jpee.2020.811002.
 17. Alamoudi M., Alamoudi R. Implementing Lean Methodology in a Power Cable Factory: A Case Study of a Low Voltage Cable. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2019, vol. 9, no. 12, pp. 2083–2097. doi: 10.4236/ajibm.2019.912138.
 18. Brakelmann H., Anders G. A new method for analyzing complex cable arrangements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3094666.
 19. Rerak M., Ocloń P. Thermal analysis of underground power cable system. *Journal of Thermal Science*. 2017, vol. 26, no. 5, pp. 465–471. doi: 10.1007/s11630-017-0963-2
 20. Gontar Yu., Kiessaiev O., Antonets T. Quality control and evaluation of the life cycle insulated power cables XPLE. *The scientific heritage*. 2021, vol. 1, no. 59, pp. 24–26. doi: 10.24412/9215-0365-2021-59-1-24-26.
 21. Bezprozvannykh G. V., Kyessayev A. G. Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye faktory lokal'nogo usileniya napryazhennosti elektricheskogo polya v silovom kabele koaksial'noy konstruktssii [The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design]. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016, no. 6, pp. 54–59. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.09.
 22. Nadeau S. Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma in Higher Education: A Review of Experiences around the World. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2017, vol. 7, no. 5, pp. 591–603. doi: 10.4236/ajibm.2017.75044.

Надійшло (received) 18.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Володимир Михайлович (Золотарев Владимир Михайлович, Volodymyr Zolotarov) – доктор технічних наук, професор, генеральний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Антонець Станіслав Юрійович (Антонець Станислав Юрьевич, Stanislav Antonets) – кандидат технічних наук, начальник управління зовнішньоекономічних зв'язків ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: antonets.uves@yuzhcable.com.ua.

Обозний Андрій Леонідович (Обозный Андрей Леонидович, Andrii Oboznii) – головний технолог ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Антонець Юрій Опанасович (Антонець Юрий Афанасьевич, Yurii Antonets) – кандидат технічних наук, технічний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Гонтар Юлія Григорівна (Гонтарь Юлия Григорьевна, Yuliya Gontar) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4433-7305>, e-mail: Yuliia.Gontar@khpi.edu.ua.

Щебенюк Леся Артемівна (Щебенюк Леся Артемовна, Lesia Shchebeniuk) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; e-mail: Lesia.Shchebeniuk@khpi.edu.ua.

Кессаєв Олександр Геннадійович (Кессаев Александр Геннадьевич, Oleksandr Kiessaiev) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5601-5955>, e-mail: Kiessaiev.Oleksandr@khpi.edu.ua.

С. В. КРИВЕНКО

ВПЛИВ КЛАПАННОГО ЕФЕКТУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ШАРОВИХ ГАЗОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

На енергоефективність газодинамічних процесів шарових систем істотно впливають напрямки руху газів та властивості зернистого шару, які мають бути враховані у формулі Дарсі-Вейсбаха. Складний вигляд закономірності коефіцієнта опору від частки дрібних фракцій у шарі обґрунтовується хвилеподібною формою каналів, у яких розміщуються дрібні фракції. Однак, дане явище також може бути обґрунтовано примусовою міграцією дрібних частинок усередині порожнин шару під впливом рухомих газів. Досліджено вплив рухливості частинок під час продування повітрям розділених та змішаних зернистих шарів на коефіцієнт газодинамічного опору. Для монофракційних шарів спостерігали плавне зниження величини коефіцієнта зі збільшенням витрати повітря до переходу шару в режим псевдозрідження. Для розділених шарів виявлено злами, зумовлені формуванням малопроникувальної ділянки за рахунок розміщення дрібних фракцій у вузьких місцях між великими. Наявність такого зламу залежить від співвідношення розмірів частинок та їхньої шорсткості. Збільшення тиску під шаром забезпечує поступове переміщення дрібних фракцій вгору порожнечами між великими фракціями. Зверху утворювався шар із дрібних кульок та втрати тиску в усьому шарі стали приблизно вдвічі вищими, ніж для розділеного шару. Це зумовлено тим, що дрібні кульки повністю заповнюють порожнечі між великими котунами та загальна висота стовпа кульок у каналах шару збільшилася приблизно вдвічі по відношенню до вихідної висоти засипки. Крім того, збільшується звивистість каналів між великими котунами, якими проходить повітря, що сприяє підвищенню газодинамічного опору шару. Для монофракційної шихти дрібних кульок при критичному перепаді тиску газу спостерігається різкий перехід у «киплячий» шар, відбуваються пульсації тиску ± 100 Па та витрати $\pm 0,365 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Після формування каналів-гейзерів відбувається мимовільне різке падіння перепаду. Жорстка структура шару, яка характерна для агломераційного процесу, забезпечує рівномірний рух газів в шарі, але клапанний ефект виникає при вмісті дрібних фракцій в шарі більше 3,1 % та підвищує енергозатрати на рух газів в шарі на 30 %. При цьому відбувається розміщення двох і більше частинок в таких порожнинах між великими та які утримуються в них за рахунок сил тертя. Усунення малопроникувального бар'єру дозволить підвищити висоту спікного шару з 400 до 550–600 мм та знизити витрати твердого палива шихти на 10–15 % за рахунок його перерозподілу по висоті.

Ключові слова: газопроникність, коефіцієнт опору, порозність, агломерація, зернистий шар, доменний процес.

С. В. КРИВЕНКО

ВЛИЯНИЕ КЛАПАННОГО ЭФФЕКТА НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СЛОЕВЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На энергоэффективность газодинамических процессов слоевых систем существенное влияние оказывают направление движения газов и свойства зернистого слоя, которые должны быть учтены в формуле Дарси-Вейсбаха. Сложный вид закономерности коэффициента сопротивления от содержания мелких фракций в слое обосновывается волнообразной формой каналов, в которых размещаются мелкие фракции. Однако, данное явление может быть обосновано принудительной миграцией мелких частиц внутри полостей слоя под влиянием подвижных газов. Исследовано влияние подвижности частиц при продувке воздухом разделенных и смешанных зернистых слоев на коэффициент газодинамического сопротивления. Для монофракционных слоев наблюдали плавное снижение величины коэффициента при увеличении расхода воздуха до перехода слоя в режим псевдоожижения. Для разделенных слоев выявлены изломы, обусловленные формированием малопроницаемого участка за счет размещения мелких фракций в узких местах между крупными. Наличие такого излома зависит от соотношения размеров частиц и их шероховатости. Увеличение давления под слоем обеспечивает постепенное перемещение мелких фракций вверх по пустотам между большими фракциями. Сверху образовался слой из мелких шаров и потери давления во всем слое стали примерно вдвое выше, чем для разделенного слоя. Это обусловлено тем, что мелкие шарики полностью заполняют пустоты между большими окатышами и общая высота столба шариков в каналах слоя увеличилась примерно вдвое по отношению к исходной высоте засыпки. Кроме того, увеличивается извилистость каналов между большими окатышами, по которым проходит воздух, что способствует повышению газодинамического сопротивления слою. Для монофракционной шихты мелких шариков при критическом перепаде давления газа наблюдается резкий переход в «кипящий» слой, происходят пульсации давления ± 100 Па и расход $\pm 0,365 \cdot 10^{-3}$ м³/с. После формирования каналов-гейзеров происходит самопроизвольное резкое падение перепада. Жесткая структура слоя, характерная для агломерационного процесса, обеспечивает равномерное движение газов в слое, но клапанный эффект возникает при содержании мелких фракций в слое более 3,1 % и повышает энергозатраты на движение газов в слое на 30 %. При этом происходит размещение двух и более частиц в полостях между крупными гранулами и удерживаемыми в них за счет сил трения. Устранение малопроницаемого барьера позволит повысить высоту спящего слоя с 400 до 550–600 мм и снизить расход твердого топлива шихты на 10–15 % за счет его перераспределения по высоте.

Ключевые слова: газопроницаемость, коэффициент сопротивления, порозность, агломерація, зернистый слой, доменный процесс.

S. V. KRIVENKO

INFLUENCE OF VALVE EFFECT ON ENERGY EFFICIENCY OF LAYER GASDYNAMIC SYSTEMS

The direction of gas movement and the properties of the granular layer, which must be taken into account in the Darcy-Weisbach formula, have a significant effect on the energy efficiency of gas-dynamic processes in layered systems. The complex form of the regularity of the coefficient of resistance from the content of fine fractions in the layer is justified by the wavy shape of the channels in which the fine fractions are located. However, this phenomenon can be justified by the forced migration of small particles inside the cavities of the layer under the influence of mobile gases. The influence of the mobility of particles during air blowing of separated and mixed granular layers on the coefficient of gas-dynamic resistance is investigated. A smooth decrease in the value of the coefficient with an increase in the air flow rate before the transition of the layer to the fluidization mode was observed for monofraction layers. Fractures, caused by the formation of a low-permeability area due to the placement of small fractions in narrow places between large ones, have been identified for the separated layers. The presence of such a fracture depends on the ratio of particle sizes and their roughness. The increase in pressure under the bed allows the fines to gradually move upward through the voids between the larger fractions. A layer of small balls

© С. В. Кривенко, 2021

formed on top and the pressure loss in the entire steel layer is about twice as high as for the separated layer. This is due to the fact that the small balls completely fill the voids between the large pellets and the total height of the column of balls in the channels of the layer has approximately doubled in relation to the initial filling height. In addition, the tortuosity of the channels between large pellets, through which air passes, increases, which contributes to an increase in the gas-dynamic resistance to the layer. An abrupt transition to a "fluidized" bed is observed for a monofractional charge of small balls at a critical gas pressure drop, pressure pulsations occur ± 100 Pa and consumption $\pm 0,365 \cdot 10^{-3}$ m³/s. A spontaneous sharp drop in the drop occurs after the formation of geyser channels. The rigid structure of the layer, characteristic of the agglomeration process, ensures uniform movement of gases in the layer, but the valve effect occurs when the content of fine fractions in the layer is more than 3.1 % and increases the energy consumption for the movement of gases in the layer by 30 %. The placement of two or more particles in such cavities between large and retained in them due to friction forces occurs in this case. Elimination of the low-permeability barrier will increase the height of the dormant layer from 400 to 550–600 mm and reduce the consumption of solid fuel of the charge by 10–15 % due to its redistribution along the height.

Keywords: gas permeability, drag coefficient, porosity, agglomeration, granular layer, blast-furnace process.

Вступ. Аглодоменне виробництво є основою металургійної промисловості. Зростання енергоефективності аглодоменного виробництва вимагає розробки нових теоретично та експериментально обґрунтованих технологій та процесів, а також удосконалення існуючих.

Агломераційний та доменний процеси пов'язані з просмоктуванням або продуванням газів через шар. Кількість кисню, підведеного до зони горіння твердого палива у шарі, визначає швидкість горіння палива, а кількість і температура відхідних із зони горіння газоподібних продуктів реакції – швидкість зростання температури в шарі шихти [1].

У зв'язку з цим вертикальна швидкість спікання при вакуумній агломерації в переважній більшості випадків прямо пропорційна газопроникності спікного шару. Тому під час підготовки шихти до спікання дуже важливо забезпечити її високу газопроникність. Збільшення висоти шару, що спікається, на аглофабриці ЗСМК з 287 до 400 мм дало наступні результати [2]:

- вихід придатного збільшився з 62–64 до 71–73 %;
- вміст палива у шихті знизився з 4,25 до 3,2 %;
- зменшився вміст FeO в агломераті з 18–20 до 12–15 % з відповідним поліпшенням відновлюваності.

Поліпшення якості агломерату також позитивно впливає на доменну плавку, сприяючи зниженню витрати вартісного коксу.

Одним із основних напрямків розвитку доменного процесу в сучасних умовах вітчизняної та зарубіжної практики визнано вдосконалення завантаження доменних печей. Це викликано наявним резервом організації потоків шихти та газів. Ця проблема може бути вирішена переважно за рахунок оптимізації газодинамічного режиму доменної плавки на основі глибоких досліджень процесів методами фізичного та математичного моделювання. Забезпечення рівномірного окружного розподілу газів дозволило знизити витрати коксу до 15–25 кг/т чавуну [3].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. При описі газодинаміки зернистого шару дослідники найчастіше використовують формулу Дарсі-Вейсбаха, що визначає втрати напору при розвиненому турбулентному перебігу рідини, що не стискається, або газового потоку [4]:

$$\Delta P = \Psi \frac{H \rho U_0^2}{d} \frac{1 - \varepsilon}{2\Phi \varepsilon^3}, \text{ Па}, \quad (1)$$

де Ψ – коефіцієнт газодинамічного опору;

H – висота шару, м;

ε – порізність шару, част. од.;

d – еквівалентний діаметр частинок, м;

ρ – щільність газу, кг/м³;

U_0 – приведена швидкість газу, м/с;

Φ – показник сферичності.

Формула (1) призначена для розрахунку втрат тиску в циліндричних трубах і заснована на доповненні формули Вейсбаха коефіцієнт Дарсі опору ділянки труби довжиною L і діаметром D [5, 6]:

$$\xi = \lambda \frac{L}{D}, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт втрат на тертя довжиною.

Слід звернути увагу, що формула Дарсі-Вейсбаха є модифікованою першою частиною рівняння Бернуллі, яка розраховує кінетичну енергію, що припадає на одиницю об'єму газу (рідини) [7].

Труднощі використання формули (1) для сипких середовищ пов'язані з тим, що коефіцієнт Ψ має два максимуми при зміні частки дрібних фракцій у шарі, які вказували Т. Л. Джозеф, В. П. Тарасов та інші дослідники [8]. Для доменних шихт зі збільшенням частки дрібниці до 0,2 відбувається зростання Ψ в тричотири рази. Потім величина Ψ знижується. Якщо збільшувати частку дрібниці понад 0,4, то знову відбувається зростання Ψ . Проте чіткого пояснення закономірності зміни коефіцієнта Ψ не було представлено. Крім того, доменні шихти за властивостями суттєво відрізняються від огрудкованих агломераційних. Агломерат має форму зовсім не відповідну кулястої. Дрібні фракції в доменній шихті вільно переносяться по каналах і не мають сил зчеплення, характерних для зволжених агломераційних шихт. Також при русі газу знизу вгору в шарі доменних шихт створюються більш сприятливі умови для розсування великих і перенесенням дрібних частинок.

Авторами статті [9] встановлено, що складна форма закономірності коефіцієнта опору від частки дрібних фракцій у шарі обґрунтовується хвилеподібною формою каналів, у яких розміщуються дрібні фракції. Однак, дане явище також може бути обґрунтовано примусовою міграцією дрібних частинок усередині порожнин шару під впливом рухомих газів.

Мета та завдання досліджень – підвищення енергоефективності шарових газодинамічних систем на основі досліджень та аналізу впливу розміщення

дрібних гранул у шарі на закономірність зміни коефіцієнта опору формули Дарсі-Вейсбаха.

Для реалізації поставленої мети здійснювали продування зернистих шарів з витратою повітря, що збільшується, і різними фракційними складами та властивостями шихт. Витрату повітря збільшували до переходу шару режим псевдозрідження.

Матеріали та методи дослідження впливу умов руху газів на перенесення фракцій у шарі. Продування зернистого шару здійснювали повітрям знизу вгору в циліндричній посудині діаметром 220 мм кафедри металургії чорних металів ПДТУ. Фракції зернистого матеріалу були сфери крупністю 1, 4 і 10 мм. У зв'язку з тим, що максимальний розмір гранул більш ніж у 10 разів менший за діаметр циліндра, то пристінковий ефект не впливає на зміну газодинаміки зернистого шару [10].

Дрібні фракції діаметром 1 мм виготовлені зі скла. Великі фракції – котуни 10 мм, гранульовані із залізородного концентрату з додаванням бентоніту. Для збільшення міцності вони були обпалені у печі. Співвідношення крупності дрібних та великих фракцій складо $\frac{1}{10}$, яке характерне для доменних та агломераційних шихт. Вказаному співвідношенню М відповідає мінімум порізності шару при об'ємному вмісті дрібної фракції від 30 до 50 %. Згідно з дослідженнями, проміжна фракція 4 мм слабо впливає на втрати тиску газу в шарі [11]. Однак при малій кількості великої фракції 10 мм у суміші, проміжна – 4 мм має важливе значення для умов руху газів.

Для вивчення перенесення дрібних частинок у порожнечках між великими – спочатку формували шар із розділним завантаженням фракцій за висотою.

Скляні кульки мають низький коефіцієнт тертя. Шару з таких часток характерна висока плинність. При засипанні дрібних фракцій поверх шару великих – відбувається їхнє гравітаційне перетікання вниз у порожнечі між великими котунами до тих пір, поки не зустрінеться непроникний бар'єр (решітчасте дно циліндра). Тому досліди із застосуванням дрібних скляних кульок 1 мм здійснювали з їх завантаженням під шар великих котунів. У зв'язку з різним кольором скляних кульок і котунів із залізородного концентрату було зручно спостерігати за процесами, що відбуваються в шарі через прозорі стінки продувної чаші.

Результати досліджень газодинаміки шарів сумішей фракцій. Для порівняльного аналізу подвійних шарів, що складаються з різних фракцій по висоті, спочатку продували монофракційні шари дрібних скляних кульок та великих котунів.

При продуванні шару дрібних скляних кульок крупністю 1 мм його висота становила 55 мм. Збільшення витрати повітря супроводжувалося плавним збільшенням тиску під шаром. Різкий перехід у «киплячий» шар відбувається при критичному перепаді тиску газу $\Delta P_{кр} = 710$ Па, витрата повітря при цьому становить $Q_{кр} = 1,83 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Кипіння шару нагадує собою гейзери, якими періодично виходить повітря. Таке неоднорідне псевдозрідження можна

усунути рівномірним перерозподілом газів по перерізу циліндра, що практично неможливе для доменного та агломераційного процесів. При збільшенні висоти шару лінійно зростає критичний тиск газу для переходу зернистого шару в киплячий (рис. 1). Відбувається закономірна зміна меж переходу на режим псевдозрідження (рис. 1, лінія АВ), критичний перепад тиску газу шарі описується рівнянням

$$\Delta P_{кр} = \exp(10,7 \cdot h^{0,172}) - 1, \text{ Па.} \quad (3)$$

Формула (3) показує тенденцію зміни тиску під шаром для переходу в режим псевдозрідження зі збільшенням його висоти. Розроблено детерміновані вирази, що дозволяють визначати межу переходу шару в псевдозріджений режим, що зв'язують фізичні процеси та властивості шару з утворенням пухирів у середині за аналогією до в'язких рідин [12, 13].

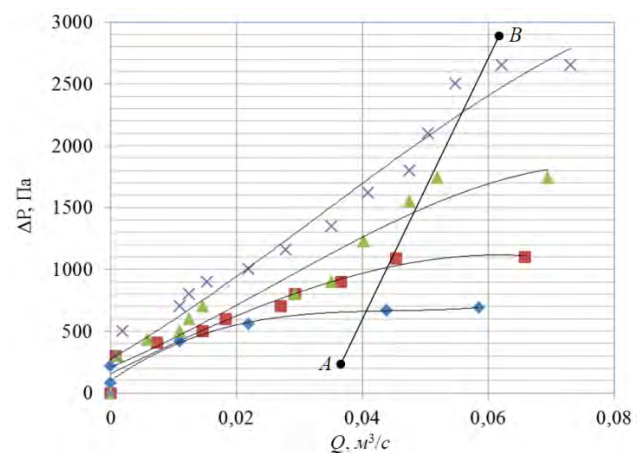


Рисунок 1 – Зміна надлишкового тиску псевдозрідження залежно від висоти шару скляних частинок діаметром 1 мм (× – висота шару 170 мм, ▲ – 120 мм, ■ – 80 мм, ◆ – 55 мм)

Скляні дрібні кульки за властивостями поверхні суттєво відрізняються від дрібної фракції доменної чи агломераційної шихти. Через сили тертя частинок всередині шару можлива інша поведінка упаковок зі збільшенням тиску під шаром. Тому проведено додаткове дослідження шару, що складається з дрібних котунів 1 мм (рис. 2). Використані котуни 1 мм виготовлені тим же методом, що і котуни 10 мм. Висота їхнього шару складала 50 мм.

Встановлено, що збільшення шорсткості поверхні котунів знизило витрату повітря крізь шар у приблизно 8 разів при однаковому тиску під шаром. Проте перехід у «киплячий» шар відбувся за однакового критичного тиску. Таким чином, на зміну стану шару більшою мірою впливають сили тиску повітря під шаром, а не його витрата. Це повністю відповідає фізичним уявленням про виникнення «киплячого» шару та висновків інших дослідників [14].

У зв'язку з тим, що скляні кульки і котуни однакової крупності при продуванні шару знизу поведуться ідентично, то в подальших дослідженнях за дрібну фракцію використані скляні кульки крупністю 1 мм.

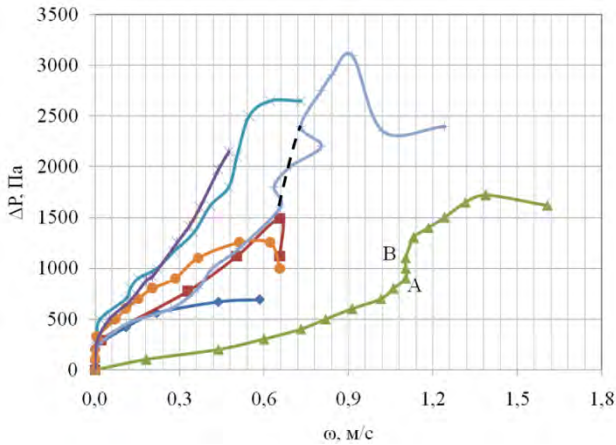


Рисунок 2 – Зміна перепаду тиску газу під шарами зазначених складів при збільшенні швидкості повітря:
 ◆ – скляні кульки діаметром 1 мм, висота шару 55 мм;
 × – скляні кульки діаметром 1 мм, висота шару 170 мм;
 ● – внизу котуни діаметром 1 мм, висота шару 50 мм, вгорі котуни діаметром 10 мм, висота шару 100 мм;
 ▲ – котуни діаметром 4 мм, висота шару 100 мм;
 ■ – внизу скляні кульки діаметром 1 мм висота шару 55 мм, вгорі котуни діаметром 10 мм, висота шару 100 мм;
 + – внизу скляні кульки $d = 1$ мм, висота шару 55 мм, вгорі котуни діаметром 4 мм, висота шару 100 мм;
 Ж – змішаний шар скляних кульок діаметром 1 мм, $[V_1] = 71,4\%$ та котунів діаметром 10 мм, $[V_{10}] = 28,6\%$, загальна висота шару 125 мм

Також здійснено продування знизу котунів крупністю 10 мм з висотою шару 100 мм. При підвищенні витрати повітря крізь шар до $0,274 \text{ м}^3/\text{с}$ втрати тиску газу в ньому несуттєві та становлять менше 20 Па.

Монофракційні шари в агломераційному та доменному виробництвах практично не зустрічаються, тому досліджено поведінку біфракційних шарів з різним співвідношенням крупності фракцій та продуквою знизу.

Формували подвійний шар, у якому нижня частина заввишки 55 мм складалася з дрібних скляних кульок діаметром 1 мм, верхня частина заввишки 100 мм – з великих котунів діаметром 10 мм. Сумарна

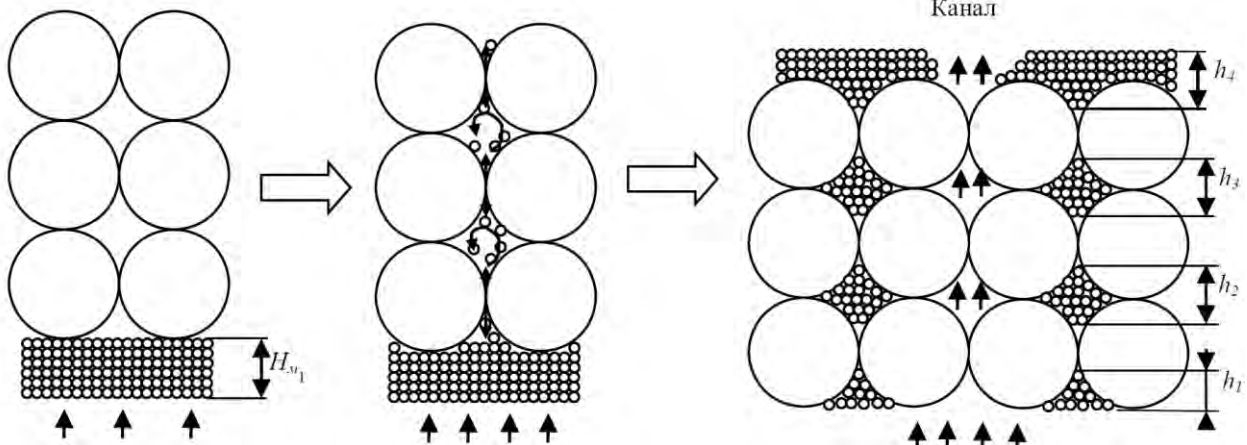


Рисунок 3 – Зміна розміщення дрібних фракцій у шарі за підвищення тиску газу під шаром

висота шару становила 155 мм. Вміст дрібних та великих частинок становив 35,5 та 64,5 %, відповідно.

Починаючи з $\Delta P_{кр} = 1120$ Па, відбувалося поступове переміщення дрібних фракцій вгору порожнечами між великими фракціями. У зв'язку з тим, що дрібні гранули також прагнуть вниз під дією сил тяжіння, а тертя зневажливо мало, відбувалася циркуляція кульок у каналах (рис. 3). Подальше зростання тиску газу під шаром сприяло повному переміщенню дрібних фракцій з-під шару великих котунів у його порожнечі з максимальним зниженням порізності. Крім того, дрібні фракції, які не помістилися в пустотах, виносилися з шару великих котунів. Таким чином, зверху утворився шар із дрібних кульок висотою близько 15 мм. Втрати тиску в шарі стали приблизно вдвічі вищими, ніж для дослідженого раніше шару скляних кульок діаметром 1 мм. Це зумовлено тим, що досліджуваний зернистий шар характеризується об'ємним вмістом дрібних фракцій, що відповідає мінімуму порізності, при якій кульки діаметром 1 мм повністю заповнюють порожнечі між великими котунами. При цьому загальна висота стовпа кульок у каналах шару $H_{m2} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = \sum h_i$ збільшилася приблизно вдвічі по відношенню до вихідної висоти засипки (див. рис. 3). Крім того, збільшується звивистість каналів між великими котунами, якими проходить повітря, що сприяє підвищенню газодинамічного опору шару.

Аналогічно шару з кульок діаметром 1 мм сформувалися канали, які за своєю структурою нагадували гейзери, з яких періодично бульбашками виходило повітря. В результаті утворення каналів втрати тиску в шарі знизилися з 1490 до 1120 Па, а витрата повітря залишилася практично незмінною.

Ідентичні результати отримані під час продування біфракційного шару (див. рис. 2). Знизу дрібні котуни діаметром 1 мм, висота шару 50 мм. Вгорі великі котуни діаметром 10 мм, висота шару 100 мм. Сумарна висота шару 150 мм. Вміст дрібних частинок та великих становив 33,3 та 66,7 %, відповідно.

При перепаді тиску під шаром $\Delta P_{кр} = 700$ Па внизу починають «кипіти» дрібні котуни. Відбуваються приблизно однакові процеси, як і для дрібних скляних кульок, проте при тиску під шаром у 1,5–2 рази вище. Верхній рухомий шар котунів діаметром 10 мм під впливом підйомної сили тиску і при опусканні вниз приймає форму, зручну для руху газів. При цьому дрібні фракції переміщуються нагору. Сила тиску перегруповує структуру шару з великих котунів, розміщує в порожнинах дрібні та їх надлишок переносить нагору шару. Дрібні фракції не затримуються у вузьких місцях порожнин між великими, тому що вони там не утримуються силами розклинювання і тертя, і випадають під дією сил тяжіння.

У зв'язку з тим, що скляні кульки і котуни циркулювали в каналах великого діаметра, то для усунення цього явища прийнято рішення про зменшення діаметра великої фракції на проміжну діаметром 4 мм.

Попередньо здійснили продування монофракційного шару котунів діаметром 4 мм (див. рис. 2) заввишки 100 мм. Тиск $\Delta P_{кр} = 1650$ Па та $Q_{кр} = 40,2 \cdot 10^{-3}$ м³/с відповідає початку поступового переходу шару в «киплячий». При цьому спостерігалися пульсації тиску ± 100 Па та витрати $\pm 0,365 \cdot 10^{-3}$ м³/с, відповідні нестійкому шару. Після формування каналів-гейзерів відбувається мимовільне різке падіння перепаду з 1720 до 1620 Па. Зворотне зниження тиску газу під шаром супроводжується збільшенням витрат повітря через шар, ніж при прямому ході. Слід звернути увагу на зростання тиску газу під шаром з 900 до 1100 Па при постійному витраті повітря $Q = 27,4 \cdot 10^{-3}$ м³/с при прямому перебігу експерименту (див. рис. 2, АВ). Ймовірно, це обумовлено переформуванням упаковок котунів з пухких в щільніші під впливом сил тиску нижчих шарів на верхні, тобто відбулося явище, що нагадує «утряску» сипучого шару.

Продування біфракційного шару фракцій 1 і 4 мм здійснено для умов аналогічних біфракційному шару фракцій 1 і 10 мм (див. рис. 2). У нижній частині шару висотою 55 мм розташували дрібні скляні кульки діаметром 1 мм. У верхній частині шару висотою 100 мм – котуни діаметром 4 мм. Вміст частинок діаметром 1 та 4 мм склало 35,5 та 64,5 %, відповідно.

Тиску газу під шаром 2500 Па відповідає утворення порожнечі під ним, в якій циркулюють дрібні кульки. На межі розділу фракцій 1 і 4 мм утворився замикаючий шар і почалася переміщення всього шару вгору. Таке підвісання шару виникає при аварійному режимі роботи доменних печей, що відповідає високому перепаду нижнього тиску. Дослідники відзначають, що на фурмах доменної печі також є пульсація тиску частотою 15–25 Гц [15]. Це пояснюють утворенням та руйнуванням склепін над фурменними осередками та порційним надходженням коксу до зони горіння. Встановлено, що за 7–15 хв на початок підвісання шихти відбувається різке зниження частоти коливань.

При подальшому підвищенні тиску газу під шаром $\Delta P_{кр}$ сталося явище подібне до «вибуху». Шар миттєво «перевернуло». Великі і дрібні котуни частково змішалися, як показано на рис. 3. Повітря пішло каналами, що сформувалися в частині шару з фракцією 1 мм.

Слід зазначити, що процеси, що відбуваються в дослідженому біфракційному шарі частинок крупністю 1 і 4 мм, аналогічні монофракційним шаром з котунами 4 мм. При досягненні тиску під шаром 1600 Па та витрати повітря $0,164 \cdot 10^{-3}$ м³/с, мабуть, відбувається перепакування шару у більш щільні структури і перепад тиску різко збільшується до 2400 Па при порівняно невеликому збільшенні витрати повітря через шар $\Delta Q = 1,83 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

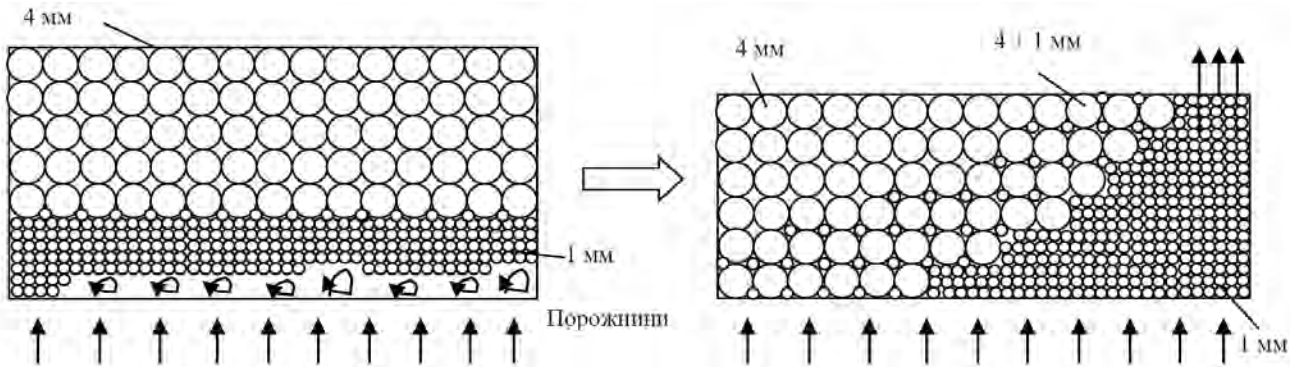
Ймовірно, що при створенні певних умов процеси перепакування шару характерні і для більших фракцій та інших співвідношень фракцій сумішей, проте головною обставиною при цьому залишається рухливість шару.

У представлених дослідженнях розглянуто переміщення дрібних фракцій 1 мм вгору шару і їх перерозподілі всередині каналів при домінуючій великій 10 мм або проміжній 4 мм фракціях. Вміст дрібної фракції у шарі істотно впливає на утворення каналів у шарі і, відповідно, на поділ фракцій по крупності за рахунок сил, що виникають у шарі під час руху газу всередині нього.

З метою виявлення впливу вмісту великих фракцій на сегрегацію шихти по крупності газами сформовано змішаний шар, що містить $[V_1] = 71,4$ % дрібних скляних кульок діаметром 1 мм та котуни діаметром 10 мм $[V_{10}] = 28,6$ %. Окремо кожна фракція формує шар заввишки 100 мм і 40 мм відповідно. Після змішування висота шару становила 125 мм. Великі фракції всередині шару не стикалися між собою. Таким чином, не було сформованих каналів та порожнеч між ними (рис. 4).

В результаті продування (див. рис. 2) встановлено, що псевдозрідження шару відбулося при тиску під шаром $\Delta P_{кр} = 2110$ Па та $Q_{кр} = 47,5 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Такі параметри відповідають монофракційному шару із дрібних скляних кульок висотою 170 мм. Тобто втрати тиску в шарі приблизно в 1,7 рази вище, ніж у монофракційному шарі скляних кульок з вихідною висотою 100 мм і, незважаючи на те, що висота змішаного шару склала 125 мм.

Повного осаду великих фракцій вниз шару не відбулося. Фракції розділилися лише у місці підйому бульбашок, тобто у тому місці, де шар став рухливим під впливом підйомних сил. Такий результат вказує на неоднорідну течію потоку газу в поперечному перерізі шару, характерну для більшості випадків псевдозрідження. Втрати тиску в шарі значною мірою залежать від співвідношення вмісту великих і дрібних фракцій та їхнього просторового розташування у шарі. Процеси псевдозрідження у шарах з різними співвідношеннями фракцій за крупністю та вмістом вимагають додаткових досліджень.

Рисунок 4 – Зміна структури шару зі збільшенням тиску газів під шаром вище $\Delta P_{кр}$

У зв'язку з тим, що для агломераційного шару характерна жорстка структура, яка слабо змінює форму порожнин під впливом сил тиску, проведено дослідження біфракційного шару з просмокуванням повітрям зверху вниз. Це необхідно для додаткового експериментального підтвердження обґрунтування закономірності зміни коефіцієнта газодинамічного опору, яка має два максимуми за зміни фракційного складу біфракційної шихти.

Досліджуваний шар був сформований у скляному прозорому кубі з розміром сторін основи 180×180 мм. Куб має перфороване дно та герметично встановлений на агломераційну чашу. Таким чином, умови максимально наближені до агломераційного процесу.

У верхній частині зернистого шару були розташовані дрібні котуни крупністю 1 мм. Висота шару дрібних котунів склала 70 мм. Нижня частина шару була представлена великими котунами крупністю 10 мм з висотою шару 140 мм. Загальна висота шару котунів склала 210 мм. Об'ємний вміст у шарі шихтових матеріалів склало $[V_1] = 33,3\%$ для дрібних та $[V_{10}] = 66,7\%$ для великих котунів.

При засипанні котунів діаметром 1 мм на шар котунів діаметром 10 мм, вони не прокидалися вниз між великими на відміну від дрібних скляних кульок. Цьому перешкоджає висока шорсткість дрібних фракцій і жорсткий скелет нижнього шару. Максимальне проникнення дрібних фракцій вниз у порожнечі відбувається на рівень прошарків 1–2 великих котунів.

Просмокування сформованого шару повітрям зверху вниз за аналогією з агломераційним процесом проводили з розрідженням $\Delta P = 5000$ Па. Для сухої агломераційної шихти перепади тиску газу в шарі суттєві, що обумовлено малими розмірами каналів та великими витратами газів. Змін у розташуванні частинок та деформації структури шару не відбулося (рис. 5).

Таким чином, для сухого шару доменної шихти, що продувається знизу вгору через його рухливість можливі інші процеси, ніж у сухому жорсткому шарі агломераційної шихти. Незважаючи на те, що в упаковці шару, що складається з котунів крупністю 10 мм, мінімальний розмір каналів більше 1 мм, дрібна фракція котунів утримується в порожнечах шару

великих котунів за рахунок сил тертя та розклинювання.

Рисунок 5 – Структура зернистого шару при просмокуванні через нього газів зверху вниз з розрідженням $\Delta P = 5000$ Па

Опрацювання результатів досліджень. Для зниження енергетичних втрат руху газів у зернистому шарі необхідно точний опис коефіцієнта газодинамічного опору Ψ рівняння Дарсі-Вейсбаха (1). Зазвичай дослідники наводять залежність коефіцієнта від числа Рейнольдса Re , яке розраховують за виразом [16]:

$$Re = \frac{\omega_{\phi} d_k}{\nu}, \quad (4)$$

де ω_{ϕ} – фактична швидкість руху газу в каналах, $\omega_{\phi} = U_0/\epsilon$, м/с;

ν – кінематична в'язкість газу, m^2/s ;

d_k – діаметр частинок чи каналу, м.

Значення порізності ϵ зернистого шару може змінюватися в широкому діапазоні в залежності від виду укладання частинок, їх шорсткості, форми та ін. її значення залишається незмінним. Виходячи з припущення, що порізність у поперечному перерізі шару однакова, і газу рухаються рівномірно, розраховані: фактична швидкість руху газів у каналах ω_{ϕ} , діаметр каналів d_k та значення коефіцієнта Рейнольдса.

У рухомому шарі при перевищенні швидкості руху газів критичного значення відбуваються деформації, псевдозрідження, клапанний ефект та інші

явища, що спричиняють зміну розташування частинок. Порізність таких шарів може змінюватися в широкому діапазоні і нерівномірно як вертикальним, так і горизонтальним площинам. Такі зміни структури виміряти і прогнозувати складно, тому стосовно рухомого шару застосування показника Рейнольдса Re не коректно. Найчастіше представляється залежність коефіцієнта опору від наведеної швидкості руху газів у каналах U_0 .

На основі формули (1) для проведених експериментів було розраховано значення коефіцієнта Ψ (рис. 6).

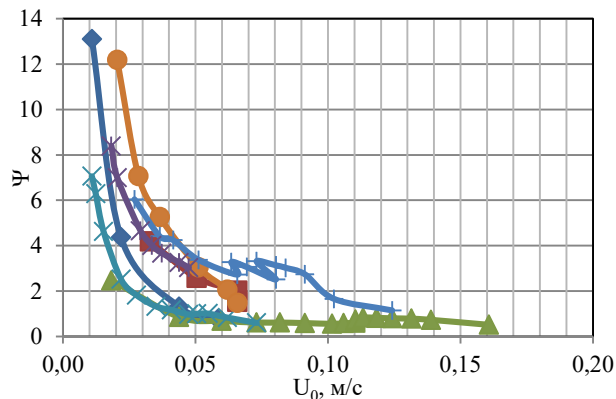


Рисунок 6 – Зміна коефіцієнта опору Ψ зернистих шарів зазначених складів при збільшенні наведеної швидкості повітря (маркери відповідають гранулометричним складам, вказаним на рис. 2)

З представлених результатів (рис. 6) випливає, що при продуванні шарів монофракційних шихт крупністю 1 (рис. 6, \diamond та \times) і 10 мм та змішаної біфракційної крупністю 1 та 10 мм (рис. 6, \ast) розраховані значення коефіцієнта Ψ зменшуються плавно відповідно до закономірності, для опису якої придатна формула [17]

$$\Psi = \frac{a}{Re} + \frac{b}{Re^n} + c, \quad (5)$$

де a , b , c , n – емпіричні коефіцієнти.

Перший доданок формули (5) описує ламінарну складову потоку, другий та третій – турбулентну.

Неістотне зниження Ψ при критичному тиску пояснюється переходом шару в псевдозріджений стан, а виникнення пульсацій – утворенням і рухом вгору «бульбашок».

Відзначено, що величина коефіцієнта опору для шихт з однаковим гранулометричним складом практично не залежить від висоти шару (рис. 5, \times і \diamond). Істотні відмінності Ψ при малих витратах повітря через шар, можливо, пов'язані з відмінностями в порізності шару при його засипанні газодинамічний циліндр, а також класом точності використовуваних вимірвальних приладів.

Змішаний шар з низьким вмістом великих фракцій при продуванні поводить себе аналогічно монофракційному шару дрібних фракцій крупністю 1 мм, тому крива Ψ (див. рис. 5, \ast) також має плавні

зміни навіть при переході шару в псевдозріджений стан. Слід зазначити, що при високих швидкостях повітря більше $\omega_{кр}/2$ величина Ψ більше приблизно у 3 рази, ніж монофракційного шару з кульок діаметром 1 мм. Це пояснюється нерівномірним рухом повітря через всю площу шару і підвищеною фактичною швидкістю його руху $\omega_{ф}$ у каналах, що утворюються.

Істотні відхилення Ψ від залежності (5) виникають при продуванні розділених шарів біфракційних шихт. Для співвідношення діаметрів великих та дрібних фракцій $d_{к}/d_{м} = 10$ (див. рис. 5, \blacksquare) спостерігається різке зниження коефіцієнта Ψ з 2,0 до 1,7 при наведеній витраті повітря крізь шар $\omega_{кр} = 0,67$ м/с, відповідному повному перерозподілу дрібних фракцій по висоті шару та утворенню стійких каналів.

При продуванні шарів розділених біфракційних шихт, що містять фракції 1 і 4 мм, в момент вибуху шару виникають злами на функції Ψ . Такі пульсації виникають через нестійкий стан шару, характерного для неоднорідного псевдозрідження. Утворення каналів супроводжується локальними періодичними змінами порізності шару та звивистості. Імовірно, що для випадку однорідного псевдозрідження такі злами не виникатимуть. Однак для критичних швидкостей руху газів у шарі доменної шихти характерніший неоднорідний їх розподіл. Виникнення бульбашок у шарі практично завжди спостерігається при використанні газових псевдозріджених систем, де відношення щільностей обох фаз велике. Крім того, нерівномірність порізності в псевдозрідженому шарі залежить від відстані до розподільного пристрою (фурм).

При співвідношеннях діаметрів частинок та газодинамічного циліндра менше $1/10$ його стінки не впливають на загальну газопроникність шару. Однак при переході в режим псевдозрідження утворення порожнин насамперед відбувалося поблизу стін реактора. Це пояснюється більш високими швидкостями руху газів через розпушуючу дію стінок. Крім того, перевіювання дрібниці більш характерне для тих зон, де підвищена швидкість газових потоків. Тому для доменного процесу з метою усунення підвисання матеріалів особливо важливим є стійке формування помірно розвиненого осьового ходу потоку газів.

Для розділеного біфракційного шару, що містить фракції 1 та 4 мм, утворення бульбашок біля стін апарату не відбулося. Імовірно це пояснюється виникненням ущільнюючих сил при деформації шару (рис. 7). У літературі критичний тиск (швидкість газів) псевдозрідження визначають на основі еквівалентності підйомних сил тиску $\Delta P \cdot S$ та ваги $m \cdot g$ що містяться у шарі частинок (з урахуванням сили Архімеда). Це вірно для клапанного ефекту при розміщенні дрібних частинок у вузьких пустотах між великими і без урахування сил тертя $F_{тр}$ стінки судини.

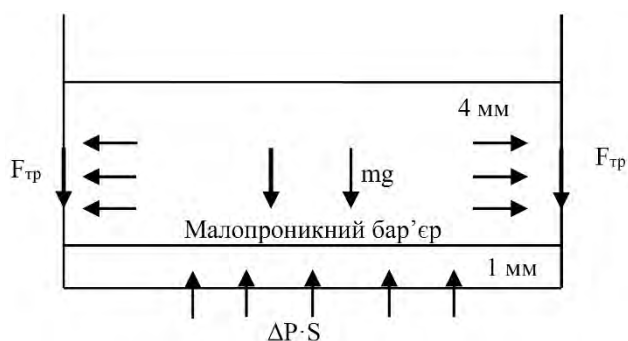


Рисунок 7 – Основні сили, що діють у розділеному біфракційному шарі 1 і 4 мм, при впливі повітряного потоку в продувному циліндрі

Наявність замикаючого шару з великим газодинамічним опором (малопроникний бар'єром) створює умови для збільшення підйомної сили верхньої частини шару. Однак, як відзначають багато дослідників, рух газів у сипучому шарі характеризується неоднорідністю, тому верхня частина шару піднімалася нерівномірно. У результаті, у місці максимального підйому стався прорив газів та перевертання шару. Надалі шар можна розглядати як монофракційний, що складається із дрібних частинок.

Ймовірно, що поведінка такого біфракційного шару багато в чому залежить від розподілу дрібних фракцій під шаром та їх відносного вмісту суміші.

Визначимо мінімальний відносний вміст дрібних фракцій у суміші для виникнення клапанного ефекту.

Найбільш ймовірно, що ромбоєдричне упакування частинок частіше зустрічається в монофракційному шарі сипучого матеріалу [7]. Порізність такого шару описують рівнянням Сліхтера [10, 18]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos\theta)\sqrt{1 + 2\cos\theta}} \quad (6)$$

де θ – кут укладання кульок, $60^\circ < \theta < 90^\circ$.

Можливий діапазон кута укладання куль одного діаметра в ромб становить від 60 до 90 , який відповідає зміні порізності шару від $0,259$ до $0,476$. Кут θ також визначає розташування та крупність дрібних частинок у звуженнях каналів. В результаті геометричних розрахунків визначено, що між кулями діаметром 4 мм із мінімальним кутом укладання 60° розміщується частка з мінімальним діаметром рівним $d_{\text{зап}} = 0,62$ мм. Для максимального кута укладання 90° мінімальний діаметр частки, що вписується, становить $d_{\text{зап}} = 1,62$ мм. Таким чином, здійснення клапанного ефекту за рахунок розміщення однієї дрібної частинки у вузьких порожнинах малоімовірно. Для цього необхідно розміщення двох і більше частинок, які б утримувалися в таких порожнинах за рахунок сил тертя.

Прийmemo, що у звуженні розміщуються дві дрібні частки. Тоді відносний об'ємний вміст дрібних фракцій, з урахуванням того, що обсяг великої фракції, що припадає на тетраєдричну упаковку, дорівнює об'єму однієї частинки, тобто

$[V_1]_{\text{мін}} = 2 \cdot V_1/V_4 = 2 \cdot d_1^3/d_4^3 \cdot 100 = 2 \cdot 1/64 \cdot 100 = 3,1 \%$. Ймовірно, що отримане значення занижене, проте воно вказує на виникнення замикаючої межі навіть при малих вмістах дрібної фракції.

Як було зазначено, при замикаючому ефекті дрібні фракції розміщуються у вузьких місцях між великими за рахунок сил тертя. Ця обставина вплинула відсутність малопроникного бар'єру в розділеному шарі гладких скляних кульок 1 мм і котунів 10 мм. Утримуючих сил було недостатньо, тому дрібні кульки вільно сегрегували. Заміна скляних кульок на котуни знову забезпечила високі коефіцієнти тертя та виникнення клапанного ефекту.

Це, спотворює залежність коефіцієнта опору Ψ та з великою ймовірністю виникає у всіх шарових процесах при співвідношеннях розмірів дрібних і великих фракцій менше $1/4$.

Висновки. На енергоефективність газодинамічних процесів шарових систем істотно впливають напрямки руху газів та властивості зернистого шару, які мають бути враховані у формулі Дарсі-Вейсбаха. Для продування шару знизу вгору характерна неоднорідна течія газів, що супроводжується утворенням каналів та бульбашок, аналогічно в'язким рідинам. Кордон переходу в режим псевдозрідження не залежить від витрати повітря, а визначається тиском під або над шаром та властивостями матеріалу. Незважаючи на це, для монофракційних шарів величина коефіцієнта опору зі збільшенням витрати повітря знижується плавно. Для розділених шарів виявлено злами залежності коефіцієнта газодинамічного опору, зумовлені формуванням малопроникної межі за рахунок розміщення дрібних фракцій у вузьких місцях між великими. Наявність такого зламу додатково залежить від співвідношення розмірів частинок і виникає при співвідношенні діаметрів дрібних та великих фракцій $1/4$. При більшому співвідношенні спостерігали поділ часток за крупністю. Характерна для агломераційного процесу продування зверху вниз повітрям котунів 1 і 10 мм не розділяла їх по крупності і коефіцієнт опору змінювався плавно. Жорстка структура шару забезпечує рівномірний рух газів в шарі, що агломерується, без якого неможливо отримати якісний агломерат. Дослідження обумовлюють закономірність зміни коефіцієнта газодинамічного опору на основі повторення форми каналів при зміні вмісту дрібної фракції в суміші. Клапанний ефект збільшує енергозатрати на рух газів в шарі на 30% . Усунення цих втрат дозволить підвищити висоту спічного шару з 400 до 550 – 600 мм та знизити витрати твердого палива шихти на 10 – 15% за рахунок його перерозподілу по висоті.

Список літератури

- Shinichi, Y., Toshihiko, U., Osamu, I. Simulation of Sintering Process – Effects of Air Flow, Liquid Film Cohesion Force and Fixation Process on Large Scale Crack. *ISIJ International*. 2021. Vol. 52, no. 10. P. 1785–1793. doi: 10.2355/isijinternational.52.1785.

2. Никитин Л. Д., Горбачев В. П., Шарига А. Д. и др. Производство и проплавка агломерата с пониженным содержанием закиси железа. *Сталь*. 1990. № 6. С. 5–8.
3. Листопадов В. С., Мирошниченко О. Н., Романчук А. В., Тарасов В. П., Тарасов А. В., Кривенко С. В. Результаты работы доменной печи № 7 ПАО «Арселормиттал Кривой Рог» с калибратором Тарасова. *Сталь*. 2015. № 2. С. 10–12.
4. Тарасов В. П., Тарасов П. В. *Теория и технология доменной плавки*. Москва: Интернет Инжиниринг, 2007. 384 с.
5. Birchhoff, G. *Hydrodynamics. A Study in Logic. Fact and Similitude*. Princeton, New Jersey, Princeton university press, 1960. 236 p.
6. Петрушов С. Н. *Современный агломерационный процесс. Монография*. Алчевск: ДонГТУ, 2006. 360 с.
7. Лялюк В. П., Кассим Д. А., Онопа В. Н., Донсков Е. Е. *Теоретические и экспериментальные исследования доменной плавки*. Кривой Рог: Дионат, 2016. 621 с.
8. Gosef T. L. Importance of Gas – Solid Contact in the Production of Pig Iron. *Blast Furnace and Steel Plant*. 1957. No. 5. P. 489–493.
9. Тарасов В. П., Кривенко С. В. Обоснование закономерности коэффициента газодинамического сопротивления при движении газа в слое окомкованной шихты. *Вісник Криворізького національного університету: зб. наукових праць*. 2017. Вип. 44. С. 171–177.
10. Гольдштик М. А. *Процессы переноса в зернистом слое*. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1984. 164 с.
11. Tarasov V. P., Krivenko S. V. Gas Dynamics of a Granular Bed. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44, iss. 5. P. 359–362. doi: 10.3103/S0967091214050143.
12. Davidson J. F., Harrison D. *Fluidization*. Cambridge, England, 1971. 728 p.
13. Томаш О. А. *Структура зернистого шара и рух газів у доменних печах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02*. Донецьк: Донецький нац. техн. ун-т, 2004. 35 с.
14. Разумов И. М. *Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов*. Москва: Издательство «Химия», 1972. 240 с.
15. Фиалков Б. С., Грузинов В. К. Контроль движения шихтовых материалов над зонами горения. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1961. № 10. С. 19–25.
16. Floarea, O., Smigelschi O. *Calculate de Operatii si Utilaje din Industria Chimica. Editura tehnica*. 1966, 224 p.
17. Коротич В. И., Фролов Ю. А., Бездежский Г. Н. *Агломерация рудных материалов*. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. 400 с.
18. Лейбензон Л. С. *Движение жидкостей и газов в пористой среде*. Москва-Ленинград: ОГИЗ, 1947. 244 с.
3. Listopadov V. S., Miroshnichenko O. N., Romanchuk A. V., Tarasov V. P., Tarasov A. V., Krivenko S. V. Rezultaty raboty domennoy pechi № 7 PAO «Arselormittal Krivoy Rog» s kalibratom Tarasova [Results of ArcelorMittal Kryvyi Rih blast furnace no. 7 with Tarasov calibrator.]. *Stal'*. 2015, no. 2, pp. 10–12.
4. Tarasov V. P., Tarasov P. V. *Teoriya i tekhnologiya domennoy plavki* [Theory and technology of blast furnace smelting]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2007. 384 p.
5. Birchhoff, G. *Hydrodynamics. A Study in Logic. Fact and Similitude*. Princeton, New Jersey, Princeton university press, 1960. 236 p.
6. Petrushov S. N. *Sovremennyy aglomeratsionnyy protsess. Monografiya* [The modern agglomeration process. Monograph]. Alchevsk, DonGTU Publ., 2006. 360 p.
7. Lyalyuk V. P., Kassim D. A., Onopa V. N., Donskov E. E. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya domennoy plavki* [Theoretical and experimental studies of blast furnace smelting]. Krivii Rih, Dionat Publ., 2016. 621 p.
8. Gosef T. L. Importance of Gas – Solid Contact in the Production of Pig Iron. *Blast Furnace and Steel Plant*. 1957, no. 5, pp. 489–493.
9. Tarasov, V. P., Krivenko S. V. Obosnovanie zakonomenosti koeffitsienta gazodinamicheskogo soprotivleniya pri dvizhenii gaza v sloe okomkovannoy shikhty [Rationale for the gas-dynamic drag coefficient for gas flow in a pelletised charge bed]. *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu: zb. naukovykh prats'*. 2017, no. 44, pp. 171–177.
10. Gol'dshitik M. A. *Protsessy perenosa v zernistom sloe* [Grain layer transport processes]. Novosibirsk, Institut teplofiziki SO AN SSSR Publ., 1984. 164 p.
11. Tarasov V. P., Krivenko S. V. Gas Dynamics of a Granular Bed. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, iss. 5, pp. 359–362. doi: 10.3103/S0967091214050143.
12. Davidson J. F., Harrison D. *Fluidization*. Cambridge, England, 1971. 728 p.
13. Tomash O. A. *Struktura zernystoho sharu i rukh haziv u domennykh pechakh: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.16.02* [Grain bed structure and gas movement in blast furnaces. Dr. eng. sci. diss.]. Donets'k, 2004. 35 p.
14. Razumov I. M. *Psevdoozhizhenie i pnevmotransport sypruchikh materialov* [Fluidisation and pneumatic conveying of bulk materials]. Moscow, Izdatel'stvo «Khimiya» Publ., 1972. 240 p.
15. Fialkov B. S., Gruzinov V. K. Kontrol' dvizheniya shikhtovykh materialov nad zonami gorennya [Controlling the movement of charge materials over the combustion zones]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1961, no. 10, pp. 19–25.
16. Floarea, O., Smigelschi O. *Calculate de Operatii si Utilaje din Industria Chimica. Editura tehnica*. 1966, 224 p.
17. Korotich V. I., Frolov Yu. A., Bezdezhskiy G. N. *Agglomeratsiya rudnykh materialov* [Agglomeration of ore materials]. Ekaterinburg, GOU VPO «UGTU-UPI» Publ., 2003. 400 p.
18. Leybenzon L. S. *Dvizhenie zhidkostey i gazov v poristoy srede* [Movement of fluids and gases in porous media]. Moscow-Lenigrad, OGIZ Publ., 1947. 244 p.

Надійшла (received) 02.12.2021

References (transliterated)

1. Shinichi, Y., Toshihiko, U., Osamu, I. Simulation of Sintering Process – Effects of Air Flow, Liquid Film Cohesion Force and Fixation Process on Large Scale Crack. *ISIJ International*. 2021, Vol. 52, no. 10, pp. 1785–1793. doi: 10.2355/isijinternational.52.1785.
2. Nikitin L. D., Gorbachev V. P., Shariga A. D. i dr. Proizvodstvo i proplavka aglomerata s ponizhennym sodержaniem zakisi zheleza [Production and smelting of sinter with reduced iron oxide content.]. *Stal'*. 1990, no. 6, pp. 5–8.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кривенко Сергій Вікторович (Кривенко Сергей Викторович, Serhii Victorovich Krivenko) – доктор технічних наук, доцент, Маріупольський державний університет, доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0319-7174>; e-mail: s.krivenko@mdu.in.ua.

О. С. КУЛИК

РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕГРІВІВ У РІЗНИХ ДІАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ МАСЛОНАПОВНЕНОМУ ОБЛАДНАННІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ РОЗЧИНЕНИХ У МАСЛІ ГАЗІВ

Однією з істотних проблем, які багато в чому визначають експлуатаційну надійність силових трансформаторів і, в ряді випадків, надійність постачання споживачів електричною енергією, є старіння парку даного обладнання. Тому завдання розробки, а також удосконалення методів діагностики, що дозволяють виявляти пошкодження високовольтних силових трансформаторів на ранній стадії, є актуальним і практично значущим. Одним з найбільш поширених методів неруйнівної діагностики, який дозволяє виявити до 90 % всіх можливих дефектів високовольтного маслonaповненого обладнання, є метод аналізу розчинених в маслі газів. На сьогодні, для розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур за результатами аналізу розчинених в маслі газів більшістю відомих стандартів і авторських методик використовується кілька діагностичних критеріїв. Проте в даних стандартах і методиках наявні суттєві відмінності в значеннях діагностичних критеріїв, що не дозволяють однозначно поставити діагноз для одних і тих же даних при використанні різних стандартів та методик. Оскільки локальні перегриви окремих ділянок ізоляції і елементів конструкції високовольтних силових трансформаторів є одним з поширених типів дефектів і такі дефекти можуть розвиватися протягом декількох років, їх розвиток представляє серйозну небезпеку для ізоляції трансформаторів. Тому для комплексного аналізу були використані результати аналізу розчинених в маслі газів по 1278 високовольтним силовим трансформаторам, в яких були виявлені перегриви в різних діапазонах температур. Аналізовані 1278 значень були розбиті на 31 масив даних з близькими значеннями відсоткового вмісту газів, відношеннями газів і зі схожими номограмами дефектів. На основі аналізу достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур з використанням норм та критеріїв, регламентованих найвідомішими стандартами та методиками, встановлено, що найбільшу достовірність розпізнавання забезпечують значення відношень газів, що регламентуються стандартом ІЕС 60599 та національним стандартом України.

Ключові слова: термічний дефект, аналіз розчинених в маслі газів (АРГ), відношення газів, відсотковий вміст газів, номограми дефектів, Трикутники Дюваля, надійність розпізнавання.

А. С. КУЛИК

РАСПОЗНАВАНИЕ ПЕРЕГРЕВОВ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР В ВИСОКОВОЛЬТНОМ МАСЛОНАПОЛНЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ

Одной из существенных проблем, во многом определяющих эксплуатационную надежность силовых трансформаторов и, в ряде случаев, надежность снабжения потребителей электрической энергией, является старение парка данного оборудования. Поэтому задача разработки, а также усовершенствования методов диагностики, позволяющих выявлять повреждения высоковольтных силовых трансформаторов на ранней стадии, актуальна и практически значима. Одним из наиболее распространенных методов неразрушающей диагностики, позволяющим выявлять до 90 % всех возможных дефектов высоковольтного маслonaполненного оборудования, является метод анализа растворенных в масле газов. Сегодня для распознавания перегревов в различных диапазонах температур по результатам анализа растворенных в масле газов большинством известных стандартов и авторских методик используется несколько диагностических критериев. Однако в данных стандартах и методиках имеются существенные отличия в значениях диагностических критериев, не позволяющих однозначно поставить диагноз для одних и тех же данных при использовании разных стандартов и методик. Поскольку локальные перегревы отдельных участков изоляции и элементов конструкции высоковольтных силовых трансформаторов являются одним из распространенных типов дефектов и такие дефекты могут развиваться в течение нескольких лет, их развитие представляет серьезную опасность для изоляции трансформаторов. Поэтому для комплексного анализа были использованы результаты анализа растворенных в масле газов по 1278 высоковольтным силовым трансформаторам, в которых были обнаружены перегревы в различных диапазонах температур. Анализируемые 1278 значений были разбиты на 31 массив данных с близкими значениями процентного содержания газов, отношениями газів и со схожими номограммами дефектов. На основе анализа достоверности распознавания перегревов в различных диапазонах температур с использованием норм и критериев, регламентированных известными стандартами и методиками, установлено, что наибольшую достоверность распознавания обеспечивают значения отношений, регламентируемых стандартом ІЕС 60599 и национальным стандартом Украины.

Ключевые слова: термический дефект, анализ растворенных в масле газов (АРГ), отношения газів, процентное содержание газів, номограммы дефектов, Треугольники Дюваля, надежность распознавания.

О. КУЛЫК

RECOGNITION OF OVERHEATING IN DIFFERENT TEMPERATURE RANGES IN HIGH-VOLTAGE OIL-FILLED EQUIPMENT BY THE DISSOLVED GAS ANALYSIS

One of the significant problems that largely determine the operational reliability of power transformers and, in some cases, the reliability of electricity supply to consumers, is the ageing of this equipment fleet. Therefore, the task of development and improvement of diagnostic methods that allow detecting faults of high-voltage power transformers at an early stage is relevant and practically significant. One of the most widespread methods of non-destructive diagnostics, which allows detecting up to 90 % of all possible defects of high-voltage oil-filled equipment, is the method of dissolved gas analysis. Today, most well-known standards and authors' methods use several diagnostic criteria to detect overheating in different temperature ranges based on the results of dissolved gas analysis. However, these standards and techniques differ considerably in the values of the diagnostic criteria, making it impossible to make an unambiguous diagnosis for the same data using different standards and techniques. Since local overheating of individual parts of insulation and structural elements of high-voltage power transformers is one of the common types of defects and such defects can develop over several years, their development is a serious threat to the insulation of transformers. Therefore, the results of dissolved gases analysis for 1278 high-voltage

© О. С. Кулик, 2021

power transformers in which overheating in different temperature ranges was detected were used for a comprehensive analysis. The 1278 values analysed were split into 31 data sets with similar gas percentages, gas ratios and defect nomograms. Based on an analysis of the recognition reliability of overheating in different temperature ranges, using the norms and criteria regulated by known standards and methods, it was found that the highest recognition reliability is provided by the ratio values regulated by IEC 60599 and the National Standard of Ukraine.

Keywords: thermal defect, dissolved gas analysis (DGA), gas ratios, gas percentage, defect nomograms, Duval Triangles, recognition reliability.

Вступ. Безперебійне і надійне постачання споживачів електричною енергією багато в чому буде визначатися експлуатаційною надійністю обладнання електричних мереж. Одним із найбільш дорогих, а також найбільш відповідальних видів обладнання електричних мереж є високовольтні силові трансформатори. Пошкодження високовольтних силових трансформаторів супроводжується значним економічним збитком і перервами у постачанні споживачів електричною енергією. Однією з істотних проблем, які багато в чому визначають експлуатаційну надійність силових трансформаторів і, в ряді випадків, надійність постачання споживачів електричною енергією, є старіння парку даного обладнання. Наприклад, тільки в АТ «Харківобленерго» [1] близько 89 % трансформаторів напругою 110–150 кВ знаходяться в експлуатації понад 25 років. В процесі тривалої експлуатації високовольтних силових трансформаторів відбувається погіршення стану обладнання, що може призвести до відмов цього обладнання. Близько 21,6 % технологічних порушень викликано старінням матеріалів, 19,4 % – дефектами конструкції і виготовлення, 16,8 % – недоліками експлуатації, 10,3 % – сторонніми впливами, 5,8 % – нерозрахунковими режимами в мережі, 4,2 % – дефектами ремонту, 3,5 % – кліматичними і зовнішніми впливами [2]. У зв'язку з цим завдання розробки, а також удосконалення методів діагностики, що дозволяють виявляти пошкодження високовольтних силових трансформаторів на ранній стадії, є актуальним і практично значущим.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним з найбільш поширених методів неруйнівної діагностики, який дозволяє виявити до 90 % всіх можливих дефектів високовольтного маслонаповненого обладнання, в тому числі і силових трансформаторів, є метод аналізу розчинених в маслі газів (АРГ). Одна із перших згадок про АРГ припадає на 1970 р. у збірнику доповідей XXIII сесії CIGRE, а першою країною, що почала широке застосування АРГ, була Велика Британія [3]. В основі методу АРГ лежить той факт, що будь-який термічний або електричний процес, що розвивається в трансформаторному маслі або в основній ізоляції, викликає її розкладання з виділенням газів, які, залежно від їх коефіцієнта розчинності, можуть повністю залишатися в маслі або частково виділятися в обсяг газу над маслом.

Всі дефекти, що виявляються АРГ, можна розділити на дві групи [4]:

- 1) термічні дефекти;
- 2) розряди в ізоляції.

У дефектах першої групи внаслідок аномального локального виділення енергії і, відповідно, підвищення температури відбувається прискорена деструкція

ізоляційних матеріалів, яка супроводжується виділенням продуктів деструкції, в тому числі і газів. Залежно від температури локальної зони термічні дефекти класифікуються на низькотемпературні перегріву (з температурою до 300 °С), перегріву в діапазоні середніх температур (300–700 °С) та високотемпературні перегріву (з температурою понад 700 °С).

Питанню порівняльного аналізу методів інтерпретації результатів АРГ присвячена велика кількість публікацій. При цьому досить часто порівнюються як традиційні методи розпізнавання, так і удосконалені (з використанням більш досконалого математичного апарату, наприклад штучної нейронної мережі [5], нечіткої логіки [6], нейронної мережі з архітектурою ANFIS [7], методу векторної релевантності [8], мереж Петрі [9] та Байєса [10] тощо). Окрім цього, найчастіше розглядається не більше 4 методів, за допомогою яких розглядається комплекс дефектів, регламентований в [11]. У той же час лише у незначній частині публікацій розглядається більше 4 методів інтерпретації результатів АРГ (наприклад, [12]), а також окремо взятий тип дефектів (наприклад, виключно дефекти електричного чи термічного типу).

Виконаний аналіз літературних джерел дозволив встановити, що і склад газів, і значення критеріїв, що використовуються для розпізнавання типу дефектів для електричних розрядів досліджено достатньо ґрунтовно (наприклад, [13–16]). У той же час аналогічних досліджень стосовно термічних дефектів вкрай мало [17, 18]. Крім того, у більшості робіт розпізнавання дефекту виконувалося з використанням тільки одного критерію – або значень відношень газів, або їх відсоткового вмісту. Комплексний підхід з використанням одночасно трьох діагностичних критеріїв для розпізнавання розрядів з різним ступенем інтенсивності запропонований в [15, 16]. В [17–20] такий підхід використаний для розпізнавання комбінованих дефектів в діапазоні низьких і середніх температур, а також термічних дефектів в діапазоні середніх та високих температур. Однак стосовно до перегрівів з температурою <300 °С такий підхід не застосовувався.

Крім того слід зазначити, що незважаючи на те, що перегріву ізоляції розвиваються на вкрай тривалому проміжку часу, порівняно з електричними розрядами, їхнє несвоєчасне виявлення також може призвести до пошкодження трансформаторів.

Мета статті. У даній статті описано розпізнавання термічних дефектів у різних діапазонах температур за результатами аналізу розчинених в маслі газів, а також розглянуто достовірність розпізнавання таких дефектів з використанням найбільш відомих стандартів та методик.

Розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур за результатами АРГ. На сьогодні, для розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ більшістю відомих стандартів і авторських методик використовується кілька діагностичних критеріїв. Аналіз діагностичних критеріїв, що використовуються для розпізнавання типів дефектів за результатами АРГ [21] показав, що в нормах і критеріях, що регламентовані для розпізнавання типу дефектів за результатами АРГ різними стандартами та методиками, наявні суттєві відмінності. В якості прикладу, в табл. 1–3 наведено значення діагностичних критеріїв, що використовуються для розпізнавання низько- (табл. 1), середньо- (табл. 2) та високотемпературних (табл. 3) перегрівів за результатами АРГ найбільш поширеними стандартами та методиками [11, 22–29].

У наведених нижче таблицях введені наступні позначення:

- «—» позначає, що це відношення або відсотковий вміст газу не використовується даним стандартом чи методикою.

- НХ – нехарактерне відношення. Для даного типу дефекту не розглядається.

- «*» – даний газ використовується стандартом чи методикою, проте його вміст не є визначальним для позначення меж дефекту.

- «^a» – використовується обернене відношення.

- «^b» – використовується відношення C_2H_4/C_3H_6 .

- «^b» – використовується відношення C_2H_6/CH_4 .

Як видно із таблиць, такі відмінності можуть привести до постановки різних діагнозів стосовно одних і тих же даних при використанні різних методів розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ.

Слід зазначити, що методи [26] та [28] для перегріву масла не регламентована температура, але високе значення відсоткового вмісту C_2H_4 у [28] є характерним для високотемпературних перегрівів. Окрім цього, для середньотемпературних перегрівів у [25] встановлено температурний діапазон 300–1000 °С, а для високотемпературних перегрівів – понад 1000 °С. Також, у [27] низькотемпературні перегріви розбиті на 2 піддіапазони з температурами 150–200 °С та 200–300 °С, середньотемпературним перегрівом відповідає діагноз «Перегрів провідників», а високотемпературним перегрівом – «Циркуляційні струми в обмотках» та «Струми в магнітопроводі та бакові, «гаряча» точка». У Трикутнику Дюваля 4 та 5 (рис. 1) низькотемпературним перегрівом відповідає область перегрівів масла або паперу (<250 °С).

Таблиця 1 – Значення відношень газів та відсоткового вмісту газів, що використовуються для розпізнавання низькотемпературних перегрівів за результатами АРГ найбільш поширеними стандартами та методиками

Метод/стандарт	Значення відношень газів				
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$
IEC 60599 [5]	НХ ¹	>1, але НХ	<1	—	—
СОУ-Н 46.501:2006 (Україна) [22]	НХ	>1	<1	—	—
СТО 34.01-23-003-2019 (РФ) [23]	НХ	>1, але НХ	<1	—	—
Метод ETRA [24]	—	—	<1	—	≤0,1
Метод MSS [25]	—	<1 ^a	<1	0,3–1 ^b	<0,3
Метод Дорненбурга [26]	<0,75	>1	—	<0,3	>0,4 ^a
Метод Роджерса [27]	<0,5 ²	≥1 ²	<1 ²	≥1 ^{2, в}	—
	<0,5 ³	0,1–1 ³	<1 ³	≥1 ^{3, в}	—
Метод/стандарт	Відсотковий вміст газів, %				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Метод ключового газу [28]	2	16	19	63	0
Трикутник Дюваля 1 [29]	—	*	—	<20	<4
Трикутник Дюваля 4 [29]	<9	*	>30	—	—
Трикутник Дюваля 5 [29]	—	*	>56	<10	—
	—	*	<14	<10	—

Примітка:
¹ – У графічній інтерпретації відношень газів, регламентованій IEC 60599, використовується значення <0,01.
² – Позначає перегріви в діапазоні температур 150–200 °С.
³ – Позначає перегріви в діапазоні температур 200–300 °С.

Таблиця 2 – Значення відношень газів та відсоткового вмісту газів, що використовуються для розпізнавання середньотемпературних перегрівів за результатами АРГ найбільш поширеними стандартами та методиками

Метод/стандарт	Значення відношень газів				
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$
IEC 60599 [5]	<0,1	>1	1–4	—	—
СОУ-Н 46.501:2006 (Україна) [22]	НХ	>1	1–4	—	—
СТО 34.01-23-003-2019 (РФ) [23]	<0,1	>1	1–4	—	—
Метод ETRA [24]	—	—	1–3	—	≤0,1
Метод MSS [25]	—	<1 ^a	≥1	0,3–1 ^b	<0,3
Метод Дорненбурга [26]	<0,75	>1	—	<0,3	>0,4 ^a
Метод Роджерса [27]	<0,5	0,1–1	1–3	<1 ^b	—
Метод/стандарт	Відсотковий вміст газів, %				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Метод ключового газу [28]	2	16	19	63	0
Трикутник Дюваля 1 [29]	—	*	—	20–50	<4
Трикутник Дюваля 5 [29]	—	*	≤12	10–35	—

Таблиця 3 – Значення відношень газів та відсоткового вмісту газів, що використовуються для розпізнавання високотемпературних перегрівів за результатами АРГ найбільш поширеними стандартами та методиками

Метод/стандарт	Значення відношень газів				
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$
IEC 60599 [5]	<0,2	>1	>4	—	—
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Україна) [22]	<0,2	>1	>4	—	—
СТО 34.01-23-003-2019 (РФ) [23]	<0,2	>1	>4	—	—
Метод ETRA [24]	—	—	≥ 3	—	$\leq 0,1$
Метод MSS [25]	—	$< 1^a$	≥ 1	$\geq 1^b$	0,3–3
Метод Дорненбурга [26]	<0,75	>1	—	<0,3	>0,4 ^a
Метод Роджерса [27]	<0,5	1–3	≥ 1	$< 1^b$	—
Метод/стандарт	Відсотковий вміст газів, %				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Метод ключового газу [28]	2	16	19	63	0
Трикутник Дюваля 1 [29]	—	*	—	>50	<15
Трикутник Дюваля 5 [29]	—	*	≥ 12	35–49	—
	—	*	≥ 14	49–70	—
	—	*	*	>70	—
	—	*	≥ 30	≥ 35	—

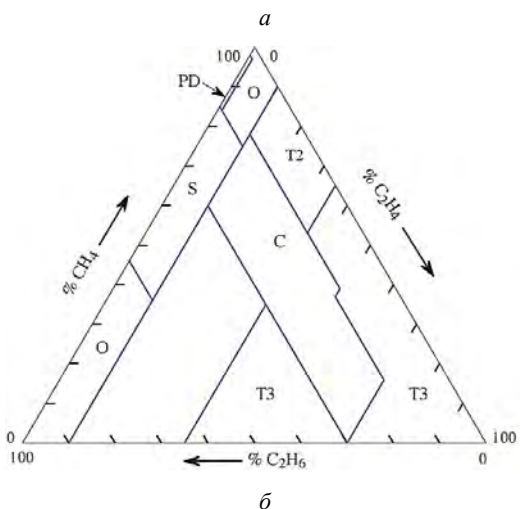
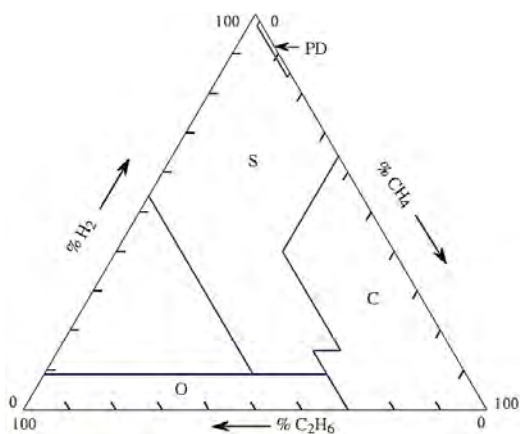
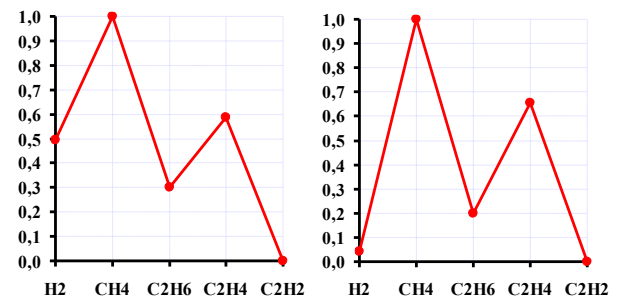
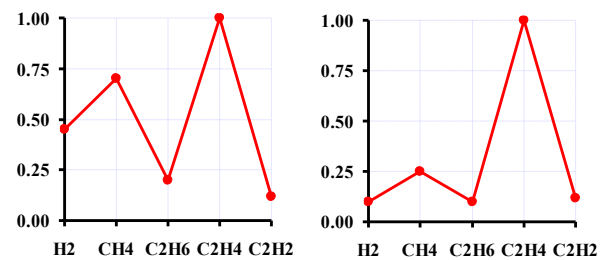


Рисунок 1 – Області дефектів у Трикутнику Дюваля 4 (а) та 5 (б)

Ще одним методом розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ є метод номограм [30]. У даному методі тип прогнозованого дефекту визначається на підставі порівняння побудованої номограми з еталонними номограмами. Однак серед еталонних номограм, що регламентуються діючими стандартами [22, 23], наявні лише номограми для перегрівів в діапазоні середніх (рис. 2 а) та високих (рис. 2 б) температур, проте відсутні номограми характерні для перегрівів в діапазоні низьких температур, що унеможливує використання даного методу для розпізнавання таких дефектів.



а



б

Рисунок 2 – Еталонні номограми, що відповідають перегрівам в діапазоні середніх (а) та високих (б) температур

Формування процедури досліджень.

Методологічною основою виконуваних досліджень є природна гіпотеза компактності, яка широко використовується в теорії технічної діагностики. Об'єкт, що діагностується, представляється у вигляді точки у просторі діагнозів, а координатами даної точки є значення діагностичних критеріїв (значення відношень газів, відсоткового вмісту газів і відношення концентрацій газів до газу з максимальною концентрацією). Згідно з гіпотезою компактності точки, що відображають один і той же стан (діагноз), групуються в одній області простору ознак. Іншими словами, для різних одиниць однотипного обладнання з одним і тим же типом дефекту відповідні значення діагностичних критеріїв повинні мати близькі значення і групуватися в одній області простору. Отже, для ліквідації протиріччя при постановці діагнозів з використанням окремо взятих критеріїв необхідно визначити області значень критеріїв, характерних для дефектів даного типу.

Одним із шляхів вирішення даного завдання є використання навчальної вибірки, тобто результатів АРГ з чітко встановленим верифікованим діагнозом. Як показують наведені в [15, 16, 19, 20] результати такий підхід добре себе зарекомендував для розпізнавання електричних розрядів і комбінованих дефектів. У зв'язку з цим даний підхід з деякими коригуваннями використовувався і для аналізу вмісту газів в обладнанні з перегрівом в різних діапазонах температур.

На першому етапі досліджень розраховувалися значення відношень пар газів, рекомендовані в [5, 22–27]. Для зниження похибки розрахунок виконувався тільки за умови, якщо значення концентрацій газів, що становлять дане відношення, перевищували значення, відповідні «межі появи газів в маслі». Ці значення залежать як від чутливості хроматографа, так і від методики вимірювання і, згідно з [22], складають: $H_2=50$, $CH_4=C_2H_6=C_2H_4=15$ і $C_2H_2=3$ мкл/л. Якщо розраховані значення відношень виходили за межі діапазону значень, що регламентуються діючими стандартами для даного дефекту, то результати АРГ для даної одиниці обладнання переносилися в інший масив.

Далі для кожної одиниці обладнання було розраховано відсотковий вміст газів вуглеводневого ряду і водню [15, 16, 19, 20]:

$$A_{i\%} = 100 \frac{A_i}{\Sigma}, \quad (1)$$

де $A_{i\%}$ – відсотковий вміст даного газу;

A_i – значення концентрації даного газу;

Σ – сума концентрацій газів вуглеводневого ряду і водню в пробі масла.

Розраховані значення порівнювалися між собою і у випадку наявності відмінностей у відсотковому вмісті результати АРГ переносилися в інший масив.

В якості графічного методу інтерпретації був використаний метод номограм. Суть методу [30] полягає в тому, що в пробі масла визначається газ з максимальною концентрацією, далі розраховуються величини відношень кожного газу до газу з найбільшою концентрацією. Будується графік номограми, на якому по осі абсцис розміщують гази строго в наступному порядку: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , а по осі ординат відкладають обчислені відношення. Отримані точки з'єднуються лінією. Отриманий графік порівнюється з еталонними номограмами і вибирається та, де досягається максимальний збіг. Ця номограма і визначає вид дефекту. Використовуючи даний метод для кожної одиниці обладнання були побудовані номограми. Ці номограми порівнювалися між собою і в разі наявності візуальних відмінностей між ними, навіть при близьких значеннях відношень газів і їх відсоткового вмісту, результати АРГ переносилися в інший масив.

Як показано в [31] навіть при одному і тому ж дефекті для обладнання одного і того ж типу побудовані номограми можуть істотно відрізнятися як один від одного так і від еталонних номограм. Для

обліку дрейфу значень координат номограм в [32] запропоновано використовувати не еталонні номограми, а еталонні області, які будуються за результатами АРГ обладнання з одним і тим же типом дефекту. В якості значень меж еталонних областей використовуються максимальні і мінімальні значення координат (відношення кожного з газів до газу з максимальною концентрацією), отриманих для досліджуваних масивів результатів АРГ. Для розпізнавання типу дефекту з використанням графічних областей в [32] запропоновано використовувати метод діагностики за відстанню до множини (діагностика за прецедентом). У цьому методі оцінюється діагностична відстань від номограми дефекту, побудованої за результатами АРГ обладнання, що діагностується, до всіх номограм, що утворюють область з даним діагнозом:

$$l = \left(\left| \frac{H_{2i}}{A_{\max i}} - \frac{H_{2j}}{A_{\max j}} \right|^v + \left| \frac{CH_{4i}}{A_{\max i}} - \frac{CH_{4j}}{A_{\max j}} \right|^v + \left| \frac{C_2H_{6i}}{A_{\max i}} - \frac{C_2H_{6j}}{A_{\max j}} \right|^v + \left| \frac{C_2H_{4i}}{A_{\max i}} - \frac{C_2H_{4j}}{A_{\max j}} \right|^v + \left| \frac{C_2H_{2i}}{A_{\max i}} - \frac{C_2H_{2j}}{A_{\max j}} \right|^v \right)^{\frac{1}{v}}, \quad (2)$$

де l – діагностична відстань;

$A_{\max i}$ та $A_{\max j}$ – значення концентрації газу з максимальним вмістом для i -го та j -го трансформаторів;

H_{2i} , H_{2j} , CH_{4i} , CH_{4j} , C_2H_{6i} , C_2H_{6j} , C_2H_{4i} , C_2H_{4j} , C_2H_{2i} , C_2H_{2j} – значення концентрації газів для i -го та j -го трансформаторів;

v – міра відстані ($v=2$).

Отримані значення діагностичних відстаней порівнюються між собою і «запам'ятовується» мінімальна відстань. Діагностований об'єкт відноситься до області з мінімальним значенням діагностичної відстані:

$$x \in S_i, \text{ якщо } l_i = \min \left(\min_{a_k^i \in S_k} \right). \quad (3)$$

Такий підхід дозволяє не тільки безпомилково відносити номограму об'єкта, що діагностується, до характерної області, навіть в умовах перетину кордонів області, а й знаходити всередині області ідентичний об'єкт з найбільш близькими значеннями координат, що дозволяє оцінити не тільки тип дефекту, але і можливу причину його появи.

Аналіз значень діагностичних критеріїв, що використовуються для розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур за результатами АРГ. Локальні перегриви окремих ділянок ізоляції і елементів конструкції високовольтних силових трансформаторів з температурою менше 300 °С є одним з поширених типів дефектів. Поява таких дефектів не призводить до раптового пошкодження трансформаторів, але прискорює процеси старіння

ізоляції, і скорочує їх ресурс. Крім того, існує реальна можливість переростання низькотемпературних дефектів в дефекти з більш високою щільністю енергії. Вплив підвищеної температури призводить до деструкції масла і основної ізоляції трансформаторів під дією інфрачервоного випромінювання. В результаті утворюються продукти старіння ізоляції, в тому числі і газів, аналіз яких дозволяє виявляти і розпізнавати перегріву ізоляції, а також виконувати оцінку температури дефекту. Незважаючи на те, що на відміну від дефектів електричного типу, що мають відносно високу швидкість розвитку, локальні перегріву можуть розвиватися протягом декількох років, їх розвиток представляє серйозну небезпеку для ізоляції трансформаторів. Крім цього, як показують результати аналізу динаміки зміни критеріїв, в обладнанні з дефектами різного типу [17, 18] такі перегріву, при їх несвоєчасному виявленні, можуть перейти в дефекти більш небезпечного характеру (наприклад, в дугові або поверхневі розряди), що призводить до пошкодження трансформаторів.

Для аналізу значень діагностичних критеріїв, використовуваних для розпізнавання типу дефектів, були використані результати АРГ по 1278 високовольтним силовим трансформаторам, в яких були виявлені перегріву в різних діапазонах температур. Використовуючи підхід, заснований на послідовному виділенні результатів АРГ зі схожими значеннями діагностичних критеріїв, аналізовані 1278 значень були розбиті на 31 масив даних з близькими значеннями відсоткового вмісту газів (табл. 4), відношеннями газів (табл. 5) і зі схожими номограмами дефектів (рис. 3–6). Пунктирними лініями на рисунках виділені верхня і нижня межі областей. Суцільною лінією позначені центри областей, які збігаються з номограмами дефектів.

Слід зазначити, що серед еталонних номограм, що регламентуються діючими стандартами [22, 23], відсутні номограми характерні для перегріву в діапазоні низьких температур. Тому номограми, наведені на рис. 3, представлені вперше. Порівнюючи номограми дефектів (центри графічних областей), наведені на рис. 4 з еталонними номограмами (рис. 3 а), легко побачити, що максимальну схожість з еталонними мають центри графічних областей №3 і 4. Центри графічних областей, наведені на рис. 5 не регламентовані в діючих стандартах і не зустрічаються у відкритих літературних джерелах. Для високотемпературних перегріву має місце відповідність між центрами побудованих графічних областей для масивів №3–6 (рис. 6) і еталонними номограмами (рис. 2 б). Враховуючи, що результати АРГ, за якими побудовані дані області (рис. 4–6), отримані для перегріву з різними значеннями температури «гарячої точки», на різних стадіях розвитку перегріву, використання даних областей дозволить істотно підвищити достовірність розпізнавання таких дефектів.

Таблиця 4 – Відсотковий вміст газів в обладнанні з перегріву в різних діапазонах температур

№	Тип дефекту	Обсяг вибірки	Вміст газів, %				
			H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	Перегрів з температурою 150-300 °С	N=27	0-9	50-80	14-40	0,001-10	0-0,167
2		N=15	10-40	43-65	9-26	0,001-10	0-0,680
3		N=24	0-9,8	34-61	28-48	0,9-24	0-1,26
4		N=33	11-34	28-53	23-42	0-24	0-0,99
5		N=9	6-20	29-45	26-33	13-25	0-1,6
6		N=11	0-9	42-73	13-27	12-25	0-0,84
7		N=11	10-36	37-55	5-27	4-23	0-0,704
8		N=106	0-10	4-46	35-88	0,06-24	0-1,33
9		N=47	10-30	12-40	30-70	0,01-26	0-1,1
10		N=52	0-9,1	0,2-28	36-96	2,7-40	0-1,3
11		N=9	10-18	10-25	30-60	15-30	0-1,2
12	Перегрів з температурою 300-500 °С	N=30	10-41	37-75	2-19	7-18,5	0-1,1
13		N=12	0-9,9	60-93	0,6-17	6-19,8	0-0,7
14		N=67	10-32	30-57	6-24	20-36	0-2,26
15		N=33	0-9,9	37-72	7-27	20-42	0-1,1
16		N=5	15-24	27-32	20-25	25-31	0-0,75
17		N=7	1,4-9	33-38	24-31	28-36	0-0,56
18	Перегрів з температурою 500-700 °С	N=10	0-7	1-22	37-44	40-60	0-1,2
19		N=10	0-9,6	23-31	28-35	35-42	0-2,4
20		N=22	0-16	12-27	16-30	38-65	0-1,6
21		N=13	8-18	11-22	19-31	35-60	0-1,53
22		N=7	14-24	25-31	20-25	27-36	0-0,75
23		N=14	0-9	30-36	25-31	34-42	0-0,1
24		N=67	10-28	14-40	7-22	30-52	0-3,2
25		N=62	0-9,9	15-40	8-24	38-67	0-4,0
26	Перегрів з температурою вище	N=22	0-9,8	40-60	0-8	36-47	0-3,1
27		N=22	10-31,5	33-56	2-8,4	23-40	0-3,15
28		N=162	0-9,96	19-44,1	1,3-13,6	40-60	0-6,7
29		N=183	10-30	20-40	1,8-13,1	33-60	0-5,9
30		N=153.	0-9,96	3,6-30	0-15,5	60-95	0-5,8
31		N=33.	10-15,6	14-20	3-14	54-67	0-3,67

Таблиця 5 – Значення відношень газів в обладнанні з перегрівами в різних діапазонах температур

№	Значення відношень газів					
	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$
1	9,5–72,2	0,18–0,646	0,119–0,417	–	–	–
2	1,2–4,15	0,18–0,52	0,21–0,42	–	–	–
3	5–13,86	0,565–0,994	0,109–0,556	0,001–0,027	0,001–0,033	0,003–0,26
4	1,07–3,0	0,560–0,992	0,002–0,362	0,00014–0,05	0,0001–0,073	0,008–0,01
5	2,92–7,35	0,700–0,902	0,44–0,93	–	–	–
6	3,25–7,07	0,182–0,593	0,7–0,98	0,0001–0,0037	0,0002–0,014	0,0002–0,018
7	1,09–3,25	0,107–0,545	0,678–0,991	–	–	–
8	2,1–20,2	1,03–19,2	0,028–0,61	0,0002–0,09	0,0065–0,0345	0,0015–0,076
9	1,0–2,64	1,03–4,26	0,04–0,76	0,0001–0,03	0,0001–0,016	0,002–0,117
10	1,0–10	1,4–70	0,029–0,91	0,021–0,333	0,001–0,053	0,014–0,113
11	1,1–1,8	1,45–5,38	0,27–0,93	0,02–0,23	0,005–0,12	0,01–0,17
12	1,2–6,7	0,075–0,44	1,0–1,6	0,002–0,013	0,005–0,13	0,004–0,096
13	7,8–220	0,13–0,28	1,1–1,8	0,004–0,008	0,016–0,039	0,014–0,093
14	1,1–4,86	0,15–0,72	1,0–3,4	0,001–0,07	0,003–0,169	0,001–0,1
15	4,1–208	0,18–0,69	1,02–3,91	0,0001–0,02	0,0002–0,097	0,0002–0,029
16	1,1–1,4	0,77–0,86	1,03–1,15	–	–	–
17	6,6–7,4	0,64–0,87	1,01–1,4	–	–	–
18	3,5–15	2,2–12,1	1,05–1,56	0,01–0,053	0,004–0,03	0,003–0,02
19	3,8–7,2	1,1–1,41	1,02–1,36	–	–	–
20	2,1–29,6	1,02–1,39	1,46–3,9	0,016–0,046	0,012–0,043	0,004–0,021
21	1,1–1,54	1,1–2,4	1,32–1,95	–	–	–
22	1,4–1,8	0,69–0,88	1,15–1,62	0,003–0,027	0,004–0,031	0,003–0,027
23	3,6–35	0,71–0,96	1,25–1,45	–	–	–
24	1,03–3,55	0,26–1,23	1,73–3,9	0,001–0,1	0,002–0,25	0,001–0,08
25	2,5–17,3	0,33–1,14	1,77–3,9	0,001–0,16	0,001–0,28	0,0004–0,08
26	4,84–39,7	0,00009–0,173	5,38–868,6	0,0005–0,075	0,0034–42,85	0,0006–0,078
27	1,07–4,15	0,09–0,2	4,4–8,02	0,0007–0,078	0,0068–0,45	0,0014–0,079
28	2,0–40,99	0,035–0,59	4,02–38,75	0,0017–0,26	0,0065–2,05	0,001–0,129
29	1,0–3,3	0,054–0,62	4,016–24,1	0,0001–0,194	0,0021–0,66	0,0001–0,135
30	1,3–10,85	0,115–1,3	4,08–121,2	0,0002–0,66	0,0006–0,625	0,00004–0,0737
31	1,06–1,65	0,23–0,84	4,44–18,4	0,0005–0,188	0,0007–0,638	0,0001–0,0625

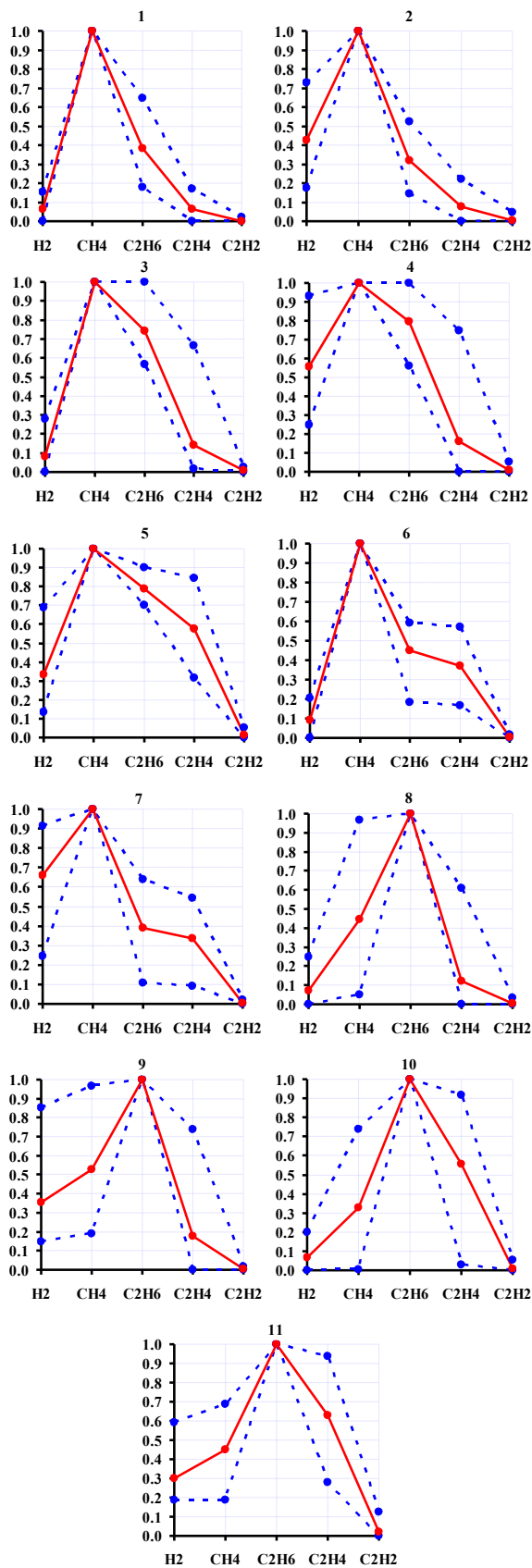


Рисунок 3 – Графічні області і номограми, що відповідають перегрівам в діапазоні температур 150–300 °С

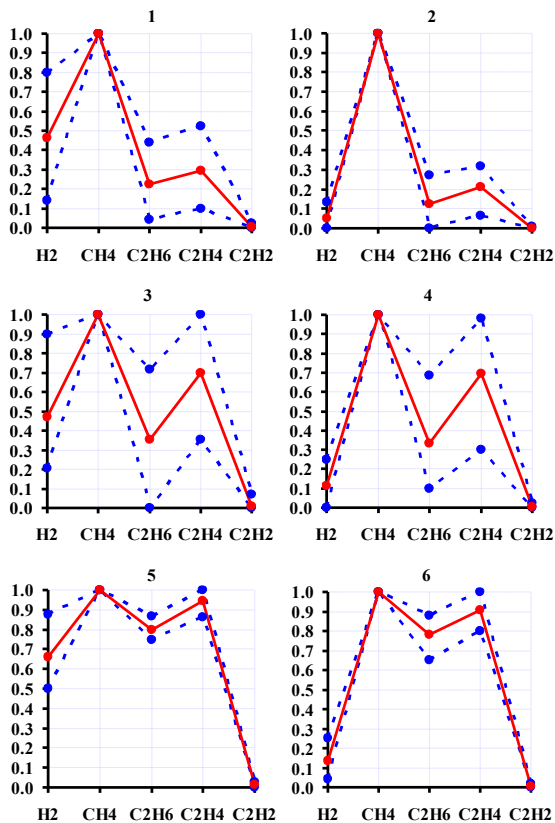


Рисунок 4 – Графічні області і номограми, що відповідають перегрівам в діапазоні температур 300–500 °С

Порівняльний аналіз достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур з використанням норм і критеріїв, що регламентуються відомими стандартами і методиками. Для оцінки достовірності існуючих методів для розпізнавання типу дефектів за результатами АРГ, для кожного масиву з однорідними значеннями критеріїв виконувалася діагностика з використанням значень відношень газів, рекомендованих відомими стандартами і авторськими методиками, а також деякими графічними методами (трикутники Дюваля, метод ЕТРА, а також графічний метод інтерпретації результатів АРГ, регламентований стандартом ІЕС 60599). При діагностиці з використанням методу ЕТРА для обладнання, в якому концентрації ацетилену не перевищували межі виявлення хроматографом, згідно з [22] значення відношення C_2H_2/C_2H_6 приймалося рівним 0,005.

Використовуючи підхід, наведений в [15–18], в процесі аналізу визначалася статистика правильних діагнозів, частково правильних діагнозів (правильно визначений тип дефекту, але помилково оцінена температура нагріву). Також фіксувалася статистика помилкових діагнозів і відмов від розпізнавання (тобто випадків, коли аналізований метод не дозволяє встановити діагноз). Результати аналізу наведені в табл. 6. Як і в [15–18], в стовпці 1 в чисельнику наведено відсоток правильних діагнозів, в знаменнику – частково правильних діагнозів. У чисельнику стовпця 2 наведено відсоток помилкових діагнозів, а в

знаменнику – відмов від розпізнавання. У таблиці типи термічних дефектів позначені наступним чином:

- Т1 – низькотемпературні перегрівів.
- Т2 – середньотемпературні перегрівів.
- Т3 – високотемпературні перегрівів.

Аналізуючи результати, наведені в таблиці 6, видно, що найбільше число правильних діагнозів було отримано з використанням значень відношень газів, регламентованих стандартами [11, 22]. Причому дане твердження справедливе для перегрівів в усіх діапазонах температур. Наступний найкращий результат розпізнавання отримано з використанням значень відношень газів, регламентованих стандартом [23], а також з використанням Трикутника Дюваля 1. Причому використання «допоміжних» Трикутників Дюваля 4 і 5 не завжди дозволило підтвердити діагноз, отриманий з використанням Трикутника Дюваля 1, що наглядно видно з рис. 7–10.

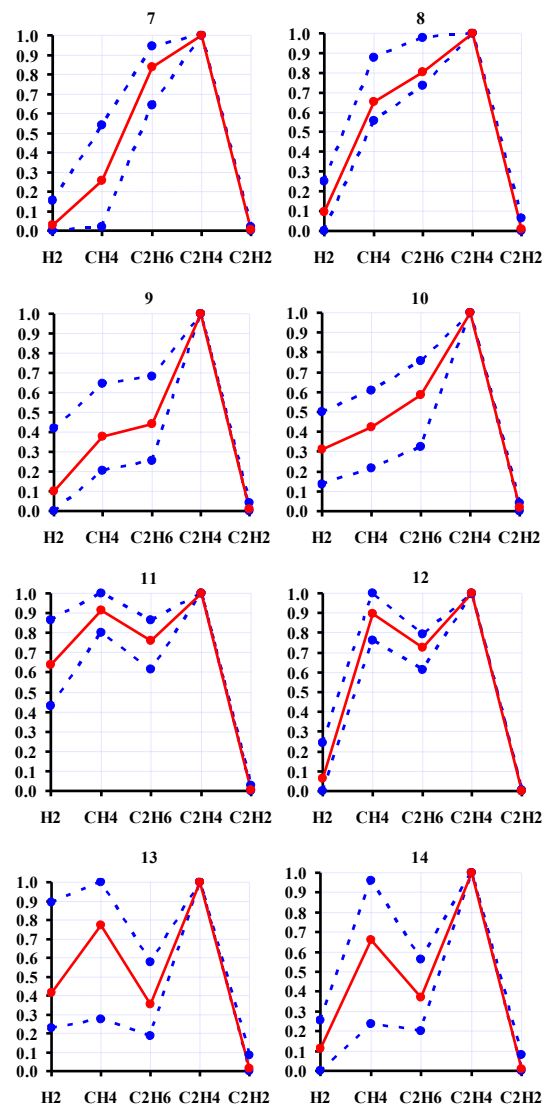


Рисунок 5 – Графічні області і номограми, що відповідають перегрівам в діапазоні температур 500–700 °С

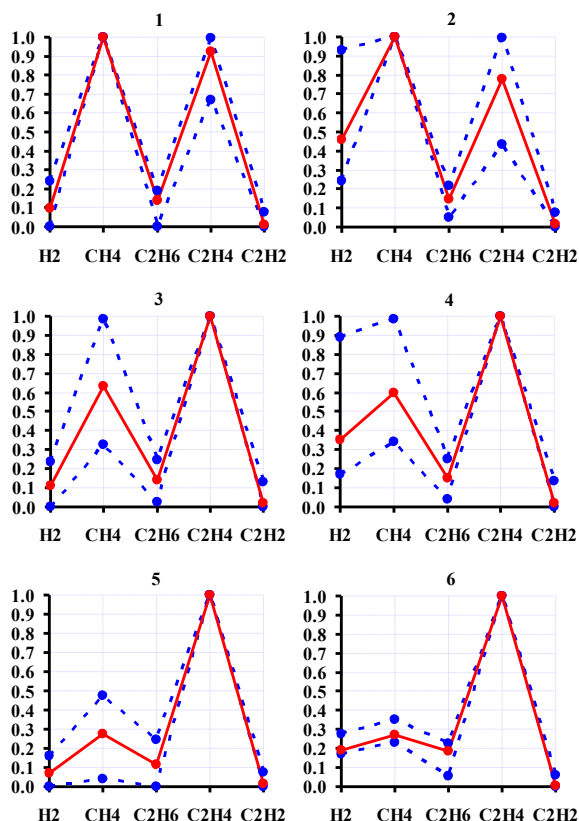


Рисунок 6 – Графічні області і номограми, що відповідають перегрівам з температурою понад 700 °С

Таблиця 6 – Результати порівняльного аналізу достовірності розпізнавання перегрівів в різних діапазонах температур з використанням норм і критеріїв, що регламентуються діючими стандартами і методиками

Метод, стандарт	Тип термічного дефекту						Σ	
	T1		T2		T3			
	1	2	1	2	1	2	1	2
IEC 60599 [5]	89	—	90	—	95	—	91,7	—
—	—	11	1	8	—	5	0,3	8
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Україна) [22]	89	—	90	—	95	—	91,7	—
—	—	11	1	8	—	5	0,3	8
Метод Дорненбурга [26]	—	—	—	—	—	—	—	—
63	38	53	47	81	19	65	35	
Метод Роджерса [27]	10	—	—	—	—	—	3,3	—
76	13	42	58	50	50	56,7	40	
Трикутник Дюваля 1 [29]	44	9	50	—	87	—	60	3
47	—	50	—	13	—	37	—	
Метод ETRA [24]	58	20	53	33	30	70	47	41
1	21	13	1	—	—	5	7	
Метод MSS [25]	65	33	—	—	18	—	27	11
—	3	98	2	81	1	60	2	
РД 153-34.0-46.302-00 (РФ) [23]	33	38	69	1	95	—	66	13
20	8	23	7	—	5	14	7	
Метод номограм [30]	—	—	28	—	92	—	40	—
—	100	—	72	—	8	—	60	—

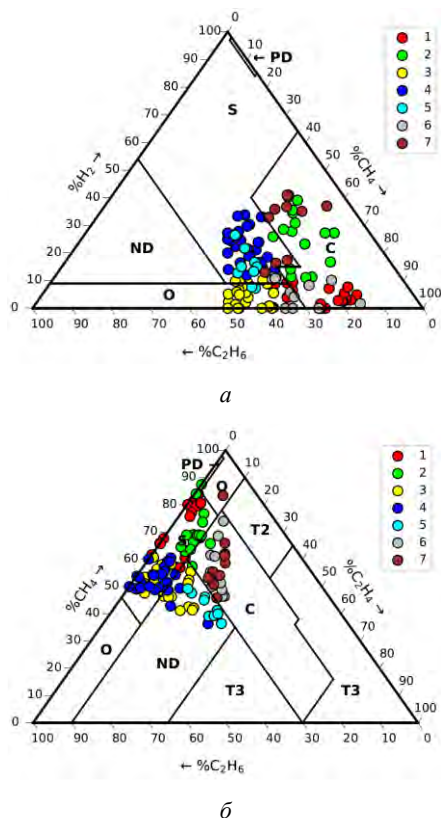


Рисунок 7 – Розпізнавання низькотемпературних перегрівів, для яких газом з максимальною концентрацією є метан, з використанням Трикутників Дюваля 4 (а) і 5 (б)

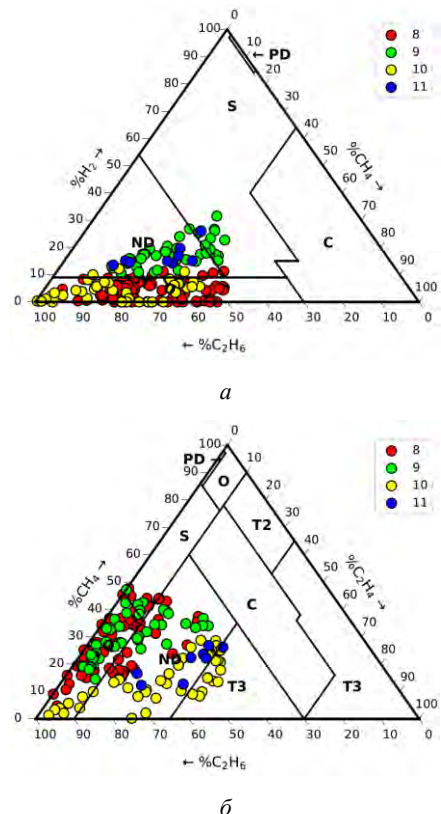


Рисунок 8 – Розпізнавання низькотемпературних перегрівів, для яких газом з максимальною концентрацією є етан, з використанням Трикутників Дюваля 4 (а) і 5 (б)

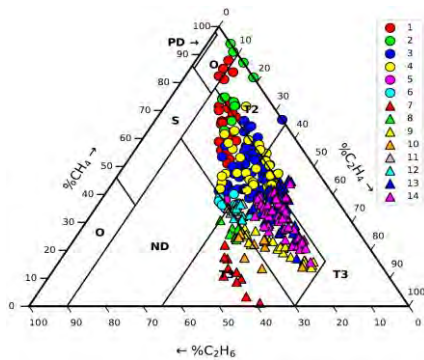


Рисунок 9 – Розпізнавання середньотемпературних перегрівів з використанням Трикутника Дюваля 5

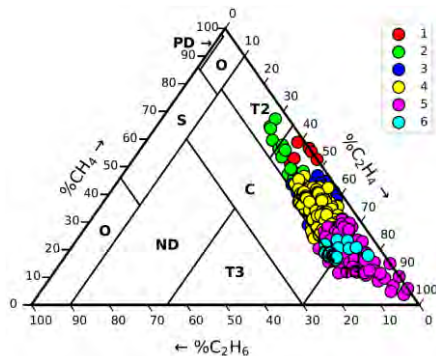


Рисунок 10 – Розпізнавання високотемпературних перегрівів з використанням Трикутника Дюваля 5

Як видно з рис. 7, використання Трикутника Дюваля 4 для розпізнавання низькотемпературних перегрівів, для яких газом з максимальною концентрацією є метан дозволило встановити даний діагноз тільки для даних з масивів №1, 3, 5 та 6. А ось використання Трикутника Дюваля 5 не дозволило підтвердити діагноз, отриманий для згаданих масивів за допомогою Трикутника Дюваля 4. У свою чергу, використання трикутника Дюваля 4 для розпізнавання низькотемпературних перегрівів, для яких газом з максимальною концентрацією є етан (рис. 8), дозволило встановити правильний діагноз тільки для 2 із 4 масивів (№8 і №10), а використання Трикутника Дюваля 5 дозволило підтвердити діагноз, отриманий з використанням Трикутників Дюваля 1 і 4. Використання «допоміжного» трикутника Дюваля 5 (рис. 9) для розпізнавання середньотемпературних перегрівів у 77,2 % всіх випадків дозволило поставити діагноз можливої карбонізації паперу при температурі вище 300 °C і у 7,2 % – середньотемпературні перегріву. У той же час, якщо використання Трикутника Дюваля 1 для діагностування високотемпературних перегрівів дозволило поставити правильний діагноз у 87 % всіх випадків, то використання «допоміжного» Трикутника Дюваля 5 (рис. 10) дозволило поставити правильний діагноз для 95,65 % усіх аналізованих даних.

Таким чином, на прикладі Трикутників Дюваля видно, що використання різних діагностичних критеріїв (у вигляді використовуваних газів в різних трикутниках) стосовно одних і тих же даних може

привести до постановки різних діагнозів. Крім того, до такого результату призводить також використання не всіх критеріїв (в трикутниках використовуються значення тільки 3-х газів із 5).

Висновки. У роботі наведено результати комплексного аналізу значень відношень газів, відсоткового вмісту газів та графічних областей дефектів для 1278 трансформаторів, у яких було виявлено низько-, середньо- та високотемпературні перегріву.

На основі аналізу достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур з використанням норм та критеріїв, регламентованих найвідомішими стандартами та методиками, встановлено, що найбільшу достовірність розпізнавання забезпечують значення відношень газів, що регламентуються стандартом ІЕС 60599 та національним стандартом України.

Отримані в роботі значення діапазонів відношень газів, їх відсоткового вмісту, а також побудовані графічні області та номограми, що відповідають перегрівам в діапазоні різних температур, можна розглядати як діагностичну схему, що дозволяє розпізнавати тип дефекту з одночасним використанням трьох критеріїв, що дозволить суттєво підвищити експлуатаційну надійність силових трансформаторів та продовжити їх ресурс.

Список літератури

1. План розвитку системи розподілу АТ «Харківобленерго» на 2021–2025 роки. URL: https://www.oblenergo.kharkov.ua/sites/default/files/pdf/prsr_at_har_kivoblenergo_21-25.pdf (дата звернення: 02.08.2021).
2. Чичинский М. И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния. *Энергетик*. 2000. №11. С. 29–31.
3. Виноградова Л. В., Игнатъев Е. Б., Овсянников Ю. М., Попов Г. В. *Хроматографический анализ растворенных газов в диагностике трансформаторов*. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2013. 104 с.
4. Шутенко О. В., Кулик О. С., Пономаренко С. Г. *Порівняльний аналіз діючих стандартів і методик з інтерпретації результатів АРГ: навчально-методичний посібник для виконання індивідуальних розрахунково-графічних завдань*. Харків: Друкарня Мадрид, 2021. 126 с.
5. Naganathan G., Senthilkumar M., Aiswariya S., Muthulakshmi S., Santhiya Riyasen G., Mamtha Priyadarshini M. Internal fault diagnosis of power transformer using artificial neural network. *Materials Today: Proceedings*. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.206.
6. Apte S., Somalwar R., Wajirabdar A. Incipient Fault Diagnosis of Transformer by DGA Using Fuzzy Logic. *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/PEDES.2018.8707928.
7. T. Kari et al. An integrated method of ANFIS and Dempster-Shafer theory for fault diagnosis of power transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25, no. 1. P. 360–371. doi: 10.1109/TDEI.2018.006746.
8. Lin N., Zhao J., Li K. Application of data mining technology based on RVM for power transformer fault diagnosis. *Advances in Computer Science and Information Engineering*. 2012. Vol. 2. P. 121–127.
9. Pamuk N. Diagnosis of Fault Type by Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil Using Petri Net Technology. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt*. 2014. Vol. 2. P. 79–86.
10. Wanjare S. B., Swami P. S., Thosar A. G. DGA Interpretation for Increasing the Percent of Accuracy by Bayesian Network Method

- Comparing IEC TC 10 Database. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2018. Vol. 62, no. 1. P. 46–51. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V62P208.
11. IEC 60599:2015. *Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015. 78 p.
 12. Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240911.
 13. Шутенко О. В. Анализ содержания газов в маслонаполненном оборудовании с дефектами электрического типа. *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE*. 2018. Т. 3, № 38. С. 1–16. doi: 10.5281/zenodo.2222331.
 14. Shutenko O., Yakovenko I. Analysis of Gas Content in High Voltage Equipment With Partial Discharges. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, 2018. P. 347–352. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559534.
 15. Шутенко О. В., Кулик О. С. Диагностика оливоднаповненого устаткування з комбінованими дефектами за результатами аналізу розчинених в маслі газів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. № 203. С. 39–42.
 16. Shutenko O., Kulyk O. Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Low Energy Density Discharges. *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 258–277. doi: 10.15676/ijeii.2020.12.2.6.
 17. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of High-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598575.
 18. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of Mid-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 401–406. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570059.
 19. Shutenko O. Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas. *Energetika*. 2019. Vol. 65, no. 1. P. 21–38. doi: 10.6001/energetika.v65i1.3973.
 20. Shutenko O., Kulyk O. Diagnosis of Oil-Filled Equipment with X-Wax Deposition Based on Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575623.
 21. Kulyk O. Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2020. № 1. С. 15–25. doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.
 22. *СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Диагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. Методичні вказівки*. Київ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. 91 с.
 23. *РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле*. Москва: НЦ ЭНАС, 2001. 41 с.
 24. Guideline for the refurbishment of Electric Power Transformers. *Electrical Cooperative Research Association*. 2009. Vol. 65, no. 1.
 25. Müller R., Schliesing H., Soldner K. Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft*. 1977. No. 76. P. 345–349.
 26. Dörnenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis. *Brown Boveri Review*. 1974. Vol. 61. P. 238–274.
 27. Rogers R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1978. Vol. EI-13, no. 5. P. 349–354. doi: 10.1109/TEI.1978.298141.
 28. *IEEE Std C57.104–2019. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 98 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8890040.
 29. Duval M. The Duval Triangle for load tap changers non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. Vol. 24, no. 6. P. 22–29. doi: 10.1109/MEI.2008.4665347
 30. Kawamura T., Kawada N., Ando K., Yamaoka M., Maeda T., Takatsu T. Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. *SIGRE Session Report 12–05*. Paris, 1986.
 31. Шутенко О. В. Анализ графических образов, построенных по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов с различными типами дефектов. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2017. № 31 (1253). С. 97–121.
 32. Shutenko O., Jakovenko I. Fault Diagnosis of Power Transformer Using Method of Graphic Images. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. Lviv, Ukraine. 2017. P. 66–69. doi: 10.1109/YSF.2017.8126594.

References (transliterated)

1. *Plan rozvytku systemy rozpodilu AT «Kharkivoblenerho» na 2021–2025 roky* [The distribution system development plan of JSC Kharkivoblenergo for 2021–2025.]. Available at: https://www.oblenergo.kharkov.ua/sites/default/files/pdf/prsr_at_kharkivoblenergo_21-25.pdf (accessed 02.08.2021).
2. Chichinskiy M. I. Povrezhdanost' maslonaplnnogo oborudovaniya elektricheskikh setey i kachestvo kontrolya ego sostoyaniya [Damageability of oil-filled electrical network equipment and the quality of its condition monitoring]. *Energetik*. 2000, No. 11, pp. 29–31.
3. Vinogradova L. V., Ignat'ev E. B., Ovsyannikov Yu. M., Popov G. V. *Khromatograficheskiy analiz rastvorennykh gazov v diagnostike transformatorov* [Chromatographic analysis of dissolved gases in transformer diagnostics]. Ivanovo, State Educational Institution of Higher Professional Education Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2013, 104 p.
4. Shutenko O. V., Kulyk O. S., Ponomarenko S. H. Porivnyal'nyy analiz diyuchykh standartiv i metodyk z interpretatsiyi rezul'tativ ARH: navchal'no-metodychnyy posibnyk dlya vykonannya indyvidual'nykh rozrakhunkovo-hrafichnykh zavdan' [Comparative analysis of existing standards and methodologies for interpreting DGA results: study guide for individual computational and graphical tasks]. Kharkiv, Typography Madrid Publ., 2021. 126 p.
5. Naganathan G., Senthilkumar M., Aiswariya S., Muthulakshmi S., Santhiya Riyasen G., Mamtha Priyadharshini M. Internal fault diagnosis of power transformer using artificial neural network. *Materials Today: Proceedings*. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.206.
6. Apte S., Somalwar R., Wajirabdkar A. Incipient Fault Diagnosis of Transformer by DGA Using Fuzzy Logic. *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/PEDES.2018.8707928.
7. T. Kari et al. An integrated method of ANFIS and Dempster-Shafer theory for fault diagnosis of power transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018, vol. 25, no. 1, pp. 360–371. doi: 10.1109/TDEI.2018.006746.
8. Lin N., Zhao J., Li K. Application of data mining technology based on RVM for power transformer fault diagnosis. *Advances in Computer Science and Information Engineering*. 2012, vol. 2. pp. 121–127.
9. Pamuk N. Diagnosis of Fault Type by Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil Using Petri Net Technology. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt*. 2014, vol. 2, pp. 79–86.
10. Wanjare S. B., Swami P. S., Thosar A. G. DGA Interpretation for Increasing the Percent of Accuracy by Bayesian Network Method Comparing IEC TC 10 Database. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2018, vol. 62, no. 1, pp. 46–51. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V62P208.
11. IEC 60599:2015. *Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*.

- Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015. 78 p.
12. Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240911.
 13. Shutenko O. V. Analiz sodержaniya gazov v maslonapolnennom oborudovanii s defektami elektricheskogo tipa [Analysis of the Content of Gases in Oil-Filled Equipment with Electrical Defects]. *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE*. 2018, Vol. 3, no. 38, pp. 1–16. doi: 10.5281/zenodo.2222331.
 14. Shutenko O., Yakovenko I. Analysis of Gas Content in High Voltage Equipment With Partial Discharges. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 347–352. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559534.
 15. Shutenko O. V., Kulyk O. S. Diahnostyka olyvonapovnenoho ustakuvannya z kombinovanyimi defektami za rezul'tatamy analizu rozchynenykh v masli haziv [Diagnostics of oil-filled equipment with combined defects based on analysis of dissolved gases in oil]. *Visnyk Kharkivskoho natsional'nogo tekhnichnogo universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*. 2019, no. 203, pp. 39–42.
 16. Shutenko O., Kulyk O. Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Low Energy Density Discharges. *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 258–277. doi: 10.15676/ijeei.2020.12.2.6
 17. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of High-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598575.
 18. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of Mid-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021, pp. 401–406. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570059.
 19. Shutenko O. Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas. *Energetika*. 2019, vol. 65, no. 1, pp. 21–38. doi: 10.6001/energetika.v65i1.3973.
 20. Shutenko O., Kulyk O. Diagnosis of Oil-Filled Equipment with X-Wax Deposition Based on Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575623.
 21. Kulyk O. Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2020, no. 1, pp. 15–25. doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.
 22. *SOU-N EE 46.501:2006. Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornoho obladnannya za rezul'tatamy khromatohrafichnoho analizu vil'nykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izolyatsionomu masli. Metodychni vkazivky* [Company Standard 46.501:2006. Diagnosis of oil-filled transformer equipment by chromatographic analysis of free gases sampled from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil. Methodological guidelines]. Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2007. 91 p.
 23. *RD 153-34.0-46.302-00. Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivayushchikhsya defektov transformatornogo oborudovaniya po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenykh v masle* [Guiding Document 153-34.0-46.302-00. Procedural Guidelines for Diagnostics of Defects Developing in Transformer Equipment Using the Results of Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in the Oil]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2001, 41 p.
 24. Guideline for the refurbishment of Electric Power Transformers. *Electrical Cooperative Research Association*. 2009, vol. 65, no. 1.
 25. Müller R., Schliesing H., Soldner K. Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft*. 1977, no. 76, pp. 345–349.
 26. Dörnenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis. *Brown Boveri Review*. 1974, vol. 61, pp. 238–274.
 27. Rogers R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*. 1978, Vol. 5, no. 38, pp. 34–354. doi: 10.1109/TEI.1978.298141.
 28. *IEEE Std C57.104–2019. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 98 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8890040.
 29. Duval M. The Duval Triangle for load tap changers non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. vol. 24, no. 6, pp. 22–29. doi: 10.1109/MEI.2008.4665347.
 30. Kawamura T., Kawada N., Ando K., Yamaoka M., Maeda T., Takatsu T. Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. *SIGRE Session Report 12–05*. Paris, 1986.
 31. Shutenko O. V. Analiz graficheskikh obrazov, postroyenykh po rezul'tatam KhARG dlya vysokovol'tnykh silovyykh transformatorov s razlichnymi tipami defektov [Analysis of graphical samples of gases constructed for chromatographic analysis of gases dissolved in oil for high-voltage power transformers with various types of defects]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2017, no. 31 (1253), pp. 97–121.
 32. Shutenko O., Yakovenko I. Fault Diagnosis of Power Transformer Using Method of Graphic Images. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. Lviv, Ukraine. 2017. P. 66–69. doi: 10.1109/YSF.2017.8126594.

Надійшло (received) 18.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кулик Олексій Сергійович (Кулик Алексей Сергеевич, Oleksii Serhiiovych Kulyk) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2545-6314>; e-mail: Oleksii.Kulyk@ieec.khpi.edu.ua.

О. М. МОРОЗ, О. О. МИРОШНИК, А. О. ПАВЛОВ, О. А. САВЧЕНКО, М. Ю. ТОБЕРТ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГЕНЕРАЦІЮ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Інтенсивний розвиток мережевих сонячних електростанцій призводить до значних проблем управління та надійності роботи електричних систем країни, внаслідок стохастичного характеру погодних явищ, таких як хмарність, інтенсивність опадів, туман та інші. Тому прогнозування генерації сонячними електростанціями є важливим питанням як підвищення надійності роботи електричної системи країни, так і підвищення економічної ефективності функціонування сонячних електростанцій за рахунок зменшення штрафів за небаланси електричної енергії. Проведено експериментальні дослідження визначення впливу природних факторів, таких як кут сонця над горизонтом, температури фотоелектричних модулів, сонячної радіації, забрудненості поверхні модулів, кількості опадів та туману на генерацію мережевої сонячної електростанції потужністю 2,4 МВт, яка розміщена в Харківській області України. В результаті дослідження встановлена чітка залежність між активною потужністю сонячної станції, сонячною радіацією, ультрафіолетовим індексом та температурою поверхні фотоелектричного модуля. Встановлено характер зміни сонячної радіації впродовж 12 місяців спостережень, мінімальна сонячна радіація 200 Вт/м^2 зафіксована у грудні, максимальна сонячна радіація біля 1200 Вт/м^2 спостерігалась у червні. На основі статистичних даних отримані залежності для визначення різниці температури поверхні сонячних панелей і температури повітря у ясний день в залежності від годинної генерації сонячної електростанції. Встановлено, що генерація сонячної електростанції при 100 % хмарності складає від 20 до 28 % у порівнянні з генерацією у ясні дні. Значний вплив на генерацію сонячної електростанції має забрудненість поверхні фотоелектричних модулів та їх очищення в залежності від інтенсивності та кількості опадів. Значний вплив на генерацію має туман, що зменшує генерацію на 50 %. Отримані графіки питомої генерації (відношення годинної генерації сонячної електростанції, в перерахунку на температуру сонячних панелей $25 \text{ }^\circ\text{C}$, до середньогодинного кута сонця над горизонтом), використання яких допоможе визначити генерацію сонячної електростанції для кожної години впродовж дня. Для підвищення точності прогнозування генерації графіки питомої генерації поділені на два проміжки: перша та друга половини дня. Аналіз графіків питомої потужності дозволяє стверджувати, що питома генерація змінюється впродовж року, що пояснюється різною температурою повітря, вмістом пари в повітрі та товщиною шару повітря, через який проходять сонячні промені, в залежності від розміщення сонця над горизонтом.

Ключові слова: сонячна електростанція, фактори впливу, фотоелектричний модуль, сонячна радіація, питома генерація, середньогодинна температура, середньогодинний кут сонця.

А. Н. МОРОЗ, А. А. МИРОШНИК, А. А. ПАВЛОВ, А. А. САВЧЕНКО, М. Ю. ТОБЕРТ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Интенсивное развитие сетевых солнечных электростанций приводит к значительным проблемам управления и надежности работы электрических систем страны вследствие стохастического характера погодных явлений, таких как облачность, интенсивность осадков, туман и другие. Поэтому прогнозирование генерации солнечных электростанций является важным вопросом как повышения надежности работы электрической системы страны, так и повышения экономической эффективности функционирования солнечных электростанций за счет уменьшения штрафов за небалансы электрической энергии. Проведены экспериментальные исследования определения влияния природных факторов, таких как угол солнца над горизонтом, температуры фотоэлектрических модулей, солнечной радиации, загрязненности поверхности модулей, количества осадков и тумана на генерацию солнечной электростанции мощностью 2,4 МВт, расположенной в Харьковской области Украины. В результате исследования установлена четкая зависимость между активной мощностью солнечной станции, солнечной радиацией, ультрафиолетовым индексом и температурой поверхности фотоэлектрического модуля. Установлен характер изменения солнечной радиации в течение 12 месяцев наблюдений, минимальная солнечная радиация 200 Вт/м^2 зафиксирована в декабре, максимальная солнечная радиация около 1200 Вт/м^2 наблюдалась в июне. На основе статистических данных получены зависимости для определения разности температуры поверхности солнечных панелей и температуры воздуха в ясный день в зависимости от часовой генерации солнечной электростанции. Установлено, что генерация солнечной электростанции при 100 % облачности составляет от 20 до 28 % по сравнению с генерацией в ясные дни. Значительное влияние на генерацию солнечной электростанции оказывает загрязненность поверхности фотоэлектрических модулей и их очистка в зависимости от интенсивности и количества осадков. Значительное влияние на генерацию оказывает туман, что уменьшает генерацию на 50 %. Получены графики удельного поколения (отношение часового поколения солнечной электростанции, в пересчете на температуру солнечных панелей $25 \text{ }^\circ\text{C}$, к среднечасовому углу солнца над горизонтом), использование которых поможет определить генерацию солнечной электростанции для каждого часа в течение дня. Для повышения точности прогнозирования генерации графики удельного поколения разделены на два промежутка: первая и вторая половины дня. Анализ графиков удельной мощности позволяет утверждать, что удельное поколение изменяется в течение года, что объясняется разной температурой воздуха, содержанием пара в воздухе и толщиной слоя воздуха, через который проходят солнечные лучи, в зависимости от расположения солнца над горизонтом.

Ключевые слова: солнечная электростанция, факторы воздействия, фотоэлектрический модуль, солнечная радиация, удельная генерация, среднечасовая температура, среднечасовой угол солнца.

О. МОРОЗ, О. МИРОШНИК, А. ПАВЛОВ, О. САВЧЕНКО, М. ТОБЕРТ

EXPERIMENTAL STUDIES OF FACTORS OF INFLUENCE ON SOLAR GENERATION POWER PLANTS

Intensive development of grid-connected solar power plants leads to significant problems of management and reliability of the country's electrical systems, due to the stochastic nature of weather phenomena, such as clouds, rainfall, fog and others. Therefore, forecasting the generation of solar power plants is an important issue as improving the reliability of the country's electrical system and improving the economic efficiency of solar power plants by reducing fines for imbalances in electricity. Experimental studies have been conducted to determine the influence of natural factors, such as the angle

© О. М. Мороз, О. О. Мірошник, А. О. Павлов, О. А. Савченко, М. Ю. Тоберт, 2021

of the sun over the horizon, temperature of photovoltaic modules, solar radiation, contamination of module surfaces, precipitation and fog on the generation of 2.4 MW solar power plant located in Kharkiv region of Ukraine. The study found a clear relationship between the active power of the solar station, solar radiation, ultraviolet index and the surface temperature of the photovoltaic module. The nature of changes in solar radiation during 12 months of observations was established, the minimum solar radiation of 200 W/m² was recorded in December, the maximum solar radiation of about 1200 W/m² was observed in June. Based on statistical data, the dependences for determining the difference between the surface temperature of solar panels and the air temperature on a clear day depending on the hourly generation of the solar power plant are obtained. It is established that the generation of a solar power plant at 100 % cloud cover is from 20 to 28 % compared to the generation on clear days. Contamination of the surface of photovoltaic modules and their cleaning depending on the intensity and amount of precipitation has a significant impact on the generation of a solar power plant. Fog has a significant effect on lasing, which reduces lasing by 50 %. Graphs of specific generation (ratio of hourly generation of solar power plant, in terms of solar panel temperature 25 °C, to the average hourly angle of the sun above the horizon), which will help determine the generation of solar power plant for each hour during the day. To increase the accuracy of generation forecasting, the specific generation graphs are divided into two intervals: the first and second half of the day. Analysis of specific power graphs suggests that the specific generation varies throughout the year due to different air temperatures, air vapour content and the thickness of the layer of air through which the sun's rays pass, depending on the location of the sun above the horizon.

Keywords: solar power plant, factors of influence, photovoltaic module, solar radiation, specific generation, average hourly temperature, average hourly angle of the sun.

Вступ. У зв'язку з кліматичними змінами та постійним зростанням споживання енергетичних ресурсів однією з основних цілей діяльності ООН на період до 2030 р. є «забезпечення загального доступу країн до сучасних енергетичних послуг, подвоєння частки відновлюваних джерел енергії у світовому енергетичному балансі та подвоєння глобальних темпів підвищення енергоефективності». [1]. Одним із рішень щодо проблеми глобального потепління та задоволення дедалі більшого попиту на електроенергію є встановлення «чистіших» джерел видобутку енергії, таких як сонячні електростанції (СЕС).

Згідно офіційних даних International Renewable Energy Agency від 4 квітня 2021 р., загальні потужності СЕС у світі у 2020 році зросли на 21,6 % – до 714 ГВт. Зокрема, всі європейські країни (в тому числі країни, які не входять до ЄС) у 2020 р. збільшили потужності СЕС на 14,5 % – до 163,5 ГВт. За показником загальної потужності (7,33 ГВт) Україна посідає в Європі 6 місце, поступаючись лише таким галузевим лідерам як-от Німеччина (53,8 ГВт), Італія (21,6 ГВт), Іспанія (14 ГВт), Франція (11,7 ГВт) та Нідерланди (10,2 ГВт). За темпами зростання галузі сонячної енергетики у 2020 р. Україна знаходиться на 4-му місці з показником +23,5 % [2].

Сьогодні розвиток сонячної енергетики в Україні знаходиться на стадії, яку Європа пройшла 7–10 років тому, а у порівнянні з Німеччиною сонячна енергетика України відстає на 13 років, хоча темпи генерації електричної енергії СЕС в Україні постійно зростають. З 2015 до 30 листопада 2021 року встановлена потужність СЕС України збільшилася з 359,1 до 6226,2 МВт, тобто зросла більш ніж у 17 разів [3].

В аналізі Міністерства енергетики та захисту довкілля України у 2019 році [4] було відмічено, що однією із технічних проблем використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) є низька точність прогнозу виробництва на СЕС і вітрових електростанціях (ВЕС), в Україні середня похибка прогнозування виробництва електроенергії на добу наперед складає біля 35 %. В законі України «Про ринок електроенергії» [5] встановлено, що частка відшкодування гарантованому покупцю суб'єктами господарювання, які входять до складу балансуєвої групи гарантованого покупця та здійснюють продаж електричної енергії, виробленої з альтернативних

джерел енергії на об'єктах електроенергетики, встановлена потужність яких перевищує 1 МВт, за «зеленим» тарифом або аукціонною ціною, вартості врегулювання небалансу гарантованого покупця становить: з 1 січня 2021 р. – 50 %; з 1 січня 2022 р. – 100 %.

Тому необхідність розроблення ефективної системи для короткотермінового погодинного прогнозування обсягів електроенергії, що генерується СЕС та режимів їх роботи, є дуже актуальною.

Дослідженням факторів впливу на генерацію СЕС присвячена значна кількість робіт [6–9]. Прогноз генерації СЕС базується на прогнозованих погодних даних [6], ефективність прогнозних моделей значно покращується при використанні статистичних даних та даних погоди, що спостерігаються. Точність методів прогнозування потужності фотоелектричної енергії покращується при попередній обробці вхідних даних [7]. За результатами кластерного аналізу встановлено, що найбільш впливовими факторами на генерацію активної потужності є радіація на поверхні землі, температура навколишнього середовища, вологість та швидкість вітру [8]. Більш перспективним, у порівнянні з детермінованим підходом, є ймовірнісний підхід [9]. Одним із недоліків при складанні прогнозних моделей генерації СЕС є збитковість даних, які приводять до ускладнення моделей, а в деяких випадках і до зменшення точності прогнозів [7]. Перспективним напрямком прогнозування генерації СЕС є використання штучних нейронних мереж з використанням програмного комплексу STATISTICA [10].

Мета роботи. Встановлення впливу природних факторів на генерацію СЕС для підвищення точності прогнозування генерації мережевих сонячних електростанцій.

Виклад основного матеріалу. Для з'ясування найбільш впливових факторів впливу на генерацію СЕС були проведені експериментальні дослідження впливу природних факторів на роботу СЕС потужністю 2,4 МВт, яка розміщена на площі у 4 га на території м. Мерефа Харківської області, географічні координати місця розташування СЕС такі: 49°48'07.2"N 36°05'06.0"E. Тип фотоелектричних модулів (ФЕМ) – монокристалічні модулі RISEN RSM72-6-365M-5BB (365 Вт) [11]. ФЕМ розміщені з

фіксованим кутом нахилу у 27° і мають орієнтацію у 180° на південь.

Визначенню оптимального кута нахилу ФЕМ передував аналіз річної генерації СЕС по визначенню максимальної генерації за допомогою Photovoltaic Geographical Information System [12].

Для перетворення постійного струму від ФЕМ у змінний трифазний струм синусоїдальної форми використовувалися інвертори Huawei SUN2000-60KTL-M0. Для передачі змінного струму напругою 0,4 кВ від інверторів СЕС до лінії електропередачі 35 кВ використовується комплектна трансформаторна підстанція (КТП) 35/0,4 кВ.

Для реєстрації параметрів погоди на території станції була встановлена метеостанція Meteoscanner 937PRO, яка забезпечувала вимірювання зовнішньої температури, атмосферного тиску, вологості зовнішнього повітря, напрямку та швидкості вітру, рівня ультрафіолетового (УФ) випромінювання, освітленості, кількості опадів, визначення точки роси. Передача даних в мережу та персонального комп'ютера (ПК) здійснювалась через WI-FI. Обробка даних метеостанції проводилась безпосередньо на ПК за допомогою програмного забезпечення Easy Weather IP, для цього ПК був підключений до тієї ж локальної (Wi-Fi) мережі, що і метеостанція. Моніторинг режимів роботи СЕС в режимі реального часу здійснювався за допомогою пристрою SmartLogger, який забезпечує отримання інформації у виді таблиць та графіків.

На основі експериментальних досліджень відслідковується чітка залежність між активною потужністю СЕС (рис. 1) і сонячною радіацією (рис. 2). Графік активної потужності (до 11:00) має спокійний характер, оскільки хмарність була відсутня, об 11:00 відбулося незначне збурення графіка внаслідок появи хмарності. Коливання активної потужності після 12:20 виникло внаслідок суттєвих змін хмарності.

Як видно з рис. 1 існує чітка залежність температури ФЕМ від активної потужності СЕС, хоча

спостерігається певне відставання зміни температури модулів від зміни генерації, що пояснюється тепловою інерцією нагрівання ФЕМ. На першій частині графіка (до 11:00) спостерігається «гладкий» графік активної потужності в той час як графік температури має незначні коливання, що пояснюється тим фактом, що датчик температури встановлений на одній панелі і зміна температури відбувається внаслідок затінення поверхні панелі окремими хмарками, а графік активної потужності є інтегрованою характеристикою СЕС.

Порівняння графіків активної потужності СЕС та УФ індексу (рис. 2) показує чітку залежність між цими параметрами. Був також проведений аналіз максимальної місячної сонячної радіації та УФ індексу, які вимірювались метеостанцією Meteoscanner 937PRO впродовж року, починаючи з вересня 2020 року по серпень 2021 року.

Результати досліджень максимальної сонячної радіації (максимальне значення, яке спостерігається протягом декількох хвилин при відсутності затінення від хмар та певній прозорості повітря) впродовж періоду спостережень наведені в табл. 1 та зображені на графіку (рис. 3). Максимальна сонячна радіація перевищує середнє значення сонячної радіації при ясній погоді на 20–25 %.

Як видно з таблиці та графіка спостерігається збільшення максимальної сонячної радіації та УФ індексу до червня, потім максимальна сонячна радіація і УФ індекс зменшуються. Спостерігається чіткий зв'язок між величиною максимальної сонячної радіації та УФ індексом.

Оскільки генерація ФЕМ залежить від її температури, для модулів RISEN RSM72-6-365M-5BV температурний коефіцієнт потужності складає $-0,39\% / ^\circ\text{C}$ [11], тобто підвищення температури на 1°C призводить до зменшення потужності на $0,39\%$ від максимальної потужності і це складає $1,42\text{ Вт}$, тому були проведені дослідження зміни температури поверхні модулів від середьогодинної генерації.



Рисунок 1 – Графіки залежності активної потужності та температури ФЕМ

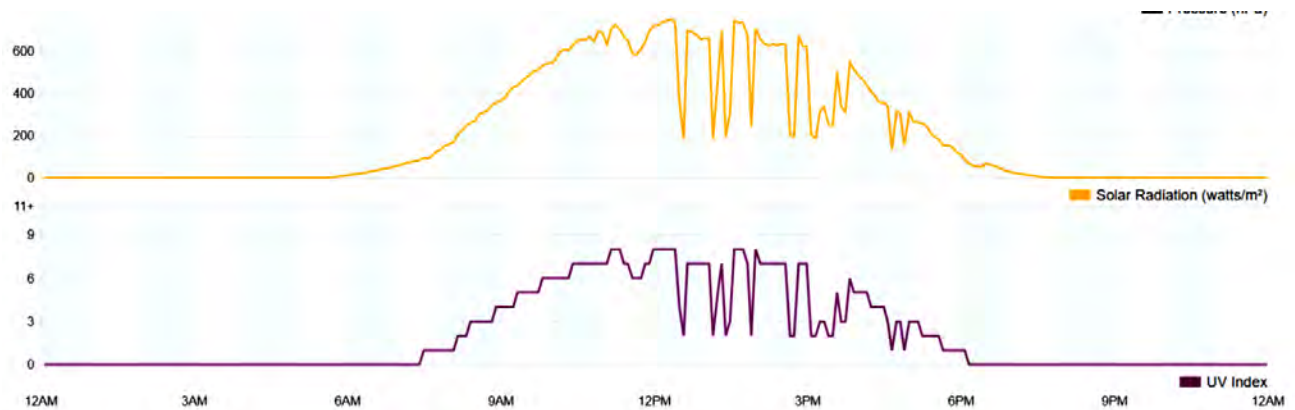


Рисунок 2 – Графіки сонячної радіації та УФ індексу, зафіксовані метеостанцією СЕС 22.08.2021 р.

Таблиця 1 – Максимальні значення сонячної радіації та УФ індексу

Дата	18.09.2020	07.10.2020	10.11.2020	28.12.2020	30.01.2021	15.02.2021	27.03.2021	16.04.2021	29.05.2021	07.06.2021	22.07.2021	11.08.2021
Макс. сонячна радіація, Вт/м ²	841,5	628,9	589	202,9	289,7	409,9	785,4	960,5	1068,8	1138,7	970	904,9
УФ індекс	9	6	4	1	3	4	8	10	12	12	11	10

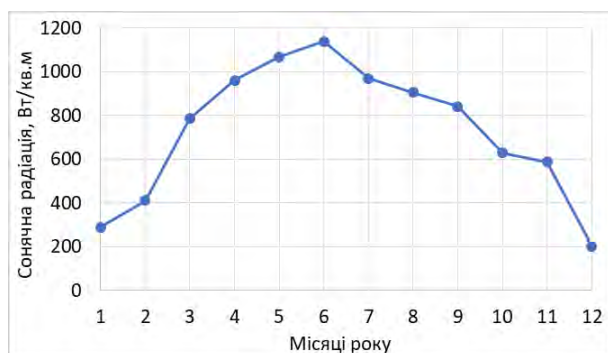


Рисунок 3 – Графік максимальної сонячної радіації

За результатами досліджень встановлена залежність перевищення середньогодинної температури панелей над середньогодинною температурою повітря (рис. 4 і 5), що дозволяє визначити температуру ФЕМ в залежності від генерації СЕС та температури оточуючого середовища. Графіки були побудовані з використанням таблиць Microsoft Excel, аналіз графіків показав, що ці залежності описуються лінійними рівняннями першого порядку.

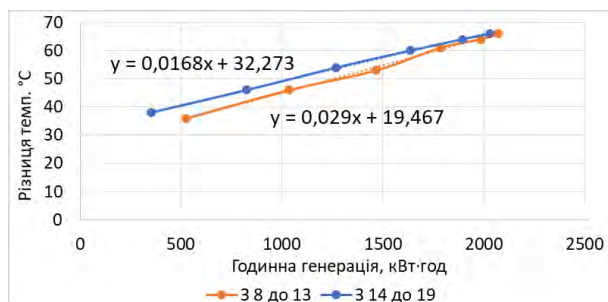


Рисунок 4 – Графіки різниці температур поверхні сонячних панелей відносно температури повітря у ясний день 08.07.21 р.

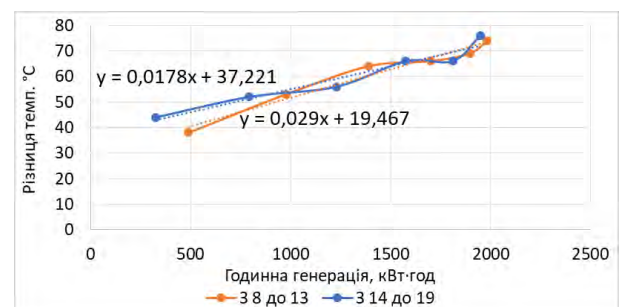


Рисунок 5 – Графіки різниці температур поверхні сонячних панелей відносно температури повітря у ясний день 14.07.21 р.

Аналіз графіків різниці температур показав, що більш точні залежності будуть отримані при групуванні даних з 8:00 до 13:00 (при підйомі сонця) та при його заході з 14:00 до 19:00. Так з графіків видно, що з 8:00 до 13:00 лінійна залежність однакова, а з 14:00 до 19:00 розбіжності різниці температур, розраховані за лінійними рівняннями $y=0,0168x+32,273$ та $y=0,0178x+37,221$, де x – годинна генерація (кВт·год), в діапазоні генерації від 500 до 2000 кВт·год складає біля 10 %.

Генерація СЕС залежить від прямої та розсіяної сонячної радіації, а також від відбитої радіації від поверхні землі (альbedo). При безхмарній погоді основний вплив на генерацію СЕС має пряма радіація, а при 100 % хмарності генерація СЕС залежить від розсіяної радіації та альbedo [13]. Аналіз даних генерації СЕС показав, що вплив розсіяної радіації та альbedo на генерацію СЕС складає від 10 до 30 % в залежності від типу та товщини ярусів хмар. Активна потужність СЕС при 100 % хмарності визначалась за результатами досліджень графіків активної потужності у дні коли спостерігались години 0 та 100 % хмарності. У якості прикладу проведено аналіз активної

потужності СЕС 01.08.2021 р. (рис. 6). Об 11:00 спостерігалась 100 % хмарність і активна потужність була біля 400 кВт, відповідно питома активна потужність в перерахунку на температуру ФЕМ 25 °С, при куті сонця 52,1° була 8,1 кВт/град. О 12:30 спостерігалось чисте небо і активна потужність була біля 2000 кВт, відповідно питома активна потужність в перерахунку на температуру сонячних панелей 25 °С, при куті сонця 57,44° була 40,25 кВт/град. Таким чином при 100 % хмарності активна потужність СЕС складає 20 % від потужності при ясному небі, тобто внесок розсіяної сонячної радіації в генерацію СЕС складає біля 20 %.

На рис. 7 і 8, у якості прикладів, наведені графіки активної потужності та згенерованої електричної електроенергії на 21 вересня та 18 листопада 2020 року. Графіки від 21 вересня були отримані при ясній погоді, а графіки від 18 листопада – при 100% хмарності. Так активна потужність СЕС 18.11.2020 р. об 11 годині, що відповідає куту сонця над горизонтом 20°41', становила 250 кВт, а потужність станції 21.09.2020 р. о 8:45, що відповідає такому ж куту сонця, становила 900 кВт. Тобто активна потужність при 100 % хмарності становить 28 % від потужності у ясний день. Значний вплив на генерацію СЕС має забруднення поверхні фотоелектричних панелей, яке виникає внаслідок осідання пилу та екскрементів птахів (рис. 9 і 10).



Рисунок 6 – Графіки залежності активної потужності та температури ФЕМ 1.08.2021 р.

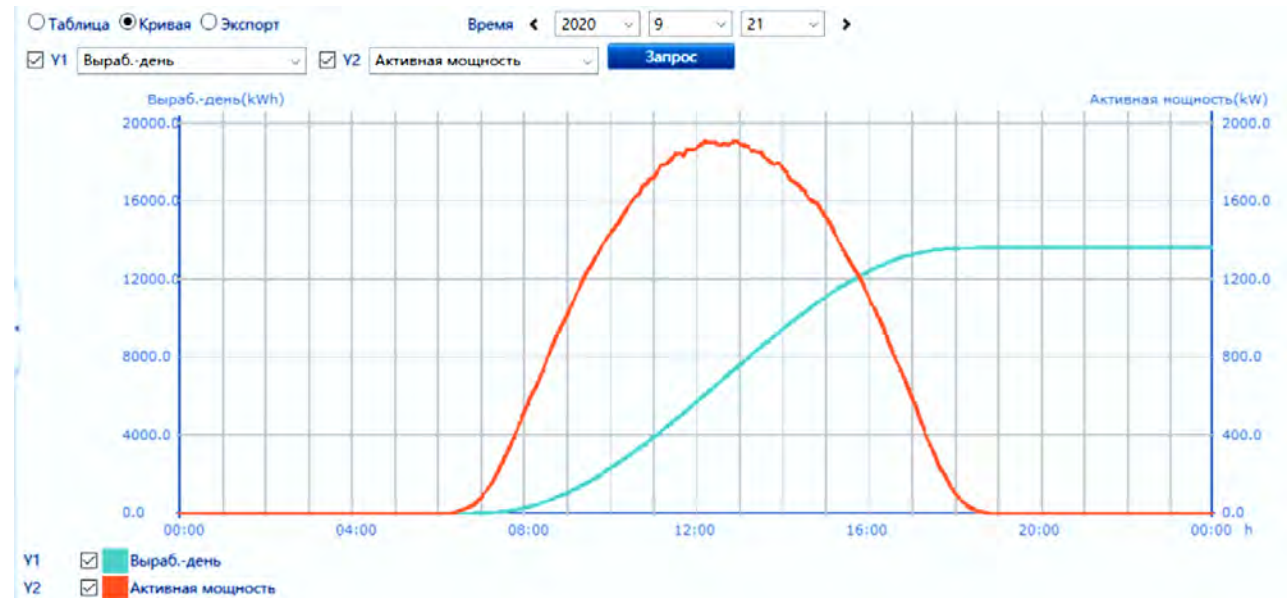


Рисунок 7 – Графіки активної потужності та згенерованої електричної енергії СЕС 21.09.20 р.



Рисунок 8 – Графіки активної потужності та згенерованої електричної енергії СЕС 18.11.20 р.

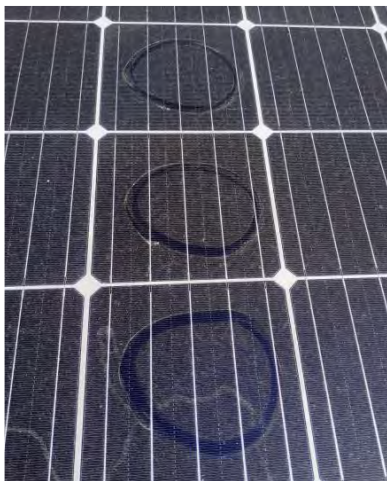


Рисунок 9 – Забруднення поверхні ФЕМ внаслідок осідання пилу



Рисунок 10 – Забруднення поверхні ФЕМ екскрементами птахів

Інтенсивність та товщина відкладення забруднень залежить від погодних умов, особливо від тривалості бездощового періоду, проведення сільськогосподарських робіт на полях, що близько примикають до території СЕС, спалювання відходів на присадибних ділянках даного населеного пункту, косіння та прибирання трави на території станції, популяції літаючих комах, а також інших чинників. Очищення поверхні ФЕМ залежить від кількості опадів та їх інтенсивності. Кількість опадів та їх інтенсивність вимірювалась за допомогою метеостанції (рис. 11). Інтенсивність опадів визначалась як кількість опадів, що випали за останні 10 хвилин (наприклад, кількість опадів за останні 10 хвилин 1,2 мм, тоді інтенсивність опадів $1,2 \text{ мм} \cdot 6 = 7,2 \text{ мм/год}$).

Значний вплив на генерацію СЕС мають такі природні фактори як туман. На рис. 12 приведено графік генерації СЕС в туманний день при 100 % хмарності, коли погодинна генерація зменшилась майже на 50 % (при питомій активній потужності 6 кВт/град) у порівнянні з генерацією у день 100 % хмарності але при відсутності туману (рис. 13).

Для аналізу питомої генерації (відношення годинної генерації СЕС, в перерахунку на температуру сонячних панелей 25°C , до середньогодинного кута сонця над горизонтом) були вибрані ясні дні 8 і 14 липня та 16 та 28 серпня 2021 року. Середньогодинний кут сонця над горизонтом визначався за допомогою сервісу [14], генерація визначалась за допомогою пристрою SmartLogger. Результати експериментальних досліджень оброблені за допомогою табличного процесора Microsoft Office Excel (рис. 14 і 15). Для підвищення точності апроксимації результатів експериментальні дані були поділені на два проміжки, з 7:00 до 13:00 та з 14:00 до 19:00.

Отримані залежності описуються зі значною точністю (достовірність апроксимації $R^2 > 0,99$) поліноміальними функціями другого ступеню (рівняння на графіках мають той же колір, що і графічні

залежності). Для визначення фізичних факторів, що впливали на питому генерацію, був проведений аналіз кількості та інтенсивності опадів, які призводили до очищення поверхні модулів. природного очищення поверхні ФЕМ залежить від кількості та інтенсивності

випадання опадів. Аналіз графіків питомої генерації СЕС 8 та 14 липня (рис. 14 і 15) не виявив суттєвої різниці, що дає можливість стверджувати, що за цей період не відбулось суттєве забруднення поверхні модулів.

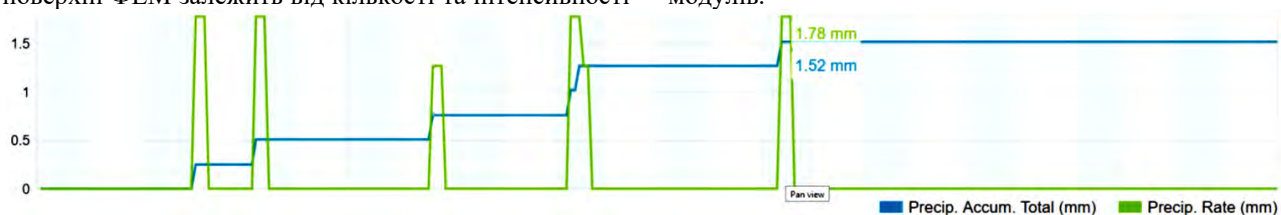


Рисунок 11 – Графіки інтенсивності та кількості опадів на території СЕС 10.12.2021 р.



Рисунок 12 – Графіки активної потужності та генерації СЕС в туманний день при 100% хмарності

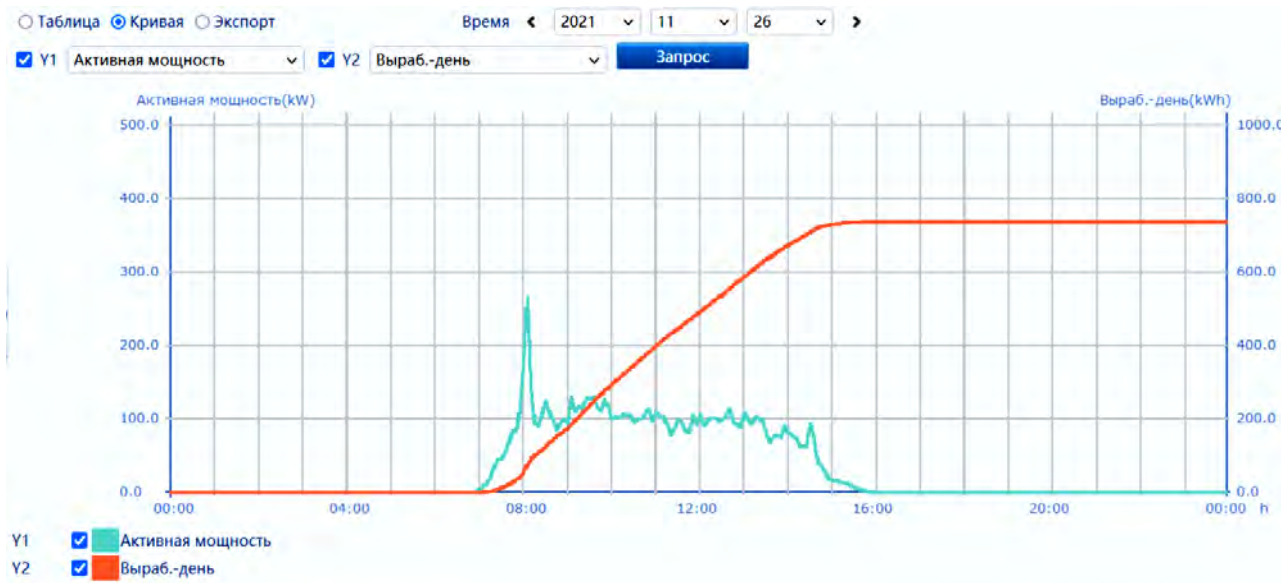


Рисунок 13 – Графіки активної потужності та генерації СЕС при 100% хмарності

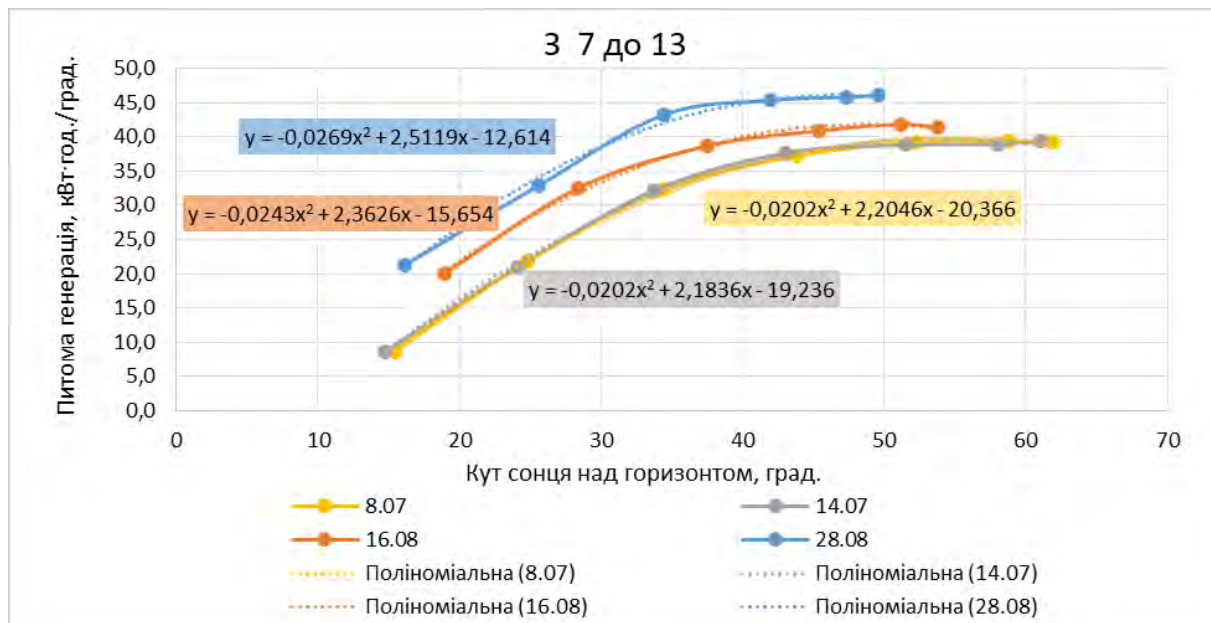


Рисунок 14 – Графіки питомої генерації СЕС з 7.00 до 13.00

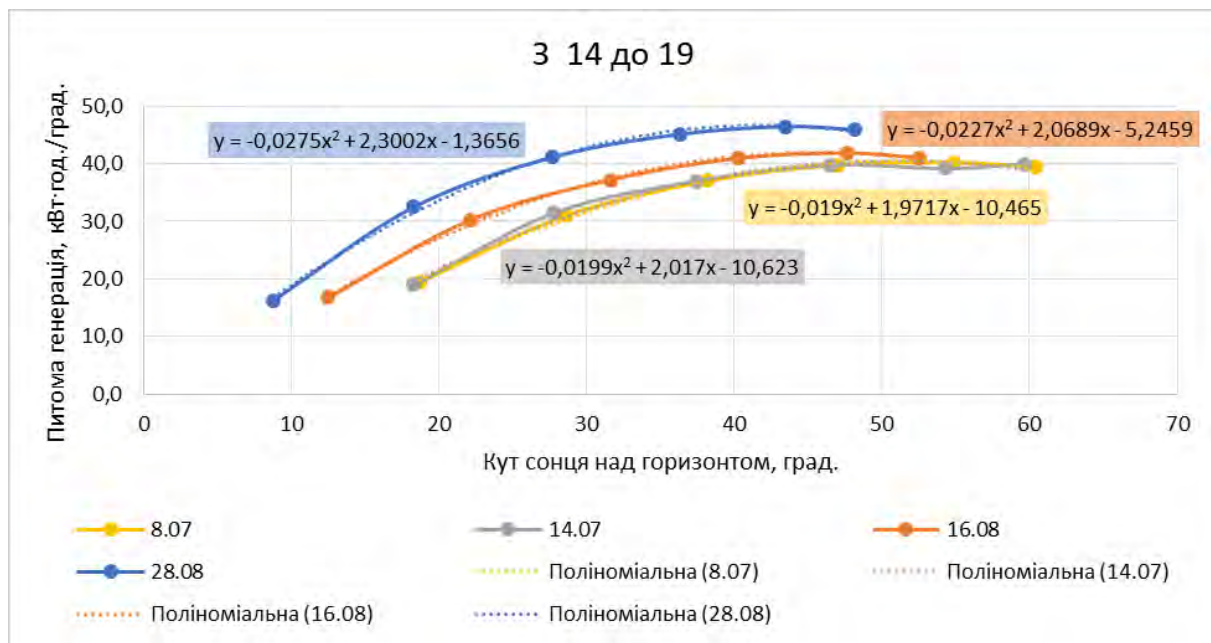


Рисунок 15 – Графіки питомої генерації СЕС з 14.00 до 19.00

З 14 липня по 16 серпня спостерігалось 4 дні з опадами (21.07.2021 випало 1,27 мм опадів, при інтенсивності 1,76 мм/год, 29.07.2021 р. випало 4,57 мм при інтенсивності 16,76 мм/год, 03.08.2021 випало 0,25 мм опадів, при інтенсивності 1,78 мм/год, 07.08.2021 р. випало 8,1 мм при інтенсивності 25,9 мм/год). Загальна кількість опадів склала 14,19 мм, що не мало суттєвого впливу на очищення поверхні ФЕМ.

В проміжку між двома ясними днями з 16 серпня по 28 серпня спостерігались інтенсивні опади (19.08.2021 випало 73 мм опадів, при інтенсивності 132 мм/год; 20.08.2021 р. – 10,92 мм при інтенсивності 25,9 мм/год; 26.08.2021 р. – 5,59 мм при інтенсивності 10,9 мм/год; 27.08.2021 р. – 12,95 мм при інтенсивності

22,86 мм/год). Загальна кількість опадів за цей період склала 102,44 мм, що мало суттєвий вплив на очищення поверхні ФЕМ, що підтверджується збільшенням питомої генерації (рис. 14 і 15). Аналіз графіків питомої потужності дозволяє стверджувати, що питома генерація змінюється впродовж року, що пояснюється різною температурою повітря, вмістом пари в повітрі та товщиною шару повітря, через який проходять сонячні промені, в залежності від розміщення сонця над горизонтом.

Висновки. Генерація СЕС має стохастичний характер внаслідок мінливих факторів погоди, тому прогнозування генерації СЕС є важливим питанням, як для зменшення штрафних санкцій, внаслідок небалансу електроенергії, і відповідно підвищення

економічної ефективності СЕС, так і для забезпечення надійної роботи об'єднаної енергетичної системи країни, оскільки встановлена потужність СЕС постійно збільшується, як і частка генерації електроенергії. Для прогнозування генерації СЕС важливими чинниками, що впливають на точність прогнозування, є статистичні дані сонячної радіації для місцевості, де встановлена СЕС, так і фізичні моделі впливу погодних та місцевих факторів на генерацію. Встановлені залежності перевищення середньогодинної температури панелей над середньогодинною температурою повітря дозволяють визначити температуру ФЕМ в залежності від генерації СЕС та температуру оточуючого середовища, а відповідно і підвищити точність прогнозування генерації. Встановлені значення питомої генерації СЕС, приведеної до температури 25 °С, в ясну погоду та при 100 % хмарності дозволяють прогнозувати генерацію в залежності від хмарності. Аналіз приведених значень питомої генерації дозволяє встановлювати ступінь забрудненості поверхні ФЕМ і відповідно більш точно прогнозувати генерацію СЕС.

Список літератури

1. Дячук О., Чепелев М., Подолець Р., Трипольська Г. та ін. *Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року*. Київ: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. 88 с.
2. *Cisolar 2021: Україна увійшла до ТОП 5 європейських країн за темпами розвитку сонячної енергетики*. URL: <https://ecolog-ua.com/news/cisolar-2021-ukrayina-uviyshla-do-top-5-yevropeyskyh-krayin-za-tempamy-rozvytku-sonyachnoyi> (дата звернення: 18.11.2021).
3. *Встановлена потужність енергосистеми України на 11/2021*. URL: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (дата звернення: 03.12.2021).
4. *Розвиток відновлюваної енергетики: стан, виклики, пропозиції до вирішення*. URL: <https://cutt.ly/7jbxr5e> (дата звернення: 16.11.2021).
5. Про ринок електричної енергії України: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. *Відомості Верховної Ради*. 2017. №27–28. Ст. 312.
6. Sangrody H., Sarailoo M., Zhou N., Tran N., Motalleb M., Foruzan E. Weather forecasting error in solar energy forecasting *IET Renewable Power Generation*. 2017. Vol. 11, no. 10. P. 1274–1280. doi: 10.1049/iet-rpg.2016.1043.
7. Malvoni M., De Giorgi M. G., Congedo P. M. Forecasting of PV power generation using weather input data. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 126. P. 651–658. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.293.
8. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В., Дідиченко С. С. Аналіз метеопараметрів для погодинного прогнозування виробітку електроенергії фотовольтаїчними електростанціями на добу наперед. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. № 1 (6). С. 27–31.
9. Киселева С. В., Лисицкая Н. В., Фрид С. Е. Прогнозирование выработки солнечных станций и фотоэлектрических установок: основные подходы и результативность. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2020. № 7–18. С. 24–42. doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.24-43.
10. O. Savchenko et al. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 137–140. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009.
11. *Сонячна панель RISEN RSM72-6-365M PERC монокристал*. URL: <https://eco-tech.com.ua/ua/p840116230-solnechnaya-panel-risen.html> (дата звернення: 16.11.2021).
12. *Photovoltaic Geographical Information System*. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR (дата звернення: 08.11.2021).
13. Perez-Astudillo D., Bachour D. DNI, GHI and DHI ground measurements in Doha, Qatar. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 49. P. 2398–2404. doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.254.
14. *Время восхода и захода солнца в Мерефе*. URL: <https://voshod-solnca.ru/sun/%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B0> (дата звернення: 11.11.2021).

References (transliterated)

1. Dyachuk O., Chepelyev M., Podolets R., Trypol'ska H. ta in. *Perekhid Ukrainy na vidnovlyuvanu enerhetyku do 2050 roku* [Ukraine's transition to renewable energy by 2050]. Kyiv, ART KNYHA Publ., 2017. 88 p.
2. *Cisolar 2021: Ukrayina uviyshla do TOP 5 yevropeys'kykh krayin za tempamy rozvytku sonyachnoyi enerhetyky* [Ukraine in top 5 European countries for solar energy development]. Available at: <https://ecolog-ua.com/news/cisolar-2021-ukrayina-uviyshla-do-top-5-yevropeyskyh-krayin-za-tempamy-rozvytku-sonyachnoyi> (accessed 18.11.2021).
3. *Vstanovlena potuzhnist' enerhosityemy Ukrainy na 11/2021* [Installed capacity of the IPS of Ukraine values as of 11/2021]. Available at: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (accessed 03.12.2021).
4. *Rozvytok vidnovlyuvanoi enerhetyky: stan, vyklyky, propozyitsiyi do vyrishennya* [Renewable energy development: status, challenges, proposals for solutions]. Available at: <https://cutt.ly/7jbxr5e> (accessed 16.11.2021).
5. Про ринок електричної енергії України [On the Electricity Market]: Law of Ukraine on 13.04.2017 № 2019 VIII. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*. 2017. № 27–28. Art. 312.
6. Sangrody H., Sarailoo M., Zhou N., Tran N., Motalleb M., Foruzan E. Weather forecasting error in solar energy forecasting *IET Renewable Power Generation*. 2017, vol. 11, no. 10, pp. 1274–1280. doi: 10.1049/iet-rpg.2016.1043.
7. Malvoni M., De Giorgi M. G., Congedo P. M. Forecasting of PV power generation using weather input data. *Energy Procedia*. 2017, vol. 126, pp. 651–658. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.293.
8. Lezhnyuk P. D., Komar V. O., Kravchuk S. V., Didichenko Ye. S. Analiz meteoparametriv dlya pohodynnoho prohnozuvannya vyrobittku elektroenerhiyi fotovol'tayichnymy elektrostantsiyamy na dobu napered [Meteorparameter analysis for prognosis of electricity development of photo-voltage electrical power plant day ahead]. *Enerhetyka ta komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi v APK*. 2017, no. 1 (6), pp. 27–31.
9. Kiseleva S. V., Lisitskaya N. V., Frid S. E. Prognozirovanie vyrabotki solnechnykh stantsiy i fotoelektricheskikh ustanovok: osnovnye podkhody i rezul'tativnost' [Photovoltaic Power Forecasting: Basic Approaches and Features]. *Alternativna Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2020, no. 7–18, pp. 24–42. doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.24-43.
10. O. Savchenko et al. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021, pp. 137–140. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009.
11. *Sonyachna panel' RISEN RSM72-6-365M PERC monokrystal* [Solar panel RISEN RSM72-6-365M PERC monocrystal]. Available at: <https://eco-tech.com.ua/ua/p840116230-solnechnaya-panel-risen.html> (accessed 16.11.2021).
12. *Photovoltaic Geographical Information System*. Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR (accessed 08.11.2021).
13. Perez-Astudillo D., Bachour D. DNI, GHI and DHI ground measurements in Doha, Qatar. *Energy Procedia*. 2014, vol. 49, pp. 2398–2404. doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.254.
14. *Vremya voskhoda i zakhoda solntsa v Merefe* [Sunrise and sunset times in Merefa]. Available at: <https://voshod-solnca.ru/sun/%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B0> (accessed 11.11.2021).

Надійшла (received) 05.12.2021

Мороз Олександр Миколайович (Мороз Александр Николаевич, Oleksandr Moroz) – доктор технічних наук, Державний біотехнологічний університет, професор кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8520-9211>; e-mail: moroz.an@ukr.net.

Мірошник Олександр Олександрович (Мирошник Александр Александрович, Oleksandr Miroshnyk) – доктор технічних наук, професор, Державний біотехнологічний університет, завідувач кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6144-7573>; e-mail: omiroshnyk@ukr.net.

Павлов Андрій Олександрович (Павлов Андрей Александрович, Andrii Pavlov) – аспірант кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9943-4084>; e-mail: andriy_pavlov@me.com.

Савченко Олександр Анатолійович (Савченко Александр Анатольевич, Oleksandr Savchenko) – кандидат технічних наук, Державний біотехнологічний університет, доцент кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6401-0852>; e-mail: sanoa@ukr.net.

Тоберт Михайло Юрійович (Тоберт Михаил Юрьевич, Mikhail Tobert) – магістрант кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-1156>; e-mail: tobert.mikhail@gmail.com.

С. Г. ПОНОМАРЕНКО

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНТЕНСИВНОСТІ СТАРІННЯ МАСЛА В ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРУГОЮ 110 КВ ТА АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРУГОЮ 330 КВ

Наведено результати аналізу інтенсивності старіння трансформаторних масел у трансформаторах напругою 110 кВ та автотрансформаторах напругою 330 кВ. Використовуючи математичну модель дисперсійного аналізу лінійної регресії (модель коваріаційного аналізу), стосовно результатів періодичних випробувань по 231 трансформатору напругою 110 кВ і 49 автотрансформаторам напругою 330 кВ виконана перевірка кількох статистичних гіпотез, що дозволяють оцінити інтенсивність дрейфу показників масел в процесі тривалої експлуатації трансформаторів. В якості статистичних гіпотез перевірялися: гіпотеза про наявність значущого систематичного зміщення значень показників масел у процесі тривалої експлуатації, що дозволяє оцінити наявність процесів старіння трансформаторних масел. Гіпотеза про рівність частинних кутових коефіцієнтів для регресійних моделей, побудованих за результатами випробувань для кожного з показників масел в окремих трансформаторах (лінії регресії паралельні), що дозволяє оцінити наявність відмінностей в інтенсивності старіння масел в окремих трансформаторах. Гіпотеза про те, що групові середні лежать на прямій, тобто дрейф показників масел у різних трансформаторах відбувається з однаковою швидкістю. Гіпотеза про рівність частинних вільних членів для регресійних моделей, побудованих за результатами випробувань для кожного з показників масла в окремих трансформаторах, що дозволяє оцінити наявність відмінностей у значеннях показників масел в момент введення трансформаторів в експлуатацію, тобто фактично наявність відмінностей в якості масла, що заливається. За результатами аналізу як для трансформаторів 110 кВ, так і для автотрансформаторів 330 кВ встановлено наявність не тільки адитивного та мультиплікативного зміщення між окремими рядами показників масел, а й значущу систематичну складову, що свідчить про старіння трансформаторних масел в аналізованих трансформаторах. При цьому встановлено, що інтенсивність дрейфу показників масла в трансформаторах 110 кВ та в автотрансформаторах 330 кВ суттєво відрізняється, що необхідно враховувати при побудові моделей для раннього розпізнавання стану трансформаторних масел за результатами періодичних випробувань.

Ключові слова: високовольтні трансформатори, трансформаторне масло, часові ряди показників, інтенсивність старіння, клас напруги, параметрична модель, коваріаційний аналіз лінійних моделей, дисперсійне розкладання, перевірка статистичних гіпотез.

С. Г. ПОНОМАРЕНКО

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ СТАРЕНИЯ МАСЕЛ В ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 330 КВ

Приведены результаты анализа интенсивности старения трансформаторных масел в трансформаторах напряжением 110 кВ и автотрансформаторах напряжением 330 кВ. Используя математическую модель дисперсионного анализа линейной регрессии (модель ковариационного анализа), применительно к результатам периодических испытаний по 231 трансформатору напряжением 110 кВ и 49 автотрансформаторам напряжением 330 кВ, выполнена проверка нескольких статистических гипотез, позволяющих оценить интенсивность дрейфа показателей масел в процессе длительной эксплуатации трансформаторов. В качестве статистических гипотез проверялись: гипотеза о наличии значимого систематического смещения значений показателей масел в процессе длительной эксплуатации, позволяющая оценить наличие процессов старения трансформаторных масел. Гипотеза о равенстве частных угловых коэффициентов для регрессионных моделей, построенных по результатам испытаний для каждого из показателей масла в отдельных трансформаторах (линии регрессии паралельны), позволяющая оценить наличие различий в интенсивности старения масел в отдельных трансформаторах. Гипотеза о том, что групповые средние лежат на прямой, то есть дрейф показателей масла в разных трансформаторах происходит с одинаковой скоростью. Гипотеза о равенстве частных свободных членов для регрессионных моделей, построенных по результатам испытаний для каждого из показателей масла в отдельных трансформаторах, позволяющая оценить наличие различий в значениях показателей масел в момент ввода трансформаторов в эксплуатацию, то есть фактически наличие различий в качестве заливаемого масла. По результатам анализа как для трансформаторов 110 кВ, так и для автотрансформаторов 330 кВ установлено наличие не только аддитивного и мультипликативного смещения между отдельными рядами показателей масел, но и значимой систематической составляющей, что свидетельствует о старении трансформаторных масел в анализируемых трансформаторах. При этом установлено, что интенсивность дрейфа показателей масла в трансформаторах 110 кВ и в автотрансформаторах 330 кВ существенно отличается, что необходимо учитывать при построении моделей для раннего распознавания состояния трансформаторных масел по результатам периодических испытаний.

Ключевые слова: высоковольтные трансформаторы, трансформаторное масло, временные ряды показателей, интенсивность старения, класс напряжения, параметрическая модель, ковариационный анализ линейных моделей, дисперсионное разложение, проверка статистических гипотез.

S. PONOMARENKO

COMPARATIVE ANALYSIS OF OIL AGEING INTENSITY IN 110 KV TRANSFORMERS AND 330 KV AUTOTRANSFORMERS

The results of transformer oil ageing intensity analysis in 110 kV transformers and 330 kV autotransformers are presented. Using a mathematical model of variance linear regression analysis (covariance analysis model), applied to the results of periodic tests on 231 transformers of 110 kV and 49 autotransformers of 330 kV, several statistical hypotheses have been tested to estimate the intensity of drift of oil indicators during long-term operation of transformers. The following hypotheses were tested as statistical hypotheses: the hypothesis of a significant systematic drift in the values of oils during long-term operation, which allows assessing the presence of transformer oil ageing processes. The hypothesis of equality of partial angular coefficients for regression models based on test results for each of the oil in individual transformers (regression lines are parallel), which allows estimating the differences in the ageing intensity of oils in individual transformers. The hypothesis that the group averages lie on a straight line, that is, the drift of the oil in the different transformers occurs at the same rate. The hypothesis of equality of partial free terms for regression models based on test results for each of the oil indicators in individual transformers, which allows assessing the presence of differences in the values of oil indicators at the time of

© С. Г. Пономаренко, 2021

commissioning of transformers, that is, the actual presence of differences in the quality of the poured oil. The results of the analysis for both 110 kV transformers and 330 kV autotransformers showed not only an additive and multiplicative bias between individual series of oil parameters, but also a significant systematic component, indicating the aging of transformer oils in the analysed transformers. It was found that the intensity of drift of oil indicators in 110 kV transformers and in 330 kV autotransformers significantly differs, which should be taken into account when building models for the early recognition of the condition of transformer oils by the results of periodic tests.

Keywords: high-voltage transformers, transformer oil, time series, aging rate, voltage class, parametric model, linear model covariance analysis, variance decomposition, statistical hypothesis testing.

Постановка проблеми. Експлуатаційна надійність високовольтних силових трансформаторів не в останню чергу визначається станом трансформаторних масел, які виконують як ізоляційну, так і тепловідвідну функції. Відомо [1], що однією з основних причин, що призводять до погіршення властивостей трансформаторних масел в процесі тривалої експлуатації є зволоження і окислювальні реакції. Продукти [2], що утворюються в процесі окислювальних реакцій, не тільки погіршують ізоляційні властивості масел, але і погіршують механічні характеристики целюлозної ізоляції, що знижує ресурс трансформаторів. У зв'язку з цим виникає об'єктивна необхідність у розробці моделей, що дозволяють виявляти прискорене окислення масла на ранніх стадіях. Існуюча система для оцінки технічного стану трансформаторних масел [3], яка реалізована в міжнародних і національних стандартах [4–9], дозволяє встановити два можливих діагнози: «масло придатне до експлуатації» – у разі якщо всі показники масла знаходяться в області допустимих значень, і «масло не придатне до експлуатації» – у разі якщо хоча б один із показників виходить за область допустимих значень. Такий підхід не дозволяє виявити трансформатори з прискореним старінням масел на ранній стадії, а отже і здійснити перехід з технічного обслуговування стану трансформаторів за календарним планом на технічне обслуговування за їх станом.

Одним із шляхів усунення даного недоліку є розробка математичних моделей для оцінки стану масел, які б враховували динаміку зміни показників у часі. Однак, для забезпечення адекватності таких моделей необхідно враховувати можливі відмінності в інтенсивності старіння масел в трансформаторах різного класу напруги, різної конструкції, які експлуатуються в різних умовах. Вирішенню цього завдання і присвячена дана стаття.

Аналіз публікацій. В даний час на додаток до норм і критеріїв, що регламентуються міжнародними та національними стандартами [4–9], як українськими, так і зарубіжними дослідниками пропонуються різні підходи до удосконалення методів діагностики стану трансформаторних масел. Широке використання для вирішення завдань діагностики та прогнозу отримали нейронні мережі та апарат нечіткої логіки [10–14]. У роботі [15] для діагностики стану трансформаторів за результатами аналізу розчинених у маслі газів та інших аналізів масла використовувалися Марковські мережі, а в [16, 17] використовується машинне навчання. Велика кількість досліджень [18–22] присвячена розробці та використанню регресійних моделей для діагностики та прогнозування стану трансформаторних

масел. У роботах [23, 24] для виявлення трансформаторів з прискореним старінням масел на ранній стадії запропоновано використовувати метод траєкторій. У роботах [25–27] наведені результати досліджень, спрямованих на коригування гранично-допустимих значень показників масел з використанням методів статистичних рішень. В [28–30] для діагностики стану трансформаторів розроблені експертні системи, які використовують різні методи діагностики.

Виконаний аналіз показав, що незважаючи на численні результати досліджень, опублікованих у відкритих літературних джерелах, питання, пов'язані з аналізом динаміки залежностей показників масел від тривалості експлуатації в діючому обладнанні висвітлені недостатньо, що і послужило причиною для підготовки даної публікації.

Мета статті. Метою статті є порівняльний аналіз інтенсивності старіння трансформаторних масел у баках трансформаторів напругою 110 кВ та автотрансформаторів напругою 330 кВ.

Метод досліджень. Для оцінки можливих відмінностей в інтенсивності старіння трансформаторних масел в трансформаторах різного класу напруги була використана математична модель дисперсійного аналізу лінійних моделей (коваріаційного аналізу) показників ізоляції масла на тривалість експлуатації [31]. Слід зазначити, що використання лінійних моделей для аналізу залежностей показників масла від тривалості експлуатації є допущенням, оскільки результати досліджень, наведені в роботах [1, 32, 33], свідчать про наявність нелінійних ділянок в залежностях показників. Однак, результати, наведені в роботах [34, 35] свідчать про те, що наявність нелінійностей в залежностях показників ізоляції різного обладнання, не робить істотного впливу на висновки про наявність або відсутності відмінностей в інтенсивності процесів старіння ізоляції.

Припустимо, що тимчасові ряди показників масла описуються лінійною регресією, при цьому характеристики регресії змінюються від групи до групи, тобто інтенсивність старіння трансформаторних масел, а отже і швидкість зміни показників масла в різних трансформаторах істотно відрізняються. Тоді відповідна модель має вигляд [31]:

$$Y_{ji} = \alpha_j + \beta_j \cdot t_{ji} + Z_{ji}, \quad (1)$$

де i – номер вимірювання ($i = \overline{1, n_j}$) для j -го показника;

t_{ji} – час i -го вимірювання значень j -го показника;

α_j та β_j – коефіцієнти регресії для значень j -ї групи результатів вимірювання;

Z_{ji} – випадковий неконтрольований залишок, для якого $M[Z_{ji}] = 0$ та $M[Z_{ji}^2] = \sigma_z^2$. Залишки Z_{ji} є взаємно незалежними.

Припустимо, що коефіцієнти A_j та B_j отримані за допомогою методу найменших квадратів і є оцінками невідомих коефіцієнтів a_j та b_j . Тоді буде природним розглянути, чи може одне лінійне рівняння [31]

$$y = a + b \cdot x \quad (2)$$

представити всі k регресій (1).

Така лінійна $2(k-1)$ гіпотеза H_0 : ($a_1 = a_2 = \dots = a_k = a$; $b_1 = b_2 = \dots = b_k = b$) відповідає висновку про однакову швидкість дрейфу значень показників масла на всьому спостережуваному інтервалі експлуатації. Для перевірки даної гіпотези її зручно розбити на чотири окремих гіпотези, кожен з яких можна перевіряти окремо:

- $H_0^{(1)}$ – лінії регресії паралельні, тобто ($b_1 = b_2 = \dots = b_k$);
- $H_0^{(2)}$ – групові середні лежать на прямій;
- $H_0^{(3)}$ – кутовий коефіцієнт цієї прямої дорівнює b_c , тобто збігається з (b_1, b_2, \dots, b_k);
- $H_0^{(4)}$ – групові вільні члени збігаються, тобто ($a_1 = a_2 = \dots = a_k$).

Відомо [31], що розкладання повної суми квадратів відхилень величини Y_{ij} від загального середнього в рамках однофакторної параметричної моделі (1) має вигляд:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2 &= w_0 \cdot B_0^2 + \\ &+ \frac{w_c \cdot w_m}{w_0} (B_c - B_m)^2 + \\ &+ \sum_{j=1}^k n_j [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2 + \\ &+ \sum_{j=1}^k w_j \cdot (B_j - B_c)^2 + \\ &+ \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y}_j - B_j \cdot (x_{ji} - \bar{x}_j)]^2. \end{aligned} \quad (3)$$

де k – кількість аналізованих часових рядів (кількість високовольтних вводів);

n_j – кількість вимірювань аналізованого показника у j -му вводі;

y_{ij} – поточне (i -те) значення аналізованого показника для j -го вводу;

\bar{y} – вибіркове середнє значення показника, розраховане для всіх аналізованих вводів;

\bar{y}_j – вибіркове середнє значення показника, розраховане для аналізованого (j -го) вводу;

x_{ij} – поточне (i -те) значення тривалості експлуатації для j -го вводу;

\bar{x} – середнє значення тривалості експлуатації, розраховане для всіх аналізованих вводів;

\bar{x}_j – середнє значення тривалості експлуатації, розраховане для аналізованого (j -го) вводу;

B_j – кутовий коефіцієнт лінійної регресії, розрахований для j -го вводу;

$w_j = \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - \bar{x})^2$ – вага кутового коефіцієнта B_j ;

$B_c = \frac{1}{\sum_{j=1}^k w_j} \sum_{j=1}^k B_j \cdot w_j$ – середньозважений кутовий коефіцієнт, що представляє собою результат усереднення при нерівноточних вимірюваннях;

$w_c = \sum_{j=1}^k w_j$ – вага середньозваженого кутового коефіцієнта B_c ;

$B_m = \frac{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x}) \cdot (\bar{y}_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2}$ – зважений кутовий коефіцієнт;

$w_m = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2$ – вага зваженого кутового коефіцієнта B_m ;

$B_0 = \frac{w_c \cdot B_c + w_m \cdot B_m}{w_c + w_m}$ – загальний груповий кутовий коефіцієнт регресії, який був би отриманий, якщо на підставі всіх пар спостережень $\{y_{ij}, x_{ij}\}$, без урахування розбиття на групи, побудувати одну лінійну регресію;

$w_0 = w_m + w_c$ – вага загального групового коефіцієнта кутового B_0 .

Слід зазначити, що розкладання (3) отримано як розгорнута форма дисперсійного розкладання в рамках однофакторної параметричної моделі (1), для якої загальне і групові середні визначалися рівняннями:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \bar{y} + \bar{\epsilon}, \\ \bar{y}_j &= \bar{y} + \xi_j + \bar{\epsilon}_j. \end{aligned}$$

Результати дисперсійного аналізу для розкладання (3) представлені в табл. 1.

Значення параметрів a_m і b_m визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} a_m &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^k n_j \cdot a_j, \\ b_m &= \frac{1}{w_m} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x}) \cdot (a_j + b_j \cdot \bar{x}_j). \end{aligned}$$

Враховуючи результати табл. 1 введемо три додаткові суми

$$\begin{aligned} S_{\Sigma 0} &= S_{WG} + S_G + S_W, \\ S_{\alpha} &= S_G + S_{WG}, \\ S_{R\alpha} &= S_W + S_R, \end{aligned}$$

які пов'язані з наступними значеннями ступенів свободи:

$$\begin{aligned} v_{\Sigma 0} &= v_{WG} + v_G + v_W, \\ v_{\alpha} &= v_G + v_{WG}, \\ v_{R\alpha} &= v_W + v_R. \end{aligned}$$

Таблиця 1 – Результати дисперсійного розкладання

Джерело мінливості результату вимірювань показника якості	Число ступенів свободи	Сума квадратів відхилень	Математичне очікування середнього квадрата
Загальний кутовий коефіцієнт регресії	$\nu_0 = 1$	$S_0 = w_0 B_0^2$	$\sigma^2 + w_0 B_0^2$
Кутовий коефіцієнт групових середніх порівняно із середньозваженим коефіцієнтом	$\nu_{WG} = 1$	$S_{WG} = \frac{w_c \cdot w_m}{w_0} \cdot (B_c - B_m)^2$	$\sigma^2 + \frac{w_c \cdot w_m}{w_0} \cdot (b_c - b_m)^2$
Кутовий коефіцієнт групових середніх щодо лінійної регресії групових середніх	$\nu_G = k-2$	$S_G = \sum_{j=1}^k n_j \cdot [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2$	$\sigma^2 + \frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k n_j \cdot [a_j - a_m - b_m \cdot \bar{x}_j]^2$
Кутовий коефіцієнт групових середніх між кутовими коефіцієнтами всередині груп	$\nu_W = k-1$	$S_W = \sum_{j=1}^k w_j \cdot (B_j - B_c)^2$	$\sigma^2 + \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k w_j \cdot (b_j - b_c)^2$
Залишок	$\nu_R = N-2k$	$S_R = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y}_j - B_j \cdot (x_{ji} - \bar{x}_j)]^2$	σ^2
Загальний	$\nu = N-1$	$S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2$	—

Для перевірки висунутих гіпотез розраховувалися середні квадрати:

$$\bar{S}_0 = \frac{S_0}{\nu_0}; \quad \bar{S}_G = \frac{S_G}{\nu_G}; \quad \bar{S}_W = \frac{S_W}{\nu_W};$$

$$\bar{S}_\alpha = \frac{S_\alpha}{\nu_\alpha}; \quad \bar{S}_{R\alpha} = \frac{S_{R\alpha}}{\nu_{R\alpha}}; \quad \bar{S}_R = \frac{S_R}{\nu_R}.$$

Отримані значення середніх квадратів при відомих значеннях числа ступенів свободи дозволили розрахувати значення F -критеріїв:

$$F_0 = \frac{\bar{S}_0}{\bar{S}_R}; \quad F_{WG} = \frac{\bar{S}_{WG}}{\bar{S}_R}; \quad F_G = \frac{\bar{S}_G}{\bar{S}_R};$$

$$F_W = \frac{\bar{S}_W}{\bar{S}_R}; \quad F_\alpha = \frac{\bar{S}_\alpha}{\bar{S}_{R\alpha}}.$$

Перевірка гіпотези $H_0^{(1)}$ здійснювалася шляхом порівняння значення критерію F_W з F -розподілом з $k-1$ та $N-2k$ ступенями свободи; гіпотези $H_0^{(2)}$ – шляхом порівняння критерію F_G з F -розподілом з $k-2$ і $N-2k$ ступенями свободи; гіпотези $H_0^{(3)}$ – шляхом порівняння критерію F_{WG} з F -розподілом з 1 і $N-2k$ ступенями свободи; $H_0^{(4)}$ – шляхом порівняння критерію F_α з F -розподілом з $k-1$ і $N-k-1$ ступенями свободи. Для оцінки сумарних змін в параметрах a_i і b_i моделі використаний тестовий критерій $F_{\Sigma 0}$:

$$F_{\Sigma 0} = \frac{\bar{S}_G + \bar{S}_{WG} + \bar{S}_W}{2 \cdot \bar{S}_R} \cdot \left(\frac{N-2 \cdot k}{k-1} \right).$$

Систематична зміна математичного очікування будь-якого з показників контролю під впливом часу експлуатації Y можна оцінити за допомогою критерію $F_0 = S_0$.

Повне дисперсійне розкладання (3) виконувалося за допомогою програми «KOVAN» [36].

Результати коваріаційного аналізу залежностей показників масла від тривалості експлуатації в трансформаторах напругою 110 кВ. Для проведення аналізу були використані результати періодичних випробувань трансформаторного масла для 231 трансформатора напругою 110 кВ, які знаходяться в експлуатації в 6 областях України. Перелік показників якості трансформаторного масла кількість часових рядів і обсяг вибірових значень аналізованої вибірки наведені в табл. 2. Як видно з таблиці загальний обсяг вибірки склав 17449 значень за 10 показниками масла, що дозволило сформулювати 1078 часових рядів, що представляють залежності вибірових значень показників від тривалості експлуатації по кожному з трансформаторів.

Слід зазначити, що для оцінки ступеня «зашумленості» результатів випробувань як для вихідних даних по трансформаторах 110 кВ, так і для даних по автотрансформаторам 330 кВ, процедура попередньої статистичної обробки [22, 37] не виконувалася. Результати дисперсійного розкладання (3) для часових рядів 10 показників масел наведені в табл. 3.

Таблиця 2 – Перелік показників трансформаторного масла, кількість часових рядів і обсяг вибіркового значень для трансформаторів напругою 110 кВ

№	Показник якості масла	Обсяг вибіркового значень	
		Кількість трансформаторів	Кількість значення
1	Температура спалаху	230	3746
2	Вміст органічних кислот	231	3741
3	Пробивна напруга	231	3723
4	tgδ при 20 °С	31	268
5	tgδ при 70 °С	49	397
6	tgδ при 90 °С	60	570
7	Колір масла	121	2108
8	Вміст водорозчинних кислот	46	1191
9	Вологовміст масла	73	1635
10	Питома вага масла	6	70
	Разом	231	17449

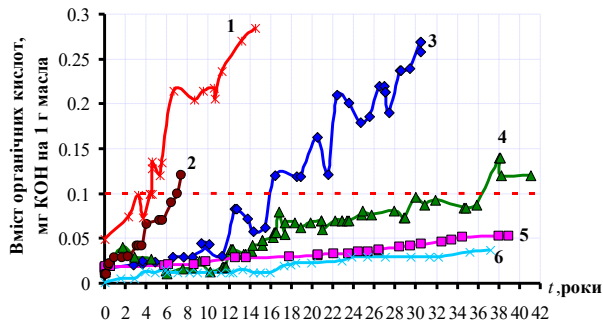
Виконане розкладання повної суми квадратів S відхилень значень стандартизованих результатів вимірювань дозволяє оцінити адитивні і мультиплікативні зміни в процесах параметричного зсуву математичних очікувань показників масел. Для

цього розглянемо два критерії F_{α} і F_W . Критерій F_{α} відображає випадкові зрушення вільного члена a_i регресійної моделі, а F_W – випадкові зміни кутового коефіцієнта b_i моделі.

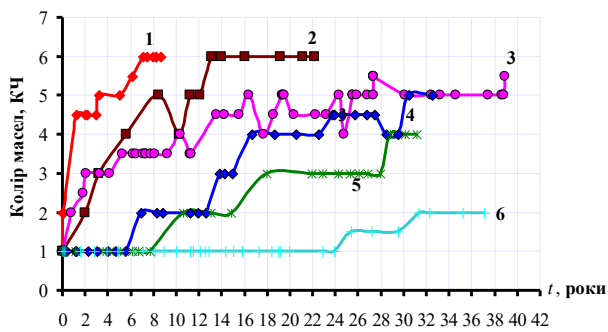
Для перевірки гіпотези $H_0^{(1)}$ (про те, що лінії регресії паралельні, тобто швидкість зміни показників у всіх трансформаторах ідентична) було виконано порівняння спостережуваного значення критерію F_W (чисельник в табл. 3) з критичними точками F -розподілу з $k-1$ і $N-2k$ ступенями свободи (знаменник у табл. 3). Як видно з таблиці для всіх показників масел гіпотеза $H_0^{(1)}$ відкидається, що свідчить про наявність мультиплікативного зміщення між часовими рядами показників з різних трансформаторів. Мультиплікативне зміщення, тобто різна швидкість дрейфу значень показників масла в різних трансформаторах, обумовлене різними умовами експлуатації. Зокрема результати досліджень, наведені в [38–40], показують наявність істотних відмінностей в інтенсивності старіння масел в трансформаторах з різними значеннями коефіцієнтів завантаження, які обумовлюють відмінності робочих температур масел. Наочно наявність мультиплікативного зміщення між окремими залежностями одного і того ж показника ілюструють залежності вмісту в маслі органічних кислот, наведені на рис. 1 а, і кольору трансформаторних масел, наведені на рис. 1 б, від тривалості експлуатації.

Таблиця 3 – Результати коваріаційного аналізу показників трансформаторного масла в силових трансформаторах напругою 110 кВ

Показник	k	N	Значення сум дисперсійного розкладання							Значення F -критерію (спостережуване/критичне)					
			S_0	S_{WG}	S_G	S_W	S_R	S_{α}	S	F_0	F_{WG}	F_G	F_W	F_{α}	F_{Z0}
Температура спалаху	230	3746	293,46	2236,27	31908,4	5880,6	8637,8	34144,7	48956,6	111,63	850,72	53,239	9,768	36,09	33,24
										3,841	3,841	1,000	1,000	1,000	1,000
Вміст органічних кислот	231	3741	2,5560	0,08988	3,6631	1,6740	0,9456	3,7530	8,92880	8862,9	311,68	55,467	25,23	21,85	40,90
										3,841	3,841	1,000	1,000	1,000	1,000
Пробивна напруга	231	3723	15433,63	1170,7	231945,96	60613,03	306003,3	263116,6	645166,7	164,47	332,17	10,79	2,808	10,89	7,49
										3,841	3,841	1,000	1,000	1,000	1,000
tgδ при 20 °С	31	268	0,77376	0,62181	3,3904	5,2150	8,0301	4,0122	18,0311	19,849	15,951	2,999	4,459	2,382	3,94
										3,841	3,841	1,468	1,459	1,459	1,622
tgδ при 70 °С	49	397	70,4814	0,07925	315,39	203,64	328,93	315,47	918,535	64,066	0,0720	6,0997	3,856	4,282	4,915
										3,841	3,841	1,367	1,363	1,363	1,461
tgδ при 90 °С	60	570	110,480	193,393	2011,8	1483,2	3095,3	2205,2	6894,3	16,061	28,115	5,0426	3,654	4,155	4,544
										3,841	3,841	1,325	1,321	1,321	1,395
Колір масла	121	2108	448,482	202,240	2003,0	687,27	388,14	2205,2	3729,15	2156,0	972,27	80,920	27,53	33,93	57,94
										3,841	3,841	1,223	1,221	1,221	1,000
Вміст водорозчинних кислот	46	1191	0,0493	0,00604	0,05936	0,0916	0,1287	0,0654	0,33515	421,26	51,580	11,514	17,37	7,545	14,89
										3,841	3,841	1,378	1,375	1,375	1,000
Вологовміст масла	73	1635	12555,7	2415,0	12997,2	20427,3	142350,0	15412,2	190745,4	131,3	25,261	1,9148	2,967	2,052	2,603
										3,841	3,841	1,300	1,298	1,298	1,000
Питома вага масла	6	70	0,0019	6,2 · 10 ⁻⁶	0,00273	3,4 · 10 ⁻⁴	5,1 · 10 ⁻⁴	0,0027	0,0055	217,9	0,709	77,846	7,791	40,55	35,10
										4,009	4,009	2,533	2,376	2,364	4,434



а



б

Рисунок 1 – Залежності вмісту в маслі органічних кислот (а) і кольору трансформаторного масла (б) від тривалості експлуатації для трансформаторів напругою 110 кВ, які експлуатуються з різним навантаженням

Як видно з рисунку, незважаючи на те, що значення показників на момент заливки масел мали близькі значення, відмінності в режимах роботи трансформаторів і, як наслідок, різне значення робочих температур призводять до різної швидкості дрейфу показників у часі. При цьому, як видно з рис. 1 а, значення вмісту в маслі органічних кислот в трансформаторах № 1–4 перевищує гранично-допустиме значення (горизонтальна пунктирна лінія) в різні моменти часу, що ще раз свідчить про необхідність врахування умов експлуатації трансформаторів при розробці моделей для ранньої діагностики масел [41].

Гіпотеза про те, що групі середні лежать на прямій $H_0^{(2)}$ була відкинута (див. табл. 3) для всіх показників масла. Це ще раз свідчить про те, що інтенсивність старіння масла в аналізованих трансформаторах відрізняється. Крім того, великі значення критерію F_G говорять про нерівномірність розкиду початкових значень показників якості, що свідчить про істотні розбіжності в якості масел по групах їх виробників-постачальників.

Оскільки спостережувані значення критерію F_{WG} , для всіх показників масла (за винятком питомої ваги масла) перевищують відповідні критичні значення (див. табл. 3), то гіпотеза $H_0^{(3)}$ відкидається. Тобто кутовий коефіцієнт лінійної регресії, побудованої по всій сукупності вихідних даних, не дорівнює частковим кутовим коефіцієнтам окремих часових

рядів показників трансформаторних масел. З цього випливає, що представлена сукупність даних не може бути описана однією регресійною моделлю.

За результатами порівняння значень критеріїв F_α з табл. 3 з критичними точками F -розподілу з урахуванням числа ступенів свободи гіпотеза $H_0^{(4)}$ також була відкинута для більшості показників. З табл. 3 видно, що практично для всіх масивів вихідних даних і практично для всіх показників критеріїв F_W і F_α пов'язані нерівністю $F_W < F_\alpha$, що вказує на систематичні розбіжності в показниках якості трансформаторних масел, що заливаються в обладнання перед початком тривалої його експлуатації. Наочно відмінності в якості масла, що заливається, (тобто наявність адитивного зміщення між окремими залежностями показників) ілюструє рис. 2, на якому наведені залежності температури спалаху масел від тривалості експлуатації. Як видно з рисунку має місце істотний розкид в значеннях температури спалаху масел на момент їх заливки в бак трансформаторів.

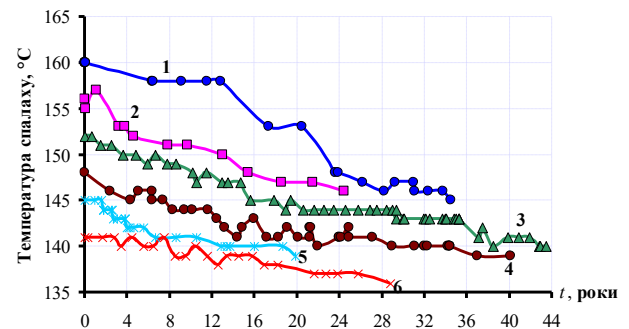


Рисунок 2 – Залежності температури спалаху масла від тривалості експлуатації для трансформаторів напругою 110 кВ з різною якістю масел

Оскільки спостережувані значення критерію $F_{\Sigma 0}$ перевищують відповідні критичні значення F -критерію, то можна зробити висновок про наявність значущого впливу сумарних змін в параметрах a_i і b_i моделі практично для всіх показників масел. Як приклад такого впливу на рис. 3 наведені залежності пробивної напруги масел від тривалості експлуатації. Як видно з рисунку на інтенсивність старіння масла значущий вплив мають як якість залитого масла, так і умови експлуатації трансформаторів. Так для масла з більш високими значеннями пробивної напруги на момент заливки (трансформатори № 1 і 2) швидкість зниження пробивної напруги вище, ніж в трансформаторах з більш низьким значенням пробивної напруги на момент заливки.

Перевищення спостережуваних значень критерію F_0 над критичними значеннями даного критерію свідчить про наявність систематичних змін математичного очікування показників.

Таким чином, виконаний коваріаційний аналіз продемонстрував наявність не тільки адитивного і мультиплікативного зміщення між окремими рядами показників, а й значущу систематичну складову, що свідчить про старіння трансформаторних масел в

аналізованих трансформаторах. Отримані результати добре узгоджуються з опублікованими раніше результатами по старінню масел в лабораторних умовах [1, 42–45].

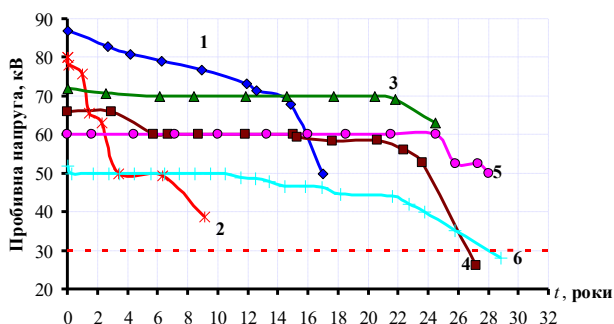


Рисунок 3 – Залежності пробивної напруги масла від тривалості експлуатації в трансформаторах напругою 110 кВ

Результати коваріаційного аналізу залежностей показників масла від тривалості експлуатації в автотрансформаторах напругою 330 кВ. В якості вихідних даних були використані результати періодичного контролю пробивної напруги трансформаторних масел по 49 автотрансформаторам напругою 330 кВ. Перелік показників трансформаторних масел і обсяг вибірових значень по кожному показнику наведено в табл. 4. Як видно з таблиці загальний обсяг вибірки склав 3628 значень за 8 показниками масла, що дозволило сформуванати 248 часових рядів, що представляють залежності вибірових значень показників від тривалості експлуатації по кожному з трансформаторів.

Таблиця 4 – Перелік показників трансформаторних масел і обсяг вибірових значень по кожному показнику для автотрансформаторів напругою 330 кВ

№	Показник якості масла	Обсяг вибірових значень	
		Кількість трансформаторів	Кількість значення
1	Температура спалаху	49	887
2	Вміст в маслі органічних кислот	48	850
3	Пробивна напруга	49	852
4	tgδ при 90°C	45	545
5	Вологовміст	27	293
6	Вміст механічних домішок	20	122
7	Колір масла	7	51
8	Газовміст	3	28
Разом		49	3628

Результати дисперсійного розкладання (3) для часових рядів 8 показників масел наведені в табл. 5.

Аналізуючи дані, наведені в табл. 5, легко побачити, що також як і для трансформаторів напругою 110 кВ, в автотрансформаторах напругою 330 кВ для всіх показників масел (крім газовмісту) гіпотеза $H_0^{(1)}$ відкидається, що свідчить про наявність мультиплікативного зміщення між тимчасовими рядами показників з різних автотрансформаторів. Відмінності в інтенсивності дрейфу показників масла в часі в автотрансформаторах 330 кВ ілюструє рис. 4.

Таблиця 5 – Результати коваріаційного аналізу показників трансформаторного масла в силових автотрансформаторах напругою 330 кВ

Показник	k	N	Значення сум дисперсійного розкладання						Значення F-критерію (спостережуване/критичне)						
			S_0	S_{WG}	S_G	S_W	S_R	S_α	S	F_0	F_{WG}	F_G	F_W	F_α	$F_{\Sigma 0}$
Температура спалаху	49	887	7.87	994.61	3870.75	1013.90	3232.28	4865.37	9119.43	1.92	242.78	20.10	5.15	19.98	14.94
										3.84	3.84	1.36	1.36	1.36	1.35
Вміст органічних кислот	48	850	0.001	0.01	0.05	0.02	0.10	0.06	0.20	11.74	131.44	7.92	4.33	8.82	7.44
										3.84	3.84	1.37	1.36	1.35	1.35
Пробивна напруга	49	852	270.94	135.06	18511.30	8756.6	44665.16	18646.37	72339.08	4.57	2.28	6.64	3.07	5.83	4.81
										3.84	3.84	1.36	1.36	1.35	1.29
tgδ при 90°C	45	545	7.83	27.74	276.98	386.17	619.97	304.73	1318.71	5.75	20.35	4.72	6.44	3.43	5.76
										3.84	3.84	1.38	1.37	1.37	1.48
Вологовміст масла	27	293	0.38	1460.66	2005.58	807.40	4786.49	3466.25	9060.53	0.01	72.93	4.0	1.55	6.31	4.10
										3.84	3.84	1.5	1.49	1.49	1.69
Вміст механічних домішок	20	122	154.86	217.32	783.17	1605.62	1173.46	1000.49	3934.44	10.82	15.18	3.04	5.90	1.91	4.79
										3.97	3.97	1.75	1.73	1.70	1.96
Колір масла	7	51	0.002	2.36	33.07	3.01	2.15	35.43	40.59	0.04	40.66	113.78	8.63	49.19	55.11
										4.11	4.11	2.47	2.36	2.32	3.78
Газовміст	3	28	13.90	0.0002	0	0.37	4.03	0.0002	18.31	75.86	0.001	0	1.02	0.0006	0.51
										4.30	4.30	4.30	3.44	3.40	19.45

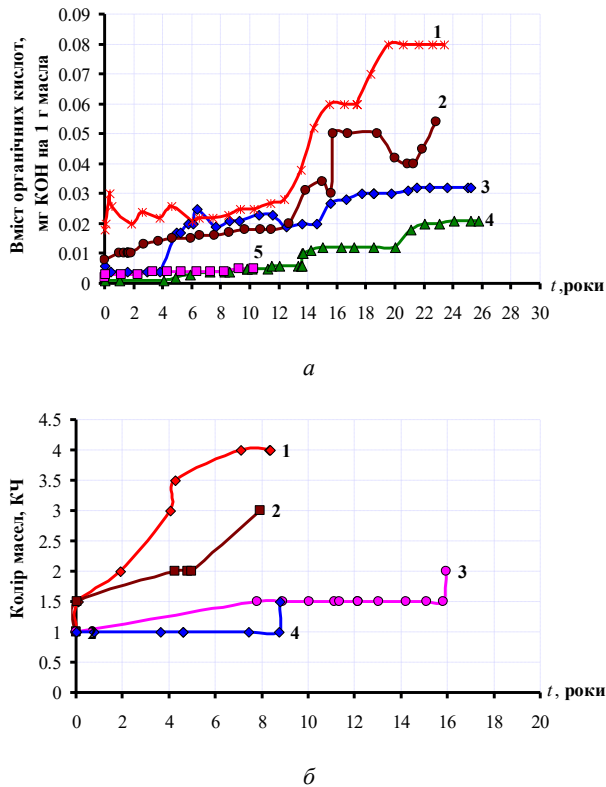


Рисунок 4 – Залежності вмісту в маслі органічних кислот (а) і кольору трансформаторного масла (б) від тривалості експлуатації для автотрансформаторів 330 кВ, які експлуатуються з різним навантаженням

Гіпотеза про те, що групові середні лежать на прямій $H_0^{(2)}$ була відкинута (див. табл. 5) для всіх показників масла, крім газовмісту. Більш того, як видно з табл. 5, значення суми S_G для даного показника дорівнює нулю, тобто згідно з результатами дисперсійного розкладання залежності газовмісту масел в трьох аналізованих автотрансформаторах практично збігаються. І дійсно, як видно з рис. 5, для двох із трьох аналізованих автотрансформаторів (з максимальним числом спостережень) залежності газовмісту від тривалості експлуатації повністю збігаються. Слід зазначити, що ці два автотрансформатори встановлені на одній і тій же підстанції і експлуатуються у схожих умовах. Наведений приклад наочно ілюструє ефективність коваріаційного аналізу лінійних моделей стосовно оцінки характеру залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації.

Як видно з табл. 5 практично для всіх показників (крім пробивної напруги і газовмісту) кутовий коефіцієнт лінійної регресії, побудованої по всій сукупності вихідних даних, не дорівнює частковим кутовим коефіцієнтам окремих часових рядів показників трансформаторних масел, тобто гіпотеза $H_0^{(3)}$ відкидається.

Також як і в трансформаторах напругою 110 кВ, в автотрансформаторах напругою 330 кВ виявлені істотні відмінності в якості масла, що заливається. Як видно з табл. 5 значення критерію F_α для всіх

показників крім газовмісту перевищують критичні значення F -критерію з урахуванням числа ступенів свободи, що свідчить про те, що гіпотеза $H_0^{(4)}$ відкидається. Наочно відмінності в якості масла, залитого в баки автотрансформаторів напругою 330 кВ, ілюструє рис. 6, на якому наведені залежності температури спалаху трансформаторного масла від тривалості експлуатації.

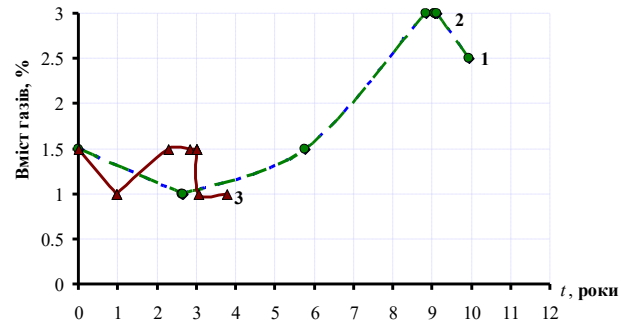


Рисунок 5 – Залежності газовмісту масел від тривалості експлуатації в автотрансформаторах напругою 330 кВ

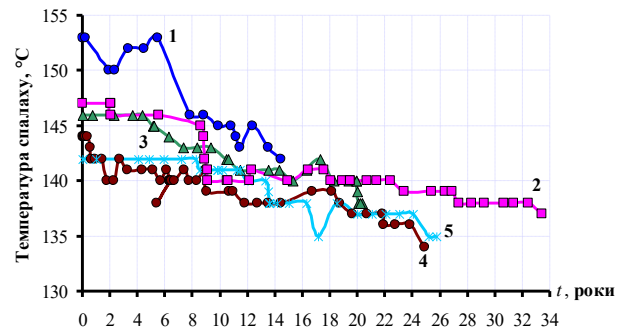


Рисунок 6 – Залежності температури спалаху масла від тривалості експлуатації для автотрансформаторів напругою 330 кВ

Крім того виконаний аналіз показав наявність значущого впливу сумарних змін в параметрах a_i і b_i моделі практично для всіх показників масел, крім газовмісту.

Для ілюстрації отриманих результатів на рис. 7 наведені залежності значень тангенса кута діелектричних втрат трансформаторних масел, виміряних при температурі 90 °C, від тривалості експлуатації для автотрансформаторів напругою 330 кВ.

Як видно з рисунку інтенсивність зростання тангенса кута діелектричних втрат масел залежить як від якості залитого масла, так і від режимів навантаження автотрансформаторів. Так для автотрансформаторів № 1–3 $\text{tg}\delta$ масла на момент заливки мали близькі значення, але інтенсивність дрейфу даного показника в даних автотрансформаторах істотно відрізняється. У той же час для автотрансформаторів № 4 та 5 мають істотні відмінності в значеннях даного показника на момент заливки – зростання значень $\text{tg}\delta$ масла відбувається з близькою швидкістю.

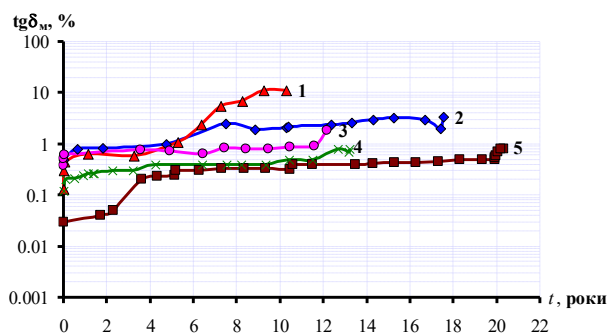


Рисунок 7 – Залежність значень тангенса кута діелектричних втрат трансформаторних масел, виміряних при температурі 90 °С, від тривалості експлуатації для автотрансформаторів напругою 330 кВ

Як видно з табл. 5 для більшості показників масел має місце наявність систематичних змін математичного очікування показників, тобто з ростом тривалості експлуатації, під дією робочої температури, напруженості електричного поля відбувається зміна хімічної структури масла, що в свою чергу викликає зміну значень показників.

Порівняльний аналіз інтенсивності старіння масла в трансформаторах напругою 110 кВ і автотрансформаторах напругою 330 кВ. Виконаний аналіз дозволив оцінити характер зміни показників масла в трансформаторах напругою 110 кВ і автотрансформаторах напругою 330 кВ. У той же час представляє практичний інтерес виконати порівняльний аналіз інтенсивності старіння масел в трансформаторах різного класу напруги. Оскільки про інтенсивність старіння масел можна судити по швидкості дрейфу показників, а швидкість дрейфу можна оцінити по значенням кутових коефіцієнтів регресії, то для подібної оцінки були проаналізовані значення кутових коефіцієнтів регресійних моделей показників масел на тривалість експлуатації для трансформаторів напругою 110 кВ і автотрансформаторів напругою 330 кВ. Дані значення наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Значення кутових коефіцієнтів регресійної моделі для показників трансформаторного масла в трансформаторах 110 кВ і автотрансформаторів 330 кВ

Показник	Значення кутових коефіцієнтів регресійної моделі	
	Трансформатори 110 кВ	Автотрансформатори 330 кВ
Температура спалаху	-0.02753	-0.01198
Вміст в маслі органічних кислот	0.00258	0.00017
Пробивна напруга	-0.20010	-0.07329
tgδ при 90°С	0.05466	0.02031
Вологовміст	0.26522	0.00935
Колір масла	0.04947	0.00151

Як видно з табл. 6 значення кутових коефіцієнтів лінійної регресії для одних і тих же показників, але в трансформаторах різного класу напруги істотно відрізняються. Про це також свідчать залежності показників масла від тривалості експлуатації в трансформаторах напругою 110 кВ і автотрансформаторах напругою 330 кВ, які наведені на рис. 8.

Аналізуючи залежності на рис. 8, легко побачити, що значення одного і того ж показника в трансформаторах з різним класом напруги займають різні області простору значень. У той же час значення показників в трансформаторах одного класу напруги розташовані досить компактно, що також свідчить про наявність істотних відмінностей в інтенсивності старіння масла в трансформаторах різного класу напруги.

Як видно з табл. 6 і рис. 8 інтенсивність зволоження масел і окислювальних реакцій (швидкість дрейфу вмісту в маслі органічних кислот і колір масла) в автотрансформаторах 330 кВ істотно нижче, ніж в трансформаторах напругою 110 кВ, що ілюструє рис. 8 б, д та е. Дана обставина добре узгоджується з результатами досліджень, наведеними в [41], і може бути пояснена як обмеженим впливом кисню-повітря для автотрансформаторів 330 кВ герметичного виконання (трансформатори 110 кВ мають негерметичну конструкцію), так і великим об'ємом залитого масла в негерметичних автотрансформаторах 330 кВ, у порівнянні з трансформаторами 110 кВ.

У той же час інтенсивність зниження пробивної напруги і зростання тангенса кута діелектричних втрат масла в автотрансформаторах напругою 330 кВ нижче, ніж в трансформаторах 110 кВ (див. 8 в і з).

Отримані результати свідчать про наявність істотних відмінностей в інтенсивності старіння трансформаторних масел в трансформаторах різного класу напруги. Дані відмінності необхідно враховувати, як при коригуванні гранично-допустимих значень показників, так і при розробці моделей для ранньої діагностики стану трансформаторних масел.

Висновок. За результатами дисперсійного аналізу лінійних моделей показників трансформаторних масел встановлено, що як у трансформаторах напругою 110 кВ, так і в автотрансформаторах напругою 330 кВ має місце статистично значуща зміна значень показників зі зростанням тривалості експлуатації, тобто старіння масел. При цьому інтенсивність старіння масла в окремих трансформаторах істотно відрізняється – дрейф значень одного і того ж показника протікає з різною швидкістю. При цьому на інтенсивність старіння масел істотний вплив чинять не тільки режими роботи, що визначають робочу температуру масла, і конструктивні особливості трансформаторів, що визначають доступ атмосферної вологи і кисню-повітря, але і якість масла, що заливається. Більш того в результаті аналізу виявлено наявність взаємного впливу даних факторів.

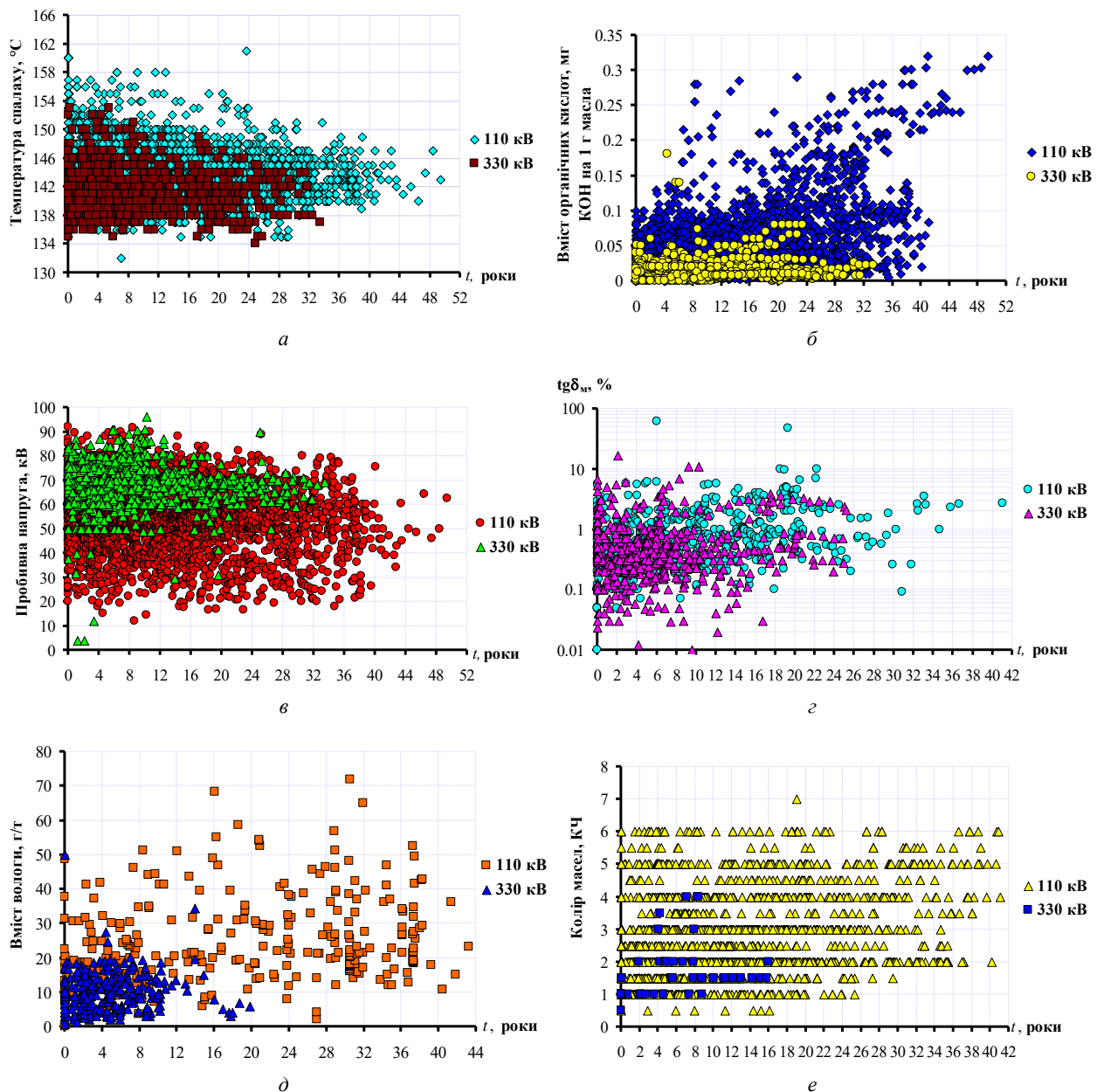


Рисунок 8 – Залежності показників трансформаторних масел від тривалості експлуатації в трансформаторах напруга 110 кВ і автотрансформаторах напругою 330 кВ:

a – температура спалаху; *б* – вміст в маслі органічних кислот; *в* – пробивна напруга; *г* – тангенс кута діелектричних втрат, виміряних при температурі 90 °С; *д* – вологовміст; *е* – колір масла

Виконаний аналіз показав, що інтенсивність старіння масла, тобто швидкість дрейфу показників в трансформаторах напругою 110 кВ і автотрансформаторах напругою 330 кВ істотно різняться. Встановлено, що значення одного і того ж показника в трансформаторах з різним класом напруги займають різні області простору значень. У той же час значення показників в трансформаторах одного класу напруги розташовані досить компактно. Отримані результати свідчать про наявність істотних відмінностей в інтенсивності старіння трансформаторних масел у трансформаторах різного класу напруги. Дані відмінності необхідно враховувати як при коригуванні гранично-допустимих значень

показників, так і при розробці моделей для ранньої діагностики стану трансформаторних масел.

Список літератури

1. Липштейн Р. А., Шахнович М. И. *Трансформаторное масло*. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Rao U. M., Fofana I., Betie A., Senoussaoui M. L., Brahimi M., Brioso E. Condition monitoring of in-service oil-filled transformers: Case studies and experience. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2019. Vol. 35, no. 6. P. 33–42. doi: 10.1109/MEI.2019.8878258.
3. N'cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y., Beroual A. Review of physicochemical-based diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *Energies*. 2016. Vol. 9, no. 5. P. 367. doi: 10.3390/en9050367.

4. IEC 60422:2013. *Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2013. 93 p.
5. IEEE Std C57.106–2015. *IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. 38 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7442048.
6. *COV-H EE 43-101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості*. Київ: Українська науково-технічна електроенергетична асоціація «Аселенерго», 2018.
7. *СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования*. ПАО «Россети», 2017. 262 с.
8. BS EN 60422:2013. *Mineral insulating oils in electrical equipment-supervision and maintenance guidance*. British Standard Institute (BSI), 2013. 50 p.
9. *Transformer: basics, maintenance and diagnostics*. US Department of the Interior. Bureau of Reclamation, 2005. 237 p.
10. V. Srividhya et al. Determination of Breakdown Voltage for Transformer Oil Testing Using ANN. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. P. 443-452. doi: 10.1007/978-981-33-6981-8_35.
11. Singh H. D., Singh J. Enhanced optimal trained hybrid classifiers for aging assessment of power transformer insulation oil. *World Journal of Engineering*. 2020. Vol. 17, no. 3. P. 407-426. doi: 10.1108/wje-11-2019-0339.
12. Nurcahyanto H., Nainggolan J. M., Ardita I. M., Hudaya C. Analysis of Power Transformer's Lifetime Using Health Index Transformer Method Based on Artificial Neural Network Modeling. *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*. 2019. P. 574–579. doi: 10.1109/ICEEI47359.2019.8988870.
13. Forouhari S., Abu-Siada A. Application of adaptive neuro fuzzy inference system to support power transformer life estimation and asset management decision. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25, no. 3. P. 845–852. doi: 10.1109/TDEI.2018.006392.
14. Gautam L., Kumar R., Sood Y. R. Identifying Transformer Oil Criticality Using Fuzzy Logic Approach. *2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES)*. 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/SCES50439.2020.9236724.
15. Uzair M., Banakara B. Failure Analysis of Power Transformers by DGA, Oil Tests and Markov Approach. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology (JJEAST)*. 2016. Vol. 1, no. 8. P. 250–255.
16. Senoussaoui M. E. A., Brahami M., Fofana I. Transformer Oil Quality Assessment Using Random Forest with Feature Engineering. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 7. P. 1809. doi: 10.3390/en14071809.
17. Bhatia N. K., El-Hag A. H., Shaban K. B. Machine Learning-based Regression and Classification Models for Oil Assessment of Power Transformers. *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)*. Doha, Qatar, 2020. P. 400–403. doi: 10.1109/ICIoT48696.2020.9089647.
18. Abdi S., Harid N., Safiddine L., Boubakeur A., Haddad A. The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 8. P. 2089. doi: 10.3390/en14082089.
19. Wahab M. A. A., Hamada M. M., El-Tallawy A. A. A., Ismail G. A new non-linear model for transformer oil residual operating time. *2008 12th International Middle-East Power System Conference*. 2008. P. 66–70. doi: 10.1109/MEPCON.2008.4562315.
20. Gouda O. E., El Dein A. Z. Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. *Electric Power Components and Systems*. 2019. Vol. 47, no. 4–5. P. 406–419. doi: 10.1080/15325008.2019.1604848.
21. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnostics of Transformer Oils Using the Multiple Linear Regression Model. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240875.
22. Бондаренко В. Е., Шапов П. Ф., Шутенко О. В. *Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел [Монография]*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 452 с.
23. Бондаренко В. Е., Шутенко О. В. Усовершенствование процедуры принятия решений при оценке степени старения трансформаторных масел. *ЭЛЕКТРО. Електротехника, електроенергетика, електротехнічна промисловість*. 2009. №1. С. 17–21.
24. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnosing the Condition of Transformer Oils Using the Trajectory Method. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598490.
25. Шутенко О. В., Пономаренко С. Г. Коригування гранично-допустимих значень пробивної напруги трансформаторних масел методом мінімального ризику. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2020. № 1. С. 106–115. doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.16.
26. Shutenko O., Ponomarenko S. Correction of the Maximum Permissible Values of the Oil Acidity by the Minimum Risk Method. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2021. P. 310–315. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575854.
27. Shutenko O., Ponomarenko S. Using Statistical Decision Methods to Correct the Maximum Permissible Values of Transformer Oils Indicators. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 471–476. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570041.
28. Godina R., Rodrigues E., Matias J., Catalão J. Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges. *Energies*. 2015. Vol. 8, no. 10. P. 12147–12186. doi: 10.3390/en81012147.
29. Muhamad N., Kamarden H. Review of Oil-Filled Transformer Monitoring Technology for New User. *Applied Mechanics and Materials*. 2016. Vol. 818. P. 63–68. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.818.63.
30. Shutenko O., Kulyk O., Ponomarenko S. Informational and Analytical System for Diagnostics of the Electric Power Equipment Condition. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 2020. P. 105–110. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160251.
31. Johnson N. L., Leone F. C. *Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1977, 618 p.
32. Шутенко О. В. Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течении длительной эксплуатации. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2007. № 4. С. 26–30.
33. Шутенко О. В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2006. № 4. С. 42–50.
34. Шутенко О. В. Ковариационный анализ моделей старения трансформаторного масла. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2003. № 485. С. 163–169.
35. Shutenko O., Zagaynova A., Serdyukova G. Analysis of Air-Tight High-Voltage Bushing Insulation Parameter Dynamics under Various Conditions during Long-term Operation. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P. 321–326. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879896.
36. Шутенко О. В., Баклай Д. Н. *Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2013. 268 с.
37. Shutenko O., Ponomarenko S. Reliability Assessment of the Results of Periodic Monitoring of the Transformer Oils Condition. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey, 2020. P. 77–82. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263141.
38. Шутенко О. В. Исследование влияния загрузки трансформатора на состояние масла в процессе эксплуатации. *Вестник НТУ «ХПИ». Електроенергетика и преобразовательная техника*. 2004. № 22. С. 121–126.
39. Шутенко О. В. Исследование влияния режимов работы трансформаторов на интенсивность старения масла. *Енергетика та електрифікація*. 2008. №8. С. 54–59.
40. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of the Impact of Power Transformer Loading on the Transformer Oil Aging Intensity. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 76–81. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250159.

41. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of Distribution Laws of Transformer Oil Indicators in 110–330 kV Transformers. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 5. P. 46–56. doi: 10.20998/2074-272X.2021.5.07.
42. Бурьянов Б. П. *Трансформаторное масло*. Москва: Государственные энергетические издания, 1955. 190 с.
43. Черножуков Н. И., Крэйн С. Э. *Окисляемость минеральных масел*. Москва: Гостоптехиздат, 1959. 370 с.
44. Маневич Л. О. *Обработка трансформаторного масла*. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 104 с.
45. Kassi K. S., Fofana I., Volat C., Farinas M. I. Impact of oils degradation on the cooling capacity of power Transformers. *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering*. Pilsen, Czech Republic, 2015.

References (transliterated)

1. Lipshteyn R. A., Shakhnovich M. I. *Transformatornoe maslo* [Transformer oil]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
2. Rao U. M., Fofana I., Betie A., Senoussaoui M. L., Brahami M., Briosso E. Condition monitoring of in-service oil-filled transformers: Case studies and experience. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2019, vol. 35, no. 6, pp. 33–42. doi: 10.1109/MEI.2019.8878258.
3. N'cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y., Beroual A. Review of physicochemical-based diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *Energies*. 2016, Vol. 9, no. 5, pp. 367. doi: 10.3390/en9050367.
4. IEC 60422:2013. *Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2013. 93 p.
5. *IEEE Std C57.106–2015. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. 38 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7442048.
6. *SOU-N EE 43-101:2009. Pryumannya, zastosuvannya ta ekspluatatsiya transformatornykh masel. Normy otsinyvannya yakosti* [Company Standard 43-101:2009. Acceptance, application and operation of transformer oils. Quality assessment standards]. Kyiv, Ukrainian Scientific and Technical Electric Power Association «Aselenergo», 2018.
7. *STO 34.01-23.1-001-2017. Ob'em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya* [Company Standard 34.01-23.1-001-2017. Scope and standards for testing electrical equipment]. PJSC "Rosseti", 2017. 262 p.
8. *BS EN 60422:2013. Mineral insulating oils in electrical equipment-supervision and maintenance guidance*. British Standard Institute (BSI), 2013. 50 p.
9. *Transformer: basics, maintenance and diagnostics*. US Department of the Interior. Bureau of Reclamation, 2005. 237 p.
10. V. Srividhya et al. Determination of Breakdown Voltage for Transformer Oil Testing Using ANN. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021, pp. 443-452. doi: 10.1007/978-981-33-6981-8_35.
11. Singh H. D., Singh J. Enhanced optimal trained hybrid classifiers for aging assessment of power transformer insulation oil. *World Journal of Engineering*. 2020, vol. 17, no. 3, pp. 407–426. doi: 10.1108/wje-11-2019-0339.
12. Nurcahyanto H., Nainggolan J. M., Ardita I. M., Hudaya C. Analysis of Power Transformer's Lifetime Using Health Index Transformer Method Based on Artificial Neural Network Modeling. *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*. 2019. P. 574–579. doi: 10.1109/ICEEI47359.2019.8988870.
13. Forouhari S., Abu-Siada A. Application of adaptive neuro fuzzy inference system to support power transformer life estimation and asset management decision. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018, vol. 25, no. 3, pp. 845–852. doi: 10.1109/TDEI.2018.006392.
14. Gautam L., Kumar R., Sood Y. R. Identifying Transformer Oil Criticality Using Fuzzy Logic Approach. *2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES)*. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/SCES50439.2020.9236724.
15. Uzair M., Banakara B. Failure Analysis of Power Transformers by DGA, Oil Tests and Markov Approach. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology (IJEAST)*. 2016, vol. 1, no. 8, pp. 250–255.
16. Senoussaoui M. E. A., Brahami M., Fofana I. Transformer Oil Quality Assessment Using Random Forest with Feature Engineering. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 7, pp. 1809. doi: 10.3390/en14071809.
17. Bhatia N. K., El-Hag A. H., Shaban K. B. Machine Learning-based Regression and Classification Models for Oil Assessment of Power Transformers. *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)*. Doha, Qatar, 2020, pp. 400–403. doi: 10.1109/ICIoT48696.2020.9089647.
18. Abdi S., Harid N., Safiddine L., Boubakeur A., Haddad A. The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 8, pp. 2089. doi: 10.3390/en14082089.
19. Wahab M. A. A., Hamada M. M., El-Tallawy A. A. A., Ismail G. A. new non-linear model for transformer oil residual operating time. *2008 12th International Middle-East Power System Conference*. 2008, pp. 66–70. doi: 10.1109/MEPCON.2008.4562315.
20. Gouda O. E., El Dein A. Z. Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. *Electric Power Components and Systems*. 2019, vol. 47, no. 4-5, pp. 406–419. doi: 10.1080/15325008.2019.1604848.
21. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnostics of Transformer Oils Using the Multiple Linear Regression Model. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240875.
22. Bondarenko V. E., Shchapov P. F., Shutenko O. V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsionnogo izmeritel'nogo kontrolya transformatornykh masel [Monografiya]* [Improving the efficiency of in-service measuring control of transformer oils [Monograph]]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2007. 452 p.
23. Bondarenko V. E., Shutenko O. V. Usovshenstvovaniye protsedury prinyatiya resheniy pri otsenke stepeni stareniya transformatornykh masel [Improved decision-making procedure for assessing the ageing of transformer oils]. *ELECTRO. Electrical engineering, electrical power, electrical industry*. 2009, no. 1, pp. 17–21.
24. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnosing the Condition of Transformer Oils Using the Trajectory Method. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598490.
25. Shutenko O. V., Ponomarenko S. H. Koryhuvannya hranychno-dopustymykh znachen' probnyvnoyi napruhy transformatornykh masel metodom minimal'nogo ryzyku [Correction of transformer oil breakdown voltage maximum permissible values by the minimum risk method]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2020, no. 1, pp. 106–115. doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.16.
26. Shutenko O., Ponomarenko S. Correction of the Maximum Permissible Values of the Oil Acidity by the Minimum Risk Method. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2021, pp. 310–315. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575854.
27. Shutenko O., Ponomarenko S. Using Statistical Decision Methods to Correct the Maximum Permissible Values of Transformer Oils Indicators. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021, pp. 471–476. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570041.
28. Godina R., Rodrigues E., Matias J., Catalão J. Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges. *Energies*. 2015, vol. 8, no. 10, pp. 12147–12186. doi: 10.3390/en8102147.
29. Muhamad N., Kamarden H. Review of Oil-Filled Transformer Monitoring Technology for New User. *Applied Mechanics and Materials*. 2016, vol. 818, pp. 63–68. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.818.63.
30. Shutenko O., Kulyk O., Ponomarenko S. Informational and Analytical System for Diagnostics of the Electric Power Equipment Condition. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 105–110. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160251.
31. Johnson N. L., Leone F. C. *Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1977, 618 p.
32. Shutenko O. V. Osobennosti dreyfa pokazateley kachestva transformatornogo masla v techenii dlitel'noy ekspluatatsii [Features of the drift of transformer oil quality indicators during long-term operation]. *Integrated technologies and energy saving*. 2006, no. 4, pp. 42–50.

33. Shutenko O. V. Formirovanie odnorodnykh massivov pokazately kachestva transformatornogo masla v usloviyakh apriornoy neopredelennosti rezul'tatov ispytaniy [Formation of homogeneous arrays of transformer oil quality indicators under a priori uncertainty of test results]. *Integrated technologies and energy saving*. 2006, no. 4, pp. 42–50.
34. Shutenko O. V. Kovariatsionnyy analiz modeley stareniya transformatornogo masla [Covariance Analysis of Transformer Oil Aging Models]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*. 2003, no 485, pp. 163–169.
35. Shutenko O., Zagaynova A., Serdyukova G. Analysis of Air-Tight High-Voltage Bushing Insulation Parameter Dynamics under Various Conditions during Long-term Operation. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019, pp. 321–326. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879896.
36. Shutenko O. V., Baklay D. N. *Planirovanie eksperimental'nykh issledovaniy v elektroenergetike. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh* [Planning experimental studies in the electrical power field. Methods of experimental data processing]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2013. 268 p.
37. Shutenko O., Ponomarenko S. Reliability Assessment of the Results of Periodic Monitoring of the Transformer Oils Condition. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey, 2020, pp. 77–82. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263141.
38. Shutenko O. V. Issledovanie vliyaniya zagruzki transformatora na sostoyanie masla v protsesse eksploatatsii [Investigation of the influence of transformer loading on oil condition during operation]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series. Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika*. 2004, no. 22, pp. 121–126.
39. Shutenko O. V. Issledovanie vliyaniya rezhimov raboty transformatorov na intensivnost' stareniya masla [Investigation of the influence of operating modes of transformers on the intensity of oil aging]. *Energetika ta elektrifikatsiya*. 2008, no. 8, pp. 54–59.
40. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of the Impact of Power Transformer Loading on the Transformer Oil Aging Intensity. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 76–81. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250159.
41. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of Distribution Laws of Transformer Oil Indicators in 110–330 kV Transformers. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021, no. 5, pp. 46–56. doi: 10.20998/2074-272X.2021.5.07.
42. Bur'yanov B. P. *Transformatornoe maslo* [Transformer oil]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1955. 190 p.
43. Chernozhukov N. I., Kreyn S. E. *Okislyaemost' mineral'nykh masel* [Oxidability of mineral oils]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1959. 370 p.
44. Manevich L. O. *Obrabotka transformatornogo masla* [Transformer oil treatment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 104 p.
45. Kassi K. S., Fofana I., Volat C., Farinas M. I. Impact of oils degradation on the cooling capacity of power Transformers. *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering*. Pilsen, Czech Republic, 2015.

Надійшла (received) 04.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пономаренко Сергій Григорович (Пonomarenko Сергей Григорьевич, Serhii Hryhorovych Ponomarenko) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-079X>; e-mail: PonomarenkSerhii@gmail.com.

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, А. Е. ПОТРИВАЙ, С. І. ДРИВЕЦЬКИЙ, С. Ю. БЛИК

ПОШУК ОПТИМАЛЬНОГО ЗАСОБУ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ІЗОЛЯТОРІВ

У статті проаналізовано програмні засоби моделювання електричного поля ізоляторів. Необхідність вирішення даного питання диктується тим, що неточність програм моделювання дозволяє стверджувати, що покращення імітаційної моделі не може бути виконане правильно через наявність похибок розрахунку в самій програмі. Розглянуто конструктивні особливості різних типів ізоляторів, в першу чергу найбільш розповсюджених та використовуваних – фарфорових та скляних. Описано зміну електричного поля в скляному та фарфоровому ізоляторі, що працюють в мережі змінного струму без забруднень. Проаналізовано чисельні методи розрахунку як-от метод граничних елементів, метод скінчених елементів, метод інтегральних рівнянь та інші. Виявлено, що з погляду функціональних можливостей та доцільності застосування для вирішення польових задач, актуальних для електроенергетики, найбільш універсальними є метод скінчених різниць та метод скінчених елементів. Наведено результати моделювання електричного поля ізоляторів в програмах Ansoft Maxwell, CST EM Studio та Elcut. Серед проаналізованих програм – Ansys, FEMLAB, Ansoft Maxwell, CST EM Studio, IES Coulomb та Elcut, відштовхуючись від твердження про те, що необхідно для вирішення поставленої задачі вирішити диференціальне рівняння, було обрано програми Ansoft Maxwell та CST EM, в яких реалізовано чисельний метод скінчених елементів. Виявлено, який з пакетів більше задовольняє поставленим вимогам по точності (шляхом розрахунку похибки відхилення математичного моделювання та експериментальних даних) та з точки зору методу, що закладено в алгоритмах програми. Проведено порівняння експериментальних даних з результатами імітаційного моделювання. Виявлена можливість діагностування ізоляторів по параметрам напруженості електричного поля.

Ключові слова: напруженість, імітаційне моделювання, програмне забезпечення, похибка, точність розрахунків, метод скінчених елементів.

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. А. ДАНИЛЬЧЕНКО, А. Э. ПОТРИВАЙ, С. И. ДРИВЕЦКИЙ, С. Ю. БЕЛИК

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ

В статье проанализированы программные средства моделирования электрического поля изоляторов. Необходимость решения данного вопроса диктуется тем, что неточность программ моделирования позволяет утверждать, что улучшение имитационной модели не может быть выполнено правильно из-за ошибок расчета в самой программе. Рассмотрены конструктивные особенности различных типов изоляторов, прежде всего, наиболее распространенных и используемых – фарфоровых и стеклянных. Описано изменение электрического поля в стеклянном и фарфоровом изоляторе, работающих в сети переменного тока без загрязнений. Проанализированы многочисленные методы расчета такие как метод граничных элементов, метод конечных элементов, метод интегральных уравнений и другие. Вывявлено, что с точки зрения функциональных возможностей и целесообразности применения для решения полевых задач, актуальных для электроэнергетики, наиболее универсальны метод конечных разниц и метод конечных элементов. Приведены результаты моделирования электрического поля изоляторов в программах Ansoft Maxwell, CST EM Studio и Elcut. Среди проанализированных программ – Ansys, FEMLAB, Ansoft Maxwell, CST EM Studio, IES Coulomb и Elcut, отталкиваясь от утверждения о том, что необходимо для решения поставленной задачи решить дифференциальное уравнение, были выбраны программы Ansoft Maxwell и CST EM, в которых реализован многочисленный метод конечных элементов. Вывявлен, какой из пакетов больше удовлетворяет поставленным требованиям по точности (путем расчета ошибки отклонения математического моделирования и экспериментальных данных) и с точки зрения метода, заложенного в алгоритмах программы. Произведено сравнение экспериментальных данных с результатами имитационного моделирования. Вывявлена возможность диагностики изоляторов по параметрам напряженности электрического поля.

Ключевые слова: напряженность, имитационное моделирование, программное обеспечение, ошибка, точность расчетов, метод конечных элементов.

S. YU. SHEVCHENKO, D. O. DANYLCHENKO, A. E. POTRYVAI, S. I. DRYVETSKYI, S. YU. BILYK

SEARCH FOR THE OPTIMAL MEANS FOR MODELING THE ELECTRIC FIELD OF INSULATORS

The article analyses software tools for simulation of electric field of insulators. The necessity of solving this problem is dictated by the fact that inaccuracy of simulation software allows stating that the simulation model cannot be improved correctly due to calculation errors in the program itself. Design features of different types of insulators, first of all, the most widespread and used - porcelain and glass insulators, are considered. The change of electric field in a glass and porcelain insulator operating in an AC network without contamination is described. Numerous calculation methods such as boundary element method, finite element method, integral equation method and others have been analysed. It is revealed, that from the point of view of functionality and expediency of application for solution of field problems relevant to electric power industry the finite difference method and finite element method are the most universal ones. The results of insulator electric field modelling using Ansoft Maxwell, CST EM Studio and Elcut software are given. Among Ansys, FEMLAB, Ansoft Maxwell, CST EM Studio, IES Coulomb and Elcut that were analyzed, the software Ansoft Maxwell and CST EM, where the finite element method is implemented, were chosen to solve the given problem. It was found out, which one of the software complies better with the given requirements as to accuracy (by calculation of error of deviation of mathematical modelling and experimental data) and in terms of the method incorporated in the algorithms of the software. Experimental data are compared with simulation results. The possibility of diagnosing insulators by electric field tension parameters has been revealed.

Keywords: tension, simulation, software, error, calculations accuracy, finite element method.

Вступ. Розвиток обчислювальної техніки виконувати у вимірювальних задачах. Сучасні прилади дозволив автоматизувати розрахунки, зокрема та інформаційно-вимірювальні системи широко

© С. Ю. Шевченко, Д. О. Данильченко, А. Е. Потривай, С. І. Дривецький, С. Ю. Білик, 2021

використовують програмовані обчислювальні засоби: вироблена ними обробка даних вже немислима у формі ручної праці. Виконувані у засобах вимірювань розрахунки ведуться зі значеннями, спотвореними похибкою, і внаслідок цього завжди завершуються одержанням неточного результату. Для забезпечення можливості прийняти обґрунтовані рішення на його основі важливо супроводити такий результат характеристиками його невизначеності, успадкованої від неточних вихідних даних.

Ця обставина грає суттєву участь у сучасних засобах, що виконують непрямі, сукупні чи спільні виміри, оскільки у них обов'язково, відповідно до затвердженої методики, проводиться обробка результатів прямих вимірювань.

Вище вказане не викликає жодних сумнівів, однак проблема потребує розгляду і з іншої сторони. Досить часто забувається той факт, що обчислювальна техніка та алгоритми, за якими вона працює, не є чимось абсолютним і також має похибку.

В умовах боротьби за соті долі відсотків ефективності така похибка може спричинити серйозні помилки в розрахунках, тому в даній роботі розглядається питання впливу подібних похибок у програмах та значимість їх впливу на результати імітаційного моделювання на прикладі роботи [1].

Мета статті. Метою роботи є визначення програмного пакету для моделювання, що при створенні імітаційної моделі дасть найбільш точний варіант на основі аналізу впливу на похибку використовуваних при створенні програм мов програмування та їх бібліотек.

Аналіз фарфорових та скляних ізоляторів. В сучасній енергетиці активно використовуються три типи ізоляторів: фарфорові, полімерні та скляні. Щодо полімерних ізоляторів, то, із досвіду експлуатаційного персоналу, такі ізолятори мають незручну експлуатацію та низьку надійність. Також, враховуючи той факт, що полімерні ізолятори найчастіше використовуються в лініях 35 кВ, це робить їх не цікавими для аналізу в даній роботі. Для проведення порівняльного аналізу електротехнічних властивостей скляних та фарфорових ізоляторів розглянемо основні технічні та технологічні параметри кожного з цих матеріалів. Тверді силікатні скла мають зазвичай відмінні електроізоляційні властивості і відносяться до типових діелектриків. За механізмом перенесення електричного струму в речовині розрізняють провідність іонну та електронну. Переважній більшості силікатного скла, як діелектрикам, властива іонна провідність. При аналізі електричних властивостей твердого скла необхідно враховувати (крім об'ємної) також і поверхневу електропровідність. Поверхнева провідність має переважне значення в інтервалі температур нижче 100–120 °С, коли на поверхні скла є гідратні плівки. Відносна діелектрична проникність характеризує здатність діелектрика знижувати напруженість електричного поля проти вакуумом. Тангенс кута діелектричних втрат визначає втрати енергії у вигляді тепла при службі діелектрика в

електромагнітному полі. Чим вище якість діелектрика, тим менше тангенс кута діелектричних втрат і питома провідність за інших рівних умов. З механічних властивостей скла розрізняють міцність на розрив, стиск, вигин і кручення. Питома міцність скла більшою мірою залежить від розмірів перерізу зразка (масштабний фактор) від стану поверхні та режиму термообробки (відпал, загартування). Головні з термічних властивостей скла – це термічне розширення, теплоємність, теплопровідність та термостійкість. Однією з чудових властивостей кращих силікатних видів скла є висока хімічна стійкість до різних агресивних середовищ.

Тепер кілька слів про кераміку (фарфор). Для виготовлення електротехнічних виробів застосовуються стеатитові, форстеритові та глиноземисті керамічні матеріали з низькими діелектричними втратами. Фарфорові ізолятори використовуються для ізоляції кріплень дротів на повітряних лініях електропередач (ЛЕП) також у розподільних пристроях електростанцій та підстанцій.

Головною вимогою при використанні високовольтних ізоляторів є частота постійного та змінного струму, яка не повинна перевищувати 100 Гц, а напруга електричного струму має бути від 1000 В та вище, а температурний діапазон роботи ізолятора – від –60 °С до +50 °С.

Класифікація скляних та керамічних ізоляторів проводиться за типом діелектрика, що використовується у виробництві. Кожен клас містить кілька підкласів:

- скляні – штирові та підвісні;
- керамічні – опорні та прохідні, штирові високовольтні та низьковольтні.

Скляні підвісні ізолятори використовуються на повітряних ЛЕП та розподільних пристроях при частоті струму не більше 100 Гц та напрузі не вище 1000 В.

Скляні штирові ізолятори, на відміну від попередніх, використовуються при напрузі 10 кВ та частоті струму 100 Гц. Ці ізолятори використовуються у суворох кліматичних умовах, що розташовані на висоті до 1000 м над рівнем моря.

При виборі марки штирових ізоляторів для повітряних ЛЕП 10 кВ треба враховувати сукупність цінових, експлуатаційних та електротехнічних властивостей діелектриків, що застосовуються. Основні дані представлені у табл. 1.

Однак в експлуатації скляні ізолятори мають низьку незаперечних переваг, як-от:

1. Гарантована відсутність прихованих дефектів усередині ізоляційного тіла, що унеможливає виникнення струмів витоку.

2. Спеціальний контроль на величину кута поляризації світла, що проходить, дозволяє гарантувати відсутність внутрішніх напруг і стабільні по всьому об'єму ізолятора електроізоляційні властивості, що недосяжно в керамічних ізоляторах.

3. Міцність на скручування скляних ізоляторів у кілька разів перевищує міцність фарфорових.

Таблиця 1 – Основні характеристики ізоляторів

Характеристика	Скло	Фарфор
Діелектрична проникність	7,2	7,0
Питомий об'ємний опір, Ом/м	10^{14}	10^{11}
Питомий поверхневий опір, Ом	10^{14}	10^9
Тангенс кута діелектричних втрат (при 20 °С)	0,027	0,02
Теплопровідність, Вт/(м·°С)	0,92	1,0–1,2
Теплоємність, кДж/(кг·°С)	0,84	1,2–1,5
Електрична міцність, кВ/мм	48	25–30
Густина, г/см ³	2,47	2,3–2,5
Межа міцності при розтягуванні, кгс/см ²	823	—
Межа міцності при стисканні, кгс/см ²	9730	9000

4. Скляні ізолятори не схильні до старіння, оскільки в тілі ізолятора не з'являються з часом мікротріщини.

5. Прозорість скляних ізоляторів дозволяє легкий візуальний контроль його цілісності. При виході з ладу ізолятора полумку можна швидко ідентифікувати, не вдаючись до тривалих відключень ліній та заощаджуючи на технічному обслуговуванні. У важкодоступних місцях повітряних ЛЕП контроль за цілісністю скляних ізоляторів може бути здійснений з використанням як безпілотних літальних апаратів, так і вертольота.

6. Автоматизоване виробництво скляних ізоляторів унеможливує помилки в роботі персоналу.

7. Найменша вага скляних ізоляторів та більша їх кількість у стандартній упаковці дозволяють заощаджувати 20 % вартості транспортування.

Таким чином очевидно є перевага скляного ізолятора перед фарфоровим, однак для підтвердження даного твердження необхідним є аналіз розподілу електричного поля, що сучасна наука активно досліджує.

Моделювання електричного поля скляного ізолятора. Оскільки, враховуючи недоліки полімерних ізоляторів, в сучасній енергетиці надається перевага скляним ізоляторам через їх переваги, розглянемо моделювання на прикладі скляного ізолятора, що описано в [2]. Моделювання проводилося в програмних пакетах Ansoft Maxwell та CST. В результаті моделювання було отримано картини розподілу напруженості в ізоляторі, що наведені на рис. 1 та 2 [2].

Оцінюючи результати моделювання та порівнюючи їх з експериментальними, було вирішено визначити наявність машинної похибки в результатах моделювання.

Постановка проблеми. Сучасний рівень обчислювальної техніки та її можливості при створенні імітаційних моделей, безумовно, внесли величезний внесок у розвиток сучасної науки, однак, головною проблемою подібних систем було і залишається те, що використання певних програм не гарантує отримання точних даних, що обумовлено особливостями реалізації обчислювальних функцій в них [3, 4].

Так при аналізі роботи [3] було виявлено, що використання програми MATLAB може поставити під

сумнів точність отриманих при моделюванні результатів.

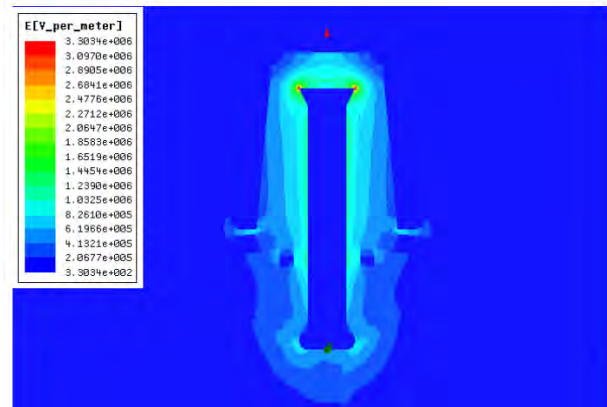


Рисунок 1 – Розподіл напруженості електричного поля ізолятора ПС 120Б в Ansoft Maxwell

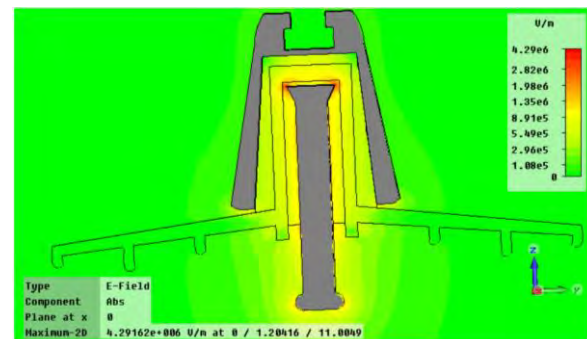


Рисунок 2 – Розподіл напруженості електричного поля ізолятора ПС 120Б в CST

Тому для пошуку оптимального методу моделювання було прийнято рішення проаналізувати декілька існуючих програмних пакетів та визначити найбільш точний.

Аналіз існуючих програмних пакетів. ANSYS Multiphysics – найбільш повна комплектація розрахункового комплексу ANSYS, що включає всі існуючі фізичні дисципліни: розрахунок напружено-деформованого стану конструкції, теплообмін, гідрогазодинаміку, електромагнетизм і т.д. Комплекс містить спеціальні багатодисциплінарні елементи, які дозволяють вирішувати пов'язані завдання.

Одним з елементів, що входять до ANSYS Multiphysics, є ANSYS Emag. Цей програмний пакет орієнтований на вирішення задач низькочастотних електромагнітних додатків, електродвигунів, реле та соленоїдів. Забезпечує всебічний аналіз різноманітних електромагнітних явищ на всіх етапах проектування.

Основні недоліки: висока вартість, складність у освоєнні. Але ці сторони компенсуються наявністю навчальних матеріалів російською, широкими можливостями використання, і навіть більшою точністю розрахунків.

Програмний пакет COMSOL Multiphysics дозволяє моделювати практично всі фізичні процеси, що описуються приватними диференціальними рівняннями. Програма містить різні вирішувачі, які

допоможуть впоратися навіть із найскладнішими завданнями, а проста структура програми забезпечує простоту та гнучкість використання. Програмний пакет COMSOL Multiphysics має майже такі ж можливості, як і пакет ANSYS, крім цього, по суті, є інструментом пакету MATLAB і працює під його керуванням, тобто всі можливості програмування, доступні в MATLAB, можуть бути використані і в COMSOL Multiphysics, наприклад, при обробці результатів розрахунку. COMSOL Multiphysics забезпечує можливість експорту кінцево-елементної моделі до Simulink пакету MATLAB. Це дозволяє моделювати роботу об'єкта управління разом із перетворювачами електричної енергії, системами управління; досліджувати частотні характеристики та стійкість електротехнічного комплексу. Але практично труднощі освоєння інтерфейсу програми, накладаючись на помилки створення моделей, роблять процес розрахунку недостатньо ефективним. Основні недоліки: висока вартість, відсутність літератури російською мовою, важкий у освоєнні.

Maxwell – спеціалізований програмний комплекс для моделювання електромагнітних полів. Ключові можливості: моделювання низькочастотних двовимірних та тривимірних електромагнітних полів методом кінцевих елементів; перехідний нелінійний аналіз (під час руху (обертання, поступальний рух, обертання по довільній траєкторії) компонентів; стикування із зовнішньою електричною схемою; аналіз розмагнічування постійного магніту; обчислення магнітних втрат); гармонічний електромагнітний аналіз; аналіз вихрових струмів з урахуванням скін-ефекту.

Комбінація Maxwell із програмним комплексом Simplerer дозволяє розраховувати потужні високорівневі електромеханічні системи. Подібні технології дозволяють виконати комплексний розрахунок систем, що складаються з цифрових та аналогових ланцюгів, датчиків, електромагнітних пристроїв, механічних, гідравлічних та інших типів навантажень, і зрештою створювати найбільш повну електромеханічну модель кінцевого продукту.

Також Maxwell дозволяє передавати дані в модуль ePhysics для виконання теплового та міцнісного аналізів. Основні вади: висока вартість.

Причини існування похибки при моделюванні електронно-обчислювальною технікою. Одним з основних джерел обчислювальних похибок є наближене уявлення чисел у комп'ютері, обумовлене кінцівкою розрядної сітки (вказується у Міжнародному стандарті уявлення чисел з плаваючою точкою в електронно-обчислювальних машинах). Число a , що не може бути представлене кінцевим числом в обчислювальній системі, піддається округленню, тобто замінюється близьким числом \tilde{a} що у комп'ютері точно. Знайдемо межу відносної похибки уявлення числа з точкою, що плаває. Припустимо, що застосовується найпростіше заокруглення – відкидання всіх розрядів числа, що виходять за межі розрядної сітки. Система числення – двійкова. Нехай треба

записати число, що представляє нескінченний двійковий дріб:

$$\alpha = \pm 2^p \left(\frac{\alpha_1}{2} + \frac{\alpha_1}{2^2} + \dots + \frac{\alpha_i}{2^i} + \frac{\alpha_{i+1}}{2^{i+1}} + \dots \right),$$

де $\alpha_j = \{0, 1\}$, ($j = 1, 2, \dots$) – цифри мантиси.

Нехай під запис мантиси відводиться t двійкових розрядів. Відкидаючи зайві розряди, отримаємо округлене число:

$$\tilde{\alpha} = \pm 2^p \left(\frac{\alpha_1}{2} + \frac{\alpha_1}{2^2} + \dots + \frac{\alpha_i}{2^i} \right).$$

Абсолютна похибка округлення у цьому випадку дорівнює

$$\alpha - \tilde{\alpha} = \pm 2^p \left(\frac{\alpha_{i+1}}{2^{i+1}} + \frac{\alpha_{i+2}}{2^{i+2}} + \dots \right).$$

Найбільша похибка буде у випадку $a_{i+1} = 1$, $a_{i+2} = 1$, тоді

$$|\alpha - \tilde{\alpha}| \leq \pm 2^p \frac{1}{2^{i+1}} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots \right) = 2^{p-t},$$

Т. я. $M \geq 0,5$ де M – мантиса числа a , то завжди $a = 1$. Тоді $|\alpha| \geq 2^p \cdot 2^{-1} = 2^{p-1}$ та відносна похибка дорівнює

$$\frac{|\alpha - \tilde{\alpha}|}{|\alpha|} \leq 2^{-t}.$$

Практично застосовують більш точні методи округлення та похибка уявлення чисел дорівнює

$$\frac{|\alpha - \tilde{\alpha}|}{|\alpha|} \leq 2^{-t+1}$$

тобто точність уявлення чисел визначається розрядністю мантиси t .

Тоді приблизно представлене в комп'ютері число можна записати у вигляді

$$\tilde{\alpha} = a(1 \pm \varepsilon),$$

де $|\varepsilon| \leq 2^{-t}$ – «машинний епсилон» – відносна похибка представлення чисел.

Про метод скінчених елементів (МСЕ), причини похибок методу, засоби їх усунення. Основна ідея МСЕ полягає в тому, що будь-яку безперервну величину (наприклад, температуру, тиск, переміщення) можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на безлічі кусково-безперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей (елементів); кусково-безперервні функції визначаються за допомогою значень безперервної величини в кінцевому числі точок аналізованої області.

З погляду обчислювальної математики, ідея МСЕ полягає у тому, що мінімізація функціоналу варіаційного завдання складає сукупності функцій, кожне з яких визначено у своїй підобласті, що ідеально підходить для вирішення поставленої задачі для

моделювання, оскільки в її основі лежить диференціальне рівняння.

Головною перевагою методу є можливість розбиття на кінцеві елементи області будь-якої форми і, таким чином, можливість розрахунку полів напруг та деформацій у реальних деталях з урахуванням усіх їх конструктивних особливостей.

Кожному розбиття відповідає свій набір базисних функцій та, відповідно, своє рішення (свої поля переміщень, деформацій та напруг).

До основних недоліків можна віднести:

- залежність результатів розрахунку від виконуваного користувачем;
- вибору (побудови) сітки МСЕ;
- труднощі оцінки точності одержуваних результатів.

Похибки МСЕ пов'язані з:

- помилками дискретизації, що є результатом геометричних відмінностей межі аналізованої області (деталі) та її МСЕ-моделі;
- помилками базисної функції, зумовленими різницею між точним рішенням та його поданням у вигляді комбінації базисних функцій заданого виду;
- помилки округлення, пов'язані з кінцевою довжиною розрядної сітки комп'ютера та великою кількістю операцій, що виконуються при вирішенні задачі методом кінцевих елементів.

Помилки дискретизації зменшуються зі зменшенням розміру МСЕ, а помилки базової функції та помилки округлення – ні (принаймні, не обов'язково). Проте загальний (універсальний та теоретично обґрунтований) метод оцінки похибки МСЕ на сьогодні відсутній, а точне рішення реальні завдання зазвичай невідомо. Тому найчастіше для оцінки похибки використовується наступний прийом: виконується кілька розрахунків при різних розбиття області на МСЕ, за результатами цих розрахунків будується залежність розрахованих напруг (переміщень, деформацій) від розміру елемента, потім виконується екстраполяція на випадок розміру елемента, що прагне нуля.

Зменшення розміру МСЕ напряму залежить від доступної десяткової розмірності, оскільки зі збільшенням десяткової розмірності ми можемо розбивати ціле на більшу кількість елементів.

Отже вирішення проблеми існування похибки в методі МСЕ полягає у вирішенні проблем округлення, що в свою чергу залежать від розмірної сітки та формату збереження даних.

За відсутності помилок округлення така послідовність рішень сходиться до точного рішення, якщо:

- базисні функції такі, що при переході через кордон елементів залишаються безперервними сама функція та її похідні аж до порядку $p-1$ включно, де p – найвищий порядок похідних, що містяться у функціоналі
- базисні функції є повними – наприклад, якщо базисні функції є поліномами ступеня r , вони містять всі ступеня змінної від 0 до r включно;

- розміри сітки зменшуються таким чином, щоб елементи кожного наступного рівня являли собою частини відповідних елементів попереднього рівня.

МСЕ (в розглянутій постановці) підбирає поле переміщень так, щоб мінімізувати певний функціонал, має енергетичний сенс. Тому точність визначення пружною енергії, запасеної в конструкції при заданих навантаженнях, виявляється вище, ніж точність визначення переміщень. Точність визначення напруг виявляється нижче, ніж точність визначення переміщень (і, тим більше, пружної енергії), оскільки напруги визначаються деформаціям, одержуваним диференціюванням переміщень, та помилки чисельного диференціювання можуть відігравати помітну роль.

Часто розмірність залежить від обраних за основу для написання мов та їх бібліотек.

Стосовно стандартних бібліотек `glibc` для C та `libstdc++` для C++ та бібліотеки `quadmath` для 128-бітних чисел, в них закладена реалізація компанії Sunmicrosystem 1993 року (за методикою, описаною в [5, 6]). В інших варіантах використовується метод раціональної апроксимації виразу. В `fortana` та інших використовується пряма апроксимація, описана в [6].

Для визначення впливу похибки апроксимації, було прийнято рішення вивести рівняння, що буде описувати вплив похибки на результати розрахунку. На основі твердження про те, що зі зростанням кількості виконуваних операцій для отримання результатів, сумарна кількість похибок збільшується модель було вирішено будувати виходячи з роботи [6], де функція похибки має наступний вигляд:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (1)$$

Однак, оскільки похибка не є функцією залежною від часу, а її значення залежить лише від кількості послідовно виконаних математичних операцій, наведену вище формулу було модифіковано до вигляду [7]:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x} dx,$$

де x – кількість послідовно виконуваних математичних операцій в імітаційній моделі.

Отримані значення похибки розрахунків за формулою (1) наведено на рисунках 3–6 для різних бібліотек.

На рис. 3 графік для даних з точністю, збільшеною в 4 рази (Quadruple double, `quadmath`), абсолютна похибка не перевищує 10^{-34} , що відповідає 34-й розрядності.

Даним розширеної точності (десятковий розряд >34) відповідають графіки на рис. 4 і 5. За їх результатами похибка складає 10^{-16} , що відповідає 16-й розрядності.

Найгірший результат було отримано при двійковій точності (double, рис. 6).

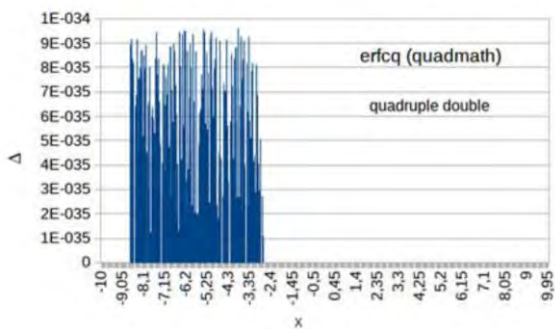


Рисунок 3. Похибка розрахунку функції для даних з точністю збільшеною в 4 рази

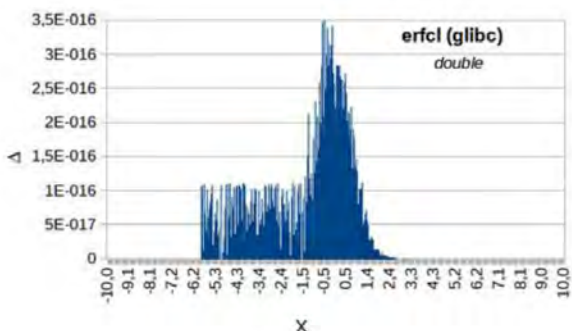


Рисунок 4. Похибка розрахунку функції для даних розширеної точності glibc

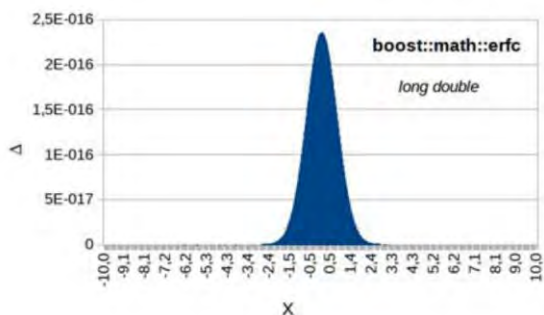


Рисунок 5. Похибка розрахунку функції для даних розширеної точності boost::math

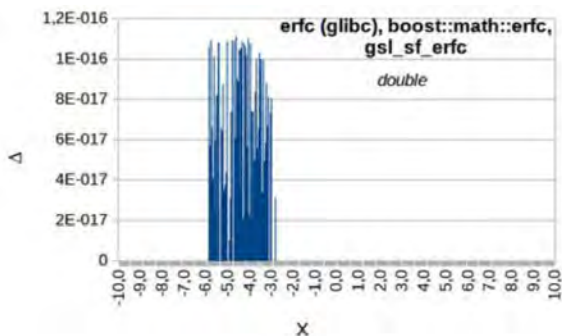


Рисунок 6. Похибка розрахунку функції для даних двійкової точності

Специфіка реалізації розрахунків над даними з плаваючою точкою, обумовлена апаратною

реалізацією модулів FPU та SSE, може проявлятися в тому випадку, коли проводиться компіляція програм з параметрами компілятора, заданими за замовчанням [8, 9].

Серед проаналізованих раніше програм, жодна з них не використовує бібліотеки розширеної точності (glibc, ttmath та інші), а значення відносної похибки чисел з плаваючою комою для чисел подвійної точності – так званий «машинний епсілон» [10, 11], складає для них $\sim 2.2204 \cdot 10^{-16}$.

Висновки. Характерна для сучасних цифрових обчислювальних систем обмеження розмірної сітки, що використовується для представлення даних в пам'яті, обумовлює додаткову похибку результатів імітаційного моделювання, котра може виявитися істотною та сумісною з ввідними даними.

В розглянутих програмних пакетах не було визначено великої різниці в точності розрахунків, тому для моделювання (в даному випадку ізоляторів) рекомендується використовувати програми, які своїми додатковими функціями задовольняють необхідності при створенні моделей.

Для нашого випадку, найбільш оптимальним є використання програми COMSOL оскільки його сумісність з MATLAB дозволяє урахувати більше електроенергетичних одиниць, що впливають на модельований елемент.

Одні й ті ж помилки в розрахунках, обумовлені форматом зберігання даних, характерні й для програм, що реалізують алгоритми рішення спеціальних задач.

Реалізація одних і тих же математичних функцій, особливо спеціальних, залежать від бібліотек мов програмування та можуть ґрунтуватися на різноманітних моделях. Додаткова похибка результатів імітаційного моделювання розрізняється як для розповсюджених бібліотек C та C++, так і для одних і тих же бібліотек C та C++ при їх використанні на різноманітних архітектурах та операційних системах.

Для зменшення додаткової похибки результатів імітаційного моделювання слід збільшувати розрядну сітку та використовувати відповідні бібліотеки. При цьому не треба орієнтуватися на рішення, що залежать від платформи, як-от формат розширеної точності.

Використання бібліотек обчислювань із довільною точністю може призвести до суттєвого падіння швидкості розрахунків.

Для компіляторів gcc та g++ можна рекомендувати використання бібліотек quadmath та boost, котрі забезпечать найменшу додаткову похибку обчислювань.

Список літератури

1. Shevchenko S., Dovgalyuk O., Danylchenko D., Rubanenko O., Fedorchuk S., Potryvai A. Accounting For The Effect Of PV Panel Dustiness On System Performance With Correction For Panel Cleaning For Matlab Simulink. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021. P. 373–378. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575747.
2. Шевченко С. Ю., Окунь А. А. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора в ВЛ 110 кВ. Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетика: надёжность и энергоэффективность. 2011. № 3. С. 136–143.

3. Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S., Potryvai A. Modernization of a Simulation Model of a Photovoltaic Module, by Accounting for the Effect of Snowing of Photovoltaic Panels on System Performance with Correction for Panel Cleaning for Matlab Simulink. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 670–675. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570030.
4. *IEEE Std 754-2019. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 84 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8766229.
5. Krämer W. Multiple/arbitrary precision interval computations in C-XSC. *Computing*. 2012. Vol. 94, iss. 2–4. P. 229–241. doi: 10.1007/s00607-011-0174-8.
6. Hart J. F. et al. *Computer Approximations*. New York, John Wiley & Sons, 1968. 354 p.
7. Cody W. J. Rational Chebyshev approximations for the error function. *Mathematics of Computation*. 1969. Vol. 23, no. 107. P. 631–637.
8. Sarajlić M., Pihler J., Sarajlić N., Kitak P. Electric field of a medium voltage indoor post insulator. *Electric Field*. 2017. P. 145–159.
9. Rabah D., Abdelghani C., Abdelchafik H. Efficiency of some optimisation approaches with the charge simulation method for calculating the electric field under extra high voltage power lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. Vol. 11, no. 17. P. 4167–4174. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1297.
10. Shen Z., Wang X., Xin Z., Zhang T., Xu C., Jia Z. Analytical model for the spatiotemporal permittivity of uncured-composite devices in an AC electric field. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021. Vol. 54, no. 15. P. 155302. doi: 10.1088/1361-6463/abd9a7.
11. Abd Elrahman M. Adapting particle swarm optimisation for charge simulation method. *IET Science, Measurement & Technology*. 2011. Vol. 5, no. 3. P. 96–101. doi: 10.1049/iet-smt.2010.0109.
2. Shevchenko S. Yu., Okun' A. A. Modelirovanie elektricheskogo polya steklyannogo izolatora v VL 110 kV [Modelling the electric field of a glass insulator in a 110 kV overhead line]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2011, no 3, pp. 136–143.
3. Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S., Potryvai A. Modernization of a Simulation Model of a Photovoltaic Module, by Accounting for the Effect of Snowing of Photovoltaic Panels on System Performance with Correction for Panel Cleaning for Matlab Simulink. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021, pp. 670–675. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570030.
4. *IEEE Std 754-2019. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 84 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8766229.
5. Krämer W. Multiple/arbitrary precision interval computations in C-XSC. *Computing*. 2012, vol. 94, iss. 2–4, pp. 229–241. doi: 10.1007/s00607-011-0174-8.
6. Hart J. F. et al. *Computer Approximations*. New York, John Wiley & Sons, 1968. 354 p.
7. Cody W. J. Rational Chebyshev approximations for the error function. *Mathematics of Computation*. 1969, vol. 23, no. 107, pp. 631–637.
8. Sarajlić M., Pihler J., Sarajlić N., Kitak P. Electric field of a medium voltage indoor post insulator. *Electric Field*. 2017, pp. 145–159.
9. Rabah D., Abdelghani C., Abdelchafik H. Efficiency of some optimisation approaches with the charge simulation method for calculating the electric field under extra high voltage power lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017, vol. 11, no. 17, pp. 4167–4174. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1297.
10. Shen Z., Wang X., Xin Z., Zhang T., Xu C., Jia Z. Analytical model for the spatiotemporal permittivity of uncured-composite devices in an AC electric field. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021, vol. 54, no. 15, pp. 155302. doi: 10.1088/1361-6463/abd9a7.
11. Abd Elrahman M. Adapting particle swarm optimisation for charge simulation method. *IET Science, Measurement & Technology*. 2011, vol. 5, no. 3, pp. 96–101. doi: 10.1049/iet-smt.2010.0109.

References (transliterated)

1. Shevchenko S., Dovgalyuk O., Danylchenko D., Rubanenko O., Fedorchuk S., Potryvai A. Accounting For The Effect Of PV Panel Dustiness On System Performance With Correction For Panel Cleaning For Matlab Simulink. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2021, pp. 373–378. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575747.

Надійшла (received) 08.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Сергій Юрійович (Шевченко Сергей Юрьевич, Serhiy Yuriyovych Shevchenko) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: Sergii.Shevchenko@khpi.edu.ua.

Данильченко Дмитро Олексійович (Данильченко Дмитрий Алексеевич, Dmytro Oleksiyovych Danylchenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua.

Потривай Андрій Едуардович (Потривай Андрей Эдуардович, Andriy Eduardovych Potryvay) – магістрант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1250-7525>; e-mail: potryvay.andrew99@gmail.com.

Дривецький Станіслав Ігоревич (Дривецкий Станислав Игоревич, Stanislav Ihorovych Dryvetsky) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8181-8829>; e-mail: stanislav.dryvetskyi@khpi.edu.ua.

Білик Сергій Юрійович (Белик Сергей Юрьевич, Serhiy Yuriyovych Bilyk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8813-5652>; e-mail: Serhii.Bilyk@khpi.edu.ua.

Д. С. ШКОДА, М. В. КІРІЧЕНКО, Р. В. ЗАЙЦЕВ, К. О. МІНАКОВА, С. Ю. БЛИК

РОЗРОБКА НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСІВ

Останнім часом при розробці накопичувачів енергії багато уваги приділяється електромагнітній стабільності, що надає можливість підтримувати робочі параметри під час впливу електромагнітних імпульсів та наслідків від їх взаємодії. Питання забезпечення електромагнітної стабільності радіоелектронного обладнання, пов'язане з тим, що під впливом електромагнітних імпульсів в електронних та електричних схемах виникають імпульси перенапруги, в залежності від характеру походження електромагнітних імпульсів, відстані від джерела електромагнітних імпульсів до компонентів апаратного комплексу значення амплітуди, час наростання і тривалість імпульсів можуть змінюватися. Саме тому для сучасних досліджень залишається надзвичайно актуальним завдання створення високоенергетичних генераторів електромагнітних імпульсів. Основним напрямком використання таких генераторів є вивчення взаємодії тонкоплівкових шарів напівпровідникових матеріалів з високоенергетичними електромагнітними імпульсами та розробка елементів захисту радіоелектронного обладнання від впливу електромагнітних імпульсів. Створено набір генераторів електромагнітних імпульсів, застосування яких дозволить вивчити властивості елементів захисту радіоелектронного обладнання в широкому діапазоні потужностей електромагнітних імпульсів. У комплексі з раніше розробленою конструкцією генератора електромагнітних імпульсів це дозволить впливати на досліджувані зразки радіоелектронного обладнання та елементів захисту шляхом комплексної дії електромагнітних імпульсів, які матимуть як високий час, так і велику енергію. Для забезпечення комфортної та безпечної дослідницької роботи пристрій має візуальну індикацію режимів роботи, зокрема режимів генерації високої постійної напруги. Розроблений пристрій керування та джерела живлення для високоенергетичного генератора електромагнітних імпульсів відповідає вимогам, встановленим під час його розробки, і може бути застосований для вивчення особливостей взаємодії напівпровідникових тонкоплівкових шарів з високоенергетичними електромагнітними імпульсами.

Ключові слова: лінія зарядки, енергія, генератор, мікроконтролер.

Д. С. ШКОДА, М. В. КИРИЧЕНКО, Р. В. ЗАЙЦЕВ, К. А. МИНАКОВА, С. Ю. БЕЛИК

РАЗРАБОТКА НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ

В последнее время при разработке накопителей энергии много внимания уделяется электромагнитной стабильности, что позволяет поддерживать рабочие параметры при воздействии электромагнитных импульсов и последствий от их взаимодействия. Вопрос обеспечения электромагнитной стабильности радиоэлектронного оборудования, связанный с тем, что под влиянием электромагнитных импульсов в электронных и электрических схемах возникают импульсы перенапряжения, в зависимости от характера происхождения электромагнитных импульсов, расстояния от источника электромагнитных импульсов до компонентов аппаратного комплекса, значение амплитуды, время нарастания и длительность импульсов могут изменяться. Именно поэтому для современных исследований остается очень актуальной задача создания высокоэнергетических генераторов электромагнитных импульсов. Основным направлением использования генераторов является изучение взаимодействия тонкопленочных слоев полупроводниковых материалов с высокоэнергетическими электромагнитными импульсами и разработка элементов защиты радиоэлектронного оборудования от воздействия электромагнитных импульсов. Создан набор генераторов электромагнитных импульсов, применение которых позволит изучить свойства элементов защиты радиоэлектронного оборудования в широком диапазоне мощностей электромагнитных импульсов. В комплексе с ранее разработанной конструкцией генератора электромагнитных импульсов это позволит влиять на исследуемые образцы радиоэлектронного оборудования и элементов защиты путем комплексного действия электромагнитных импульсов, которые будут иметь как высокое время, так и большую энергию. Для обеспечения комфортной и безопасной работы устройство имеет визуальную индикацию режимов работы, в частности, режимов генерации высокого постоянного напряжения. Разработанное устройство управления и источники питания для высокоэнергетического генератора электромагнитных импульсов соответствуют требованиям, поставленным при их разработке, и могут быть применены для изучения особенностей взаимодействия полупроводниковых тонкопленочных слоев с высокоэнергетическими электромагнитными импульсами.

Ключевые слова: линия зарядки, энергия, генератор, микроконтроллер.

D. S. SHKODA, M. V. KIRICHENKO, R. V. ZAITSEV, K. A. MINAKOVA, S. YU. BILYK

DEVELOPMENT OF ENERGY STORAGE FOR HIGH VOLTAGE ELECTROMAGNETIC PULSE GENERATOR

Recently, much attention has been paid to electromagnetic stability in the development of energy storage devices, which makes it possible to maintain operating parameters during exposure to electromagnetic pulses and the consequences of their interaction. The issue of ensuring the electromagnetic stability of electronic equipment, due to the fact that under the influence of electromagnetic pulses in electronic and electrical circuits are overvoltage pulses, depending on the origin of electromagnetic pulses, distance from electromagnetic pulses source to hardware components amplitude, rise time and pulse duration can change. That is why the task of creating high-energy electromagnetic pulse generators remains extremely important for modern research. The main use of such generators is to study the interaction of thin-film layers of semiconductor materials with high-energy electromagnetic pulses and the development of elements to protect electronic equipment from the effects of electromagnetic pulses. A set of electromagnetic pulses generators has been created, the use of which will allow studying the properties of the protection elements of electronic equipment in a wide range of electromagnetic pulses capacities. In combination with the previously developed design of the electromagnetic pulses generator, this will affect the studied samples of electronic equipment and protection elements through the integrated operation of the electromagnetic pulses, which will have both high time and high energy. To ensure comfortable and safe research work, the device has a visual indication of operating modes, including modes of high DC voltage generation. The developed control device and power supply for the high-energy electromagnetic pulse generator meets the requirements established during its development and can be used to study the interaction of semiconductor thin-film layers with high-energy electromagnetic pulses.

Keywords: charging line, energy, generator, microcontroller.

© Д. С. Шкода, М. В. Кіріченко, Р. В. Зайцев, К. О. Мінакова, С. Ю. Білик 2021

Вступ. Однією з головних вимог до сучасного радіоелектронного обладнання (РЕО) є висока надійність його функціонування під впливом зовнішніх факторів. В останні роки все більше уваги приділяється електромагнітній стабільності, що означає здатність підтримувати робочі параметри під час і після дії електромагнітних імпульсів (ЕМІ) різного походження [1]. Проблема забезпечення електромагнітної стабільності РЕО пов'язана з тим, що під впливом ЕМІ в електронних та електричних схемах виникають імпульси перенапруги, значення амплітуди U_{imp} , час наростання і тривалість яких можуть змінюватися в широких межах внаслідок характеру походження ЕМІ, відстані від джерела ЕМІ до компонентів апаратного комплексу (антени, лінії зв'язку), а також інших факторів [2]. Для нещодавно розроблених матеріалів з мікро- або наноструктурою та методів їх осадження [3–6] взаємодія з ЕМІ може дозволити досягти багатообіцяючих практичних результатів. Імпульсні перенапруги, спричинені ЕМІ, можуть призвести до серйозного руйнуючого впливу на елементи обладнання (особливо вхідних пристроїв) внаслідок порушення гальванічного зв'язку через плавлення провідників; струми скрізь ділянки підвищеної провідності, катастрофічне збільшення струму витoku конденсаторів та польових діодів із ізольованим затвором під час пробою діелектричного шару. Напівпровідникові прилади особливо чутливі до впливу пошкоджень, спричинених дією ЕМІ. Це пов'язано як з властивостями р-n-переходу, так і з питомою теплопровідністю напівпровідникових матеріалів. Коли напруга зворотного зміщення переходу є достатньою для початку лавинного пробою, у переході може виділятися велика кількість теплової енергії [7, 8]. Тому в локальних районах лавинного пробою внаслідок поступового накопичення тепла температура може досягати значень, що відповідають температурі плавлення напівпровідникового матеріалу, що спричиняє шунтування р-n-переходу. Зі зменшенням розмірів конструкцій напівпровідникових приладів рівень енергії імпульса, достатньої для їх пошкодження зменшується і для інтегральних схем становить від 10^{-3} Дж до 10^{-7} Дж. Для обчислювальних пристроїв, що працюють в реальному часі, навіть короточасні збої внаслідок впливу ЕМІ призводять до повної втрати обчислювальної ефективності.

Розробка схеми приладу. Принципи генерації імпульсних сигналів. Синусоїдальні сигнали характеризуються плавністю. Залежність їх від часу не містить різких стрибків, сигнали легко диференціюються, а їх похідна в будь-якій точці кінцева. Більше того, вони мають безперервними всі похідні, і всі вони мають вигляд гармонічних коливань. Завдяки безперервності та стаціонарності синусоїдальні сигнали, поряд з постійними напругами та струмами, добре підходять для тривалої передачі енергії крізь кабелі або в просторі (у вигляді електромагнітних хвиль).

Однак часто є потреба у передачі великої кількості енергії, що виділяється за короткий час. Яскравим *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика*

прикладом тут є радар. У цьому випадку в простір надходить короткий і потужний імпульс електромагнітного випромінювання, який відбивається від цілі і сприймається радіолокаційним приймачем. Ця затримка відбитого сигналу дозволяє оцінити відстань до цілі, а детальний аналіз відбитого імпульсу часто дозволяє судити про природу цілі. Імпульсні сигнали потрібні в ряді інших застосувань, таких як запуск потужних лазерних діодів, побудова ультразвукових та відеоімпульсних локаторів, запуск ядерних та термоядерних процесів і навіть тестування багатьох електронних пристроїв з використанням імпульсних сигналів або окремих їх властивостей [13–16].

Найпоширенішими є прямокутні імпульси, зокрема симетричні – меандр. Широко використовуються пилкоподібні та трикутні імпульси. Вони використовуються в скануючих генераторах аналогових осцилографів та у функціональних генераторах.

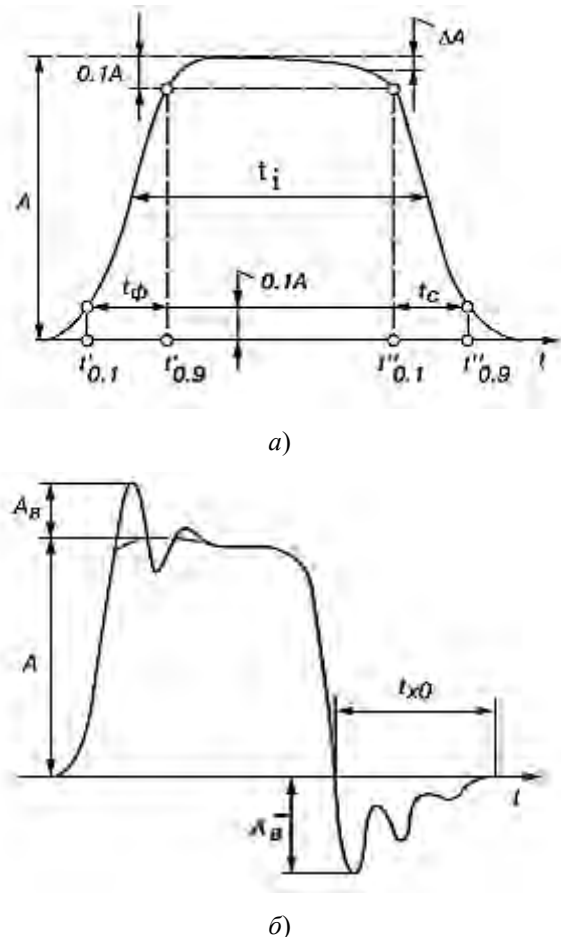


Рисунок 1 – Реальна форма імпульсу без коротких викидів (а) та з такими викидами (б)

Генератори вимірювальних імпульсів повинні виробляти імпульси, максимально наближені до імпульсів ідеальної форми. Однак справжні імпульси, навіть схожі на прямокутні, відрізняються від ідеальних. Так, перепади нескінченно малої тривалості практично не реалізовані, так що фронти реальних прямокутних імпульсів завжди мають кінцеву

тривалість. На рис. 1 а наведено форму реального імпульсу та позначено його основні параметри. Таку форму набувають навіть близькі до ідеальних прямокутні імпульси після проходження через підсилювачі і паразитні електричні ланцюги.

Для реального імпульсу використовуються такі технічні параметри:

- Амплітуда імпульсу A або його висота (за винятком можливих короткочасних викидів).
- Тривалість активного імпульсу, виміряна при $0,5 A$.
- Час наростання імпульсу або тривалість переднього краю, виміряні на рівнях від $0,1$ до $0,9 A$.
- Час спаду або тривалість задньої кромки, виміряні від $0,9$ до $0,1 A$.
- Час затримки – час від нуля до часу, коли рівень сигналу досягає $0,1 A$.
- Рівень спадання вершини ΔA – це відносний рівень спадання майже горизонтальної вершини імпульсу.

Остаточна тривалість фронтів імпульсів обумовлена інерцією активних пристроїв, на яких побудовані генератори імпульсів, та обмеженням смуги частот, посиленою ними зверху. Зменшення вершини відбувається внаслідок розділення RC-ланцюгів та зменшення коефіцієнта підсилення каскадів посилення (при використанні підсилювачів змінного струму). Цього можна уникнути, використовуючи підсилювачі постійного струму, такі як інтегровані диференціальні підсилювачі.

У схемах реальних генераторів імпульсів завжди є паразитні індуктивності та ємності, які часто утворюють паразитні коливальні кола. Збуджені фронтами імпульсів короткої тривалості (частки-одиноці нс), вони часто створюють після них характерні викиди і навіть загасаючі коливання (рис. 1 б). Існує ряд способів їх усунення: ретельний монтаж з максимальним укороченням усіх провідників, використання демпфуючих ланцюгів і феритових кілець з великими втратами і, нарешті, реалізація схем у вигляді смугових ліній, коаксіальних і хвилеводних конструкцій.

Імпульси можуть бути індивідуальними і періодично повторюваними (періодичними). Вони також можуть формуватися в пучках із заданою кількістю імпульсів у пучку. Усі параметри змінного струму також застосовуються до імпульсів. Для періодичних імпульсів особливе значення мають два взаємопов'язані параметри: коефіцієнт заповнення і шпаруватість. Вони визначаються як:

$$K_{DC} = t_i/T < 1; \quad (1)$$

$$Q = 1/K_{DC} = T/t_i > 1. \quad (2)$$

Генератор на зарядній лінії – добре відоме рішення, засноване на використанні довгих ліній в імпульсній техніці наносекундного діапазону. Такі лінії мають три основні властивості:

- наявність тимчасової затримки;
- опір відрізка лінії суто омичний;
- явище відбиття і заломлення імпульсів (хвильові процеси).

Однак у цьому випадку необхідно щоб лінії мали низькі втрати, а неоднорідності в них не мали істотного впливу на передачу сигналу. Тому для формування наносекундних імпульсів перевагу надають високочастотним лініям з розподіленими параметрами (коаксіальні кабелі та смугові лінії), які дозволяють отримувати наносекундні імпульси із шириною спектра аж до гігагерц.

Хвильові процеси в лініях з розподіленими параметрами описуються «телеграфними» рівняннями, що поєднують напругу і струм у лінії. На стиках ліній з перемикачами, навантаженнями тощо, коли порушується однорідність ліній, можуть виникати хвильові відбиття. Можна розрахувати напругу та струм у довільних точках будь-якого генератора, використовуючи поняття коефіцієнтів відбиття і заломлення хвиль, а також закони Кірхгофа та правило Петерсена.

Важливим параметром лінії є час затримки переданого сигналу t_D , який визначається часом поширення електромагнітної хвилі на одиницю довжини. В однорідному кабелі час затримки можна обчислити за формулою:

$$t_D = \sqrt{L_0 \cdot C_0}, \quad (1)$$

де L_0 і C_0 – індуктивність та ємність кабелю на одиницю довжини.

Беручи до уваги, що час поширення хвилі на одиницю довжини обернено пропорційний фазовій швидкості електромагнітної хвилі, можна встановити наступну залежність між часом затримки, імпедансом і параметрами лінії:

$$t_D = \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{c}; \quad (4)$$

$$Z = t_D/C_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{C_0 \cdot c}; \quad (5)$$

$$Z = L_0/t_D = \frac{L_0 \cdot c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}; \quad (6)$$

де ε – діелектрична проникність середовища;
 μ – магнітна проникність;
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла.

Для радіочастотного кабелю $\mu = 1$, а ε – діелектрична проникність ізоляції між внутрішнім і зовнішнім провідниками кабелю. Для поліетиленової ізоляції $t_D = 5$ нс/м

Тривалість прямокутного імпульсу, що генерується на навантаженні, визначається часом двократного проходження струму по довжині кабелю l , і його можна розрахувати за формулою

$$t_i = 2l/v = 2l \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{c}. \quad (7)$$

На практиці у реальних схемах не завжди можливо забезпечити суворе дотримання умови координації $R_H = Z_0$. Відхилення від цієї умови впливає на процес формування імпульсу і призводить до спотворення його форми. Умова узгодження порушується через складний характер хвильового опору розрядної лінії, зміну опору комутаційного пристрою під час розряду лінії, а також внаслідок дії паразитних ємностей.

Поряд з неузгодженістю, яка є причиною утворення помилкових імпульсів, паразитні ємності також призводять до спотворення фронту та зрізу сформованих імпульсів навіть при $R_H = Z_0$.

Розробка джерела енергії для генератора високоенергетичних ЕМІ. Сучасний рівень розробки та застосування імпульсних технологій вимагає використання потужних та надійних джерел живлення, здатних працювати в частотному режимі, особливо в автономних пристроях.

Ємнісний накопичувач енергії широко використовується у фізичних експериментах завдяки ряду переваг:

- Низький внутрішній опір ($<10^{-3}$ Ом);
- Низька індуктивність (до 10^{-9} Гн).

Це забезпечує низький час розряду (10^{-4} – 10^{-8} с), високоєфективну передачу енергії навантаженню, можливість досягнення рекордних значень потужності (до 10^{13} Вт) і швидкості зростання струму (10^{13} А/с). Крім того, вони мають ряд зручностей в експлуатації, таких як: відсутність рухомих частин, простота обслуговування, модульна конструкція, що дозволяє вимикати та легко замінювати елементи у випадку випадкових пошкоджень.

Конденсатори, які використовуються в генераторах імпульсних струмів, часто працюють близько до режиму короткого замикання, коливальний розряд на малу індуктивність при частоті індуктивності коливань 10^4 – 10^7 Гц. Основна вимога до конденсатора – зберігати максимально можливу енергію на одиницю об'єму. Він визначається робочою напругою E_0 , при якій працює ізоляція, і діелектричною проникністю ε ізоляції.

Тому для генерації імпульсу високої енергії в якості основи пристрою було обрано чотири пускові конденсатори Picanil CBV60 ємністю 25 мкФ. Регулювання потужності забезпечується реле LIMING. Допустиме навантаження на реле 24 В, 30 А/40 А. Потужність імпульсу буде регулюватися за допомогою кнопок керування «КЕА-4103 О2», які залежать від бажаного імпульсу, вмикають або вимикають конденсатори в ланцюзі.

Схематичне електричне коло генератора імпульсів високої напруги та енергії показано на рис. 2. Система керування базується на базовому мікроконтролері ATmega328, як у [10, 17]. Живлення зазначеного мікроконтролера та низьковольтної логіки

забезпечується перетворювачем постійного струму 12 В/5 В.

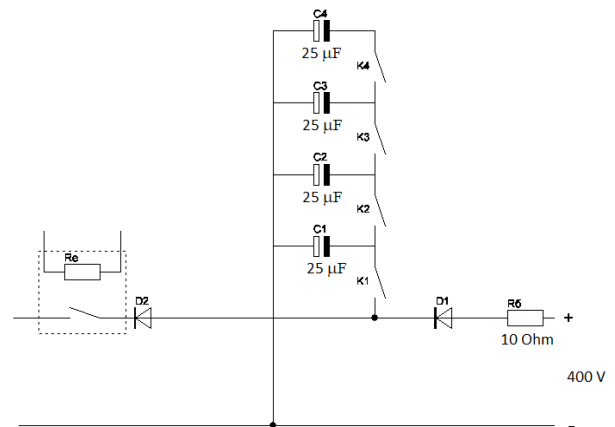


Рисунок 2 – Принципова схема генератора імпульсів високої енергії

Стандартний перетворювач змінного/постійного струму використовується для живлення високовольтного перетворювача та системи управління (пристрій в цілому). Керування та комутація мікроконтролером зовнішньої лінії забезпечується за рахунок модулів реле типу JQC-3FF-S. Модулі реле мають допустиме навантаження до 15 А і оснащені оптичною ізоляцією на основі оптронів PC817. Інформація відображається за допомогою стандартного символічного дисплею WH1602.

Однак при цьому можуть виникнути проблеми з недостатньою кількістю портів мікроконтролера, коли потрібно підключити екран з великою кількістю контактів. Вирішенням цієї проблеми може стати перехід на протокол I2C, який використовує лише 4 виводи. I2C/ІІС (Inter-Integrated Circuit) – це протокол, спочатку створений для зв'язку інтегральних схем в електронному пристрої. Протокол I2C базується на 8-бітовій шині, яка потрібна для з'єднання блоків в контрольованій електроніці та системних адресах, щоб забезпечити можливість комунікації по одному і тому ж проводу з кількома пристроями за рахунок передачі дані на той чи інший пристрій, додаючи до пакету даних ідентифікатор бажаного елемента. Найпростіша схема I2C може містити один пристрій керування (найчастіше мікроконтролер) і кілька керованих (наприклад, РК-дисплей). Кожен пристрій має адресу в діапазоні від 7 до 127. Двох пристроїв з однаковою адресою в одній схемі бути не повинно. Плата Arduino підтримує I2C на апаратному рівні. Для підключення пристроїв відповідно до цього протоколу можна використовувати шини А4 та А5. Наявна швидкість і зручна можливість використання I2C дисплея – це використання окремого модуля I2C – адаптера. Рідкокристалічний монітор із підтримкою I2C підключений до мікроконтролера через чотири провідника – два для передачі даних, два – для живлення. Схема підключення показана на рис. 3.

Керування режимами роботи пристрою разом із класичними кнопками реалізовано за допомогою енкодера KY-040. Модуль енкодера являє собою механічний датчик кута, він перетворює кут повороту обертового об'єкта (наприклад, вала) в електричні сигнали, зміщені на 90 градусів відносно один одного. Цей модуль має три виводи – CLK, DT і SW. Сигнали, зміщені на 90 градусів відносно один одного, з'являються на клемках CLK і DT при обертанні за/проти годинникової стрілки, вихід SW використовується для отримання стану центральної осі енкодера, яка виконує роль кнопки.

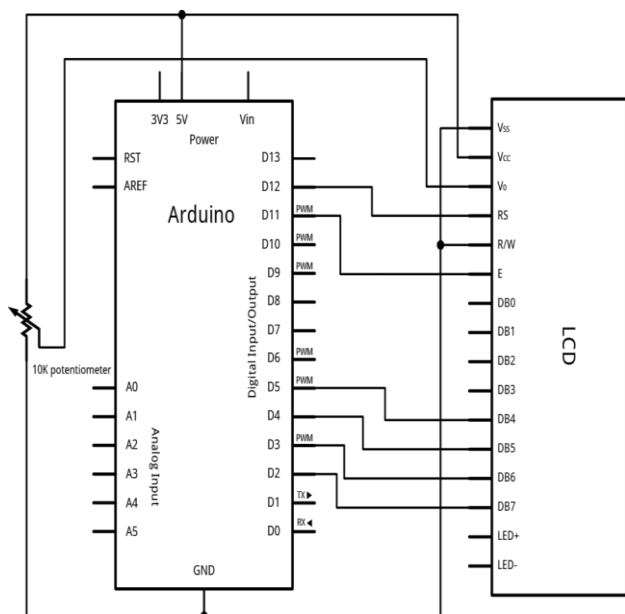


Рис. 3. Схема підключення РК-дисплею WH1602 з модулем I2C

На основі схеми роботи генератора, зображеної на рисунку 2, та на основі основних конструктивних елементів, які описані вище, було розраховано та реалізовано джерело високої енергії та пристрій керування зазначеним генератором.

Експериментальна апробація. Для експериментальної апробації розробленого пристрою керування та живлення, відповідно до викладеного вище, на основі схеми роботи генератора, показаної на рис. 2, та на основі основних конструктивних елементів, був розрахований та виготовлений генератор високоенергетичних імпульсів зовнішній вигляд та компоновка якого показані на рис. 4 та 5, відповідно.



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд генератора імпульсів високої енергії

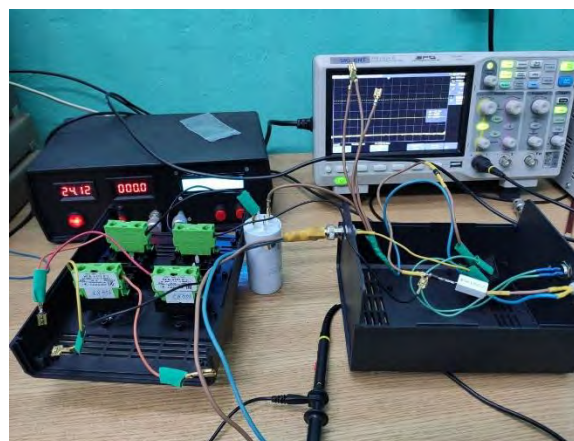


Рисунок 5 – Внутрішня компоновка генератора імпульсів високої енергії

Для апробації генератор був підключений до осцилографа та тестового джерела живлення. В якості навантаження використовувався стандартизований опір 10 кОм. Отримана осцилограма розряду конденсатора показана на рис. 6.

Для порівняння отриманих результатів були проведені випробування наносекундного генератора імпульсів, розробленого в [9, 10] на основі високовольтного джерела постійного струму (рис. 7).

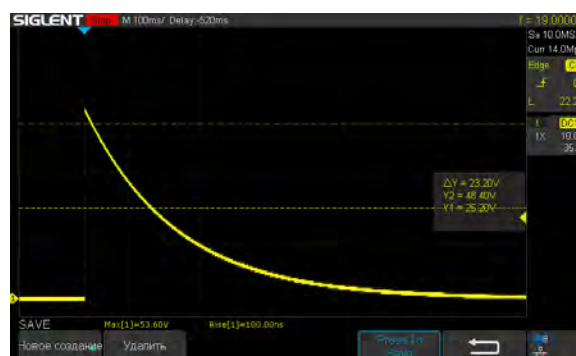


Рисунок 6 – Осцилограма розряду конденсатора



Рисунок 7 – Зовнішній вигляд високовольтного імпульсного генератора розроблений [9, 10]

В якості навантаження використовується стандартизований опір 50 Ом, що випадку менше опору Z_0 і дозволяє отримати одиночний імпульс. Приклад імпульсу показаний на рисунку 8.

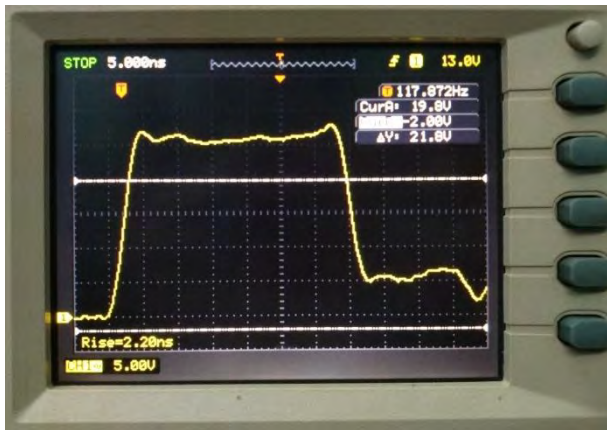


Рисунок 8 – Приклад одиночного імпульсу генератора наносекундних імпульсів

Варіант генератора, розроблений у [9, 10] дозволяє реалізувати вплив на дослідні зразки (елементи захисту або власне РЕО) імпульсами ЕМІ з такими параметрами:

- тривалість імпульсу дорівнює приблизно 30 нс, що обумовлено довжиною зарядової лінії (5 м, близько 5–6 нс на метр);
- фронт зростання імпульсу становить близько 2,2–2,4 нс, що достатньо для запланованих досліджень.

Як видно з порівняння наведених вище даних, а також з порівняння рис. 6 і 8, раніше розроблений генератор, що живиться від високовольтного джерела, дозволяє отримувати імпульси, максимально наближені до прямокутника форми з мінімальним тривалістю фронту підйому.

У той же час особливості форми імпульсу, показані на рисунку 6, зумовлені в першу чергу специфікою процесу розряду конденсатора, що використовується в цьому випадку як джерело енергії ЕМІ. Розроблений варіант генератора ЕМІ на основі

конденсатора дозволяє піддавати елементи РЕО та елементи захисту імпульсам набагато більшої потужності, ніж у випадку використання попереднього варіанту генератора.

Як результат, доцільно використовувати обидва генератори ЕМІ разом для цілей дослідження. Наприклад, за допомогою відносно малопотужного генератора імпульсів прямокутної форми можна з високою точністю досліджувати часові характеристики перемикання елементів захисту. Генератор на основі конденсаторів дозволить встановити граничні рівні потужності ЕМІ, які можуть бути відведені елементами захисту від пристроїв РЕО.

Висновки. У цій статті розроблено та виготовлено електронний пристрій керування та живлення генератора електромагнітних імпульсів високої енергії.

Створено набір генераторів ЕМІ, застосування яких дозволить вивчити властивості елементів захисту РЕО в широкому діапазоні потужностей впливу ЕМІ.

У комбінації з попередньо розробленою конструкцією генератора ЕМІ це дозволить впливати на досліджувані зразки РЕО та елементів захисту шляхом комплексного впливу імпульсів ЕМІ, які матимуть як надкороткий час зростання, так і велику енергію.

Пристрій керування та живлення забезпечує генерацію імпульсів ЕМІ напругою в діапазоні від 40 до 400 В з можливістю поетапного регулювання, а також реалізовані ручні та автоматичні контрольовані режими роботи з послідовними імпульсами з періодом від 1 с до годин.

Для забезпечення комфортної та безпечної дослідницької роботи пристрій має візуальну індикацію режимів роботи, зокрема режимів генерації високої постійної напруги.

Розроблений пристрій керування та живлення генератора імпульсів високої енергії ЕМІ відповідає вимогам, встановленим під час його розробки, і може бути застосований для вивчення особливостей взаємодії напівпровідникових тонкоплівкових шарів з високоенергетичними електромагнітними імпульсами.

Список літератури

1. Ghosh C. N. EMP weapons. *Strategic Analysis*. 2008. Vol. 24, no. 7. P. 1333–1350.
2. Khrypunov G. S., Nikitin V. O., Rezinkin O. L., Drozdov A. N., Meriuts A. V., Pirohov O. V., Khrypunov M. G., Kirichenko M. V., Danyliuk A. R. Electron bistability and switching effects in Mo/p-CdTe/Mo structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. Vol. 31. P. 3855–3860. doi: 10.1007/s10854-020-02926-6.
3. Kirichenko M.V., Zaitsev R.V., Dobrozhan A.I., Khrypunov G. S., Kharchenko M. M. Adopting of DC magnetron sputtering method for preparing semiconductor films. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. P. 108–111. doi: 10.1109/YSF.2017.8126600.
4. Klochko N. P., Klepikova K. S., Khrypunov G. S., Volkova N. D., Kopach V. R., Lyubov V. M., Kirichenko M. V., Kopach A. V. Antireflective nanostructured zinc oxide arrays produced by pulsed electrodeposition. *Semiconductors*. 2015. Vol. 49. P. 214–223. doi: 10.1134/S1063782615020116.

5. Zhan T., Yamato R., Hashimoto S., Tomita M., Oba S., Himeda Y., Mesaki K., Takezawa H., Yokogawa R., Xu Y., Matsukawa T., Ogura A., Kamakura Y., Watanabe T. Miniaturized planar Si-nanowire micro-thermoelectric generator using exuded thermal field for power generation. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2018. Vol. 19, no. 1. P. 443-453. doi: 10.1080/14686996.2018.1460177.
6. He M., Lin Y.-J., Chiu C.-M., Yang W., Zhang B., Yun D., Lin Z.-H. A flexible photo-thermoelectric nanogenerator based on MoS₂/PU photothermal layer for infrared light harvesting. *Nano Energy*. 2018. Vol. 49, P. 588–595. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.04.072.
7. Rezinkin O., Rezinkina M., Danyluk A., Tomashevskiy R. Formation of high-voltage pulses with nanosecond fronts in low-impedance loads. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P. 464–467. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8880015.
8. Zaitsev R. V., Kopach V. R., Kirichenko M. V., Lukyanov E. O., Khrypunov G. S., Samofalov V. N. Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field. *Functional Materials*. 2010. Vol. 17, no. 4. P. 554–557.
9. Kirichenko M. V., Khrypunov G. S., Khrypunov M. G., Zaitsev R. V., Drozdov A. N. EMI protection elements on cadmium telluride thin films. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 459, no. 1. P. 012009. doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012009.
10. Kirichenko M. V., Drozdov A. N., Zaitsev R. V., Khrypunov G. S., Drozdova A. A., Zaitseva L. V. Design of Electronic Devices Stress Testing System with Charging Line Based Impulse Generator. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 38–42. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250146.
11. Halim N. H., Azmi A., Yahya Y., Abdullah F., Othman M., Laili M. S. Development of a small scale standard lightning impulse current generator. *2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*. 2011. P. 426–431. doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970422.
12. Nishore N. K., Bhakta P., Sharan R. K. On The Development of An Impulse Current Generator. *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility '99 (IEEE Cat. No. 99TH 8487)*. 1997. P. 401–406. doi: 10.1109/ICEMIC.1997.669839.
13. Haryono T., Sirait K. T., Tumiran, Berahim H. The Design of A High Amplitude Impulse Current Generator. *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2008. P. 339–343. doi: 10.1109/ICHVE.2008.4773942.
14. Nunnally W. High-power microwave generation using optically activated semiconductor switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1990. Vol. 37, no. 12. P. 2439–2448. doi: 10.1109/16.64516.
15. Abdel-Salam E. M., Khalifa M. *High Voltage Generation: theory and practice*. High Voltage Engineering. New York: Marcel Dekker. 2000. P. 519–566.
16. Lin M., Liao H., Liu M., Zhu G., Yang Z., Shi P., Lu Q., Sun X. A 7.8 kV nanosecond pulse generator with a 500 Hz repetition rate. *Journal of Instrumentation*. 2018. Vol. 13, no. 4. P. P04004. doi: 10.1088/1748-0221/13/04/P04004.
17. Rai S. K., Dhakar A. K., Pal U. N. A compact nanosecond pulse generator for DBD tube characterization. *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89, no. 3. P. 033505. doi: 10.1063/1.5017564.
- preparing semiconductor films. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017, pp. 108–111. doi: 10.1109/YSF.2017.8126600.
4. Klochko N. P., Klepikova K. S., Khrypunov G. S., Volkova N. D., Kopach V. R., Lyubov V. M., Kirichenko M. V., Kopach A. V. Antireflective nanostructured zinc oxide arrays produced by pulsed electrodeposition. *Semiconductors*. 2015, vol. 49, pp. 214–223. doi: 10.1134/S1063782615020116.
5. Zhan T., Yamato R., Hashimoto S., Tomita M., Oba S., Himeda Y., Mesaki K., Takezawa H., Yokogawa R., Xu Y., Matsukawa T., Ogura A., Kamakura Y., Watanabe T. Miniaturized planar Si-nanowire micro-thermoelectric generator using exuded thermal field for power generation. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2018, vol. 19, no. 1, pp. 443-453. doi: 10.1080/14686996.2018.1460177.
6. He M., Lin Y.-J., Chiu C.-M., Yang W., Zhang B., Yun D., Lin Z.-H. A flexible photo-thermoelectric nanogenerator based on MoS₂/PU photothermal layer for infrared light harvesting. *Nano Energy*. 2018, vol. 49, pp. 588–595. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.04.072.
7. Rezinkin O., Rezinkina M., Danyluk A., Tomashevskiy R. Formation of high-voltage pulses with nanosecond fronts in low-impedance loads. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019, pp. 464–467. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8880015.
8. Zaitsev R. V., Kopach V. R., Kirichenko M. V., Lukyanov E. O., Khrypunov G. S., Samofalov V. N. Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field. *Functional Materials*. 2010, vol. 17, no. 4, pp. 554–557.
9. Kirichenko M. V., Khrypunov G. S., Khrypunov M. G., Zaitsev R. V., Drozdov A. N. EMI protection elements on cadmium telluride thin films. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 459, no. 1, pp. 012009. doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012009.
10. Kirichenko M. V., Drozdov A. N., Zaitsev R. V., Khrypunov G. S., Drozdova A. A., Zaitseva L. V. Design of Electronic Devices Stress Testing System with Charging Line Based Impulse Generator. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020, pp. 38–42. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250146.
11. Halim N. H., Azmi A., Yahya Y., Abdullah F., Othman M., Laili M. S. Development of a small scale standard lightning impulse current generator. *2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*. 2011, pp. 426–431. doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970422.
12. Nishore N. K., Bhakta P., Sharan R. K. On The Development of An Impulse Current Generator. *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility '99 (IEEE Cat. No. 99TH 8487)*. 1997, pp. 401–406. doi: 10.1109/ICEMIC.1997.669839.
13. Haryono T., Sirait K. T., Tumiran, Berahim H. The Design of A High Amplitude Impulse Current Generator. *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2008, pp. 339–343. doi: 10.1109/ICHVE.2008.4773942.
14. Nunnally W. High-power microwave generation using optically activated semiconductor switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1990, vol. 37, no. 12, pp. 2439–2448. doi: 10.1109/16.64516.
15. Abdel-Salam E. M., Khalifa M. *High Voltage Generation: theory and practice*. High Voltage Engineering. New York: Marcel Dekker. 2000, pp. 519–566.
16. Lin M., Liao H., Liu M., Zhu G., Yang Z., Shi P., Lu Q., Sun X. A 7.8 kV nanosecond pulse generator with a 500 Hz repetition rate. *Journal of Instrumentation*. 2018, vol. 13, no. 4, pp. P04004. doi: 10.1088/1748-0221/13/04/P04004.
17. Rai S. K., Dhakar A. K., Pal U. N. A compact nanosecond pulse generator for DBD tube characterization. *Review of Scientific Instruments*. 2018, vol. 89, no. 3, pp. 033505. doi: 10.1063/1.5017564.

References (transliterated)

1. Ghosh C. N. EMP weapons. *Strategic Analysis*. 2008, vol. 24, no. 7, pp. 1333–1350.
2. Khrypunov G. S., Nikitin V. O., Rezinkin O. L., Drozdov A. N., Meriuts A. V., Pirohov O. V., Khrypunov M. G., Kirichenko M. V., Danyliuk A. R. Electron bistability and switching effects in Mo/p-CdTe/Mo structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, vol. 31, pp. 3855–3860. doi: 10.1007/s10854-020-02926-6.
3. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Dobrozhan A. I., Khrypunov G. S., Kharchenko M. M. Adopting of DC magnetron sputtering method for

Надійшло (received) 07.10.2021

Шкода Дмитро Сергійович (Шкода Дмитрий Сергеевич, Dmytro Shkoda) – аспірант кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-9755>; e-mail: dmytro.skoda@khpi.edu.ua.

Кіріченко Михайло Валерійович (Кириченко Михаил Валерьевич, Mykhailo Kirichenko) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4847-506X>; e-mail: mykhailo.kirichenko@khpi.edu.ua.

Зайцев Роман Валентинович (Зайцев Роман Валентинович, Roman Zaitsev) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-8452>; e-mail: roman.zaitsev@khpi.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна (Минакова Ксения Александровна, Kseniia Minakova) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-1082>; e-mail: ksenii.minakova@khpi.edu.ua.

Білик Сергій Юрійович (Белик Сергей Юрьевич, Serhii Bilyk) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8813-5652>; e-mail: serhii.bilyk@khpi.edu.ua.

ЗМІСТ

<i>Шутенко О. В., Барбашов І. В., Омеляненко Г. В.</i> Аналіз динаміки зміни газовмісту масел у силових трансформаторах у процесі розвитку іскрових розрядів.....	3
<i>Бедерак Я. С., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Дем'яненко Р. І., Карпалюк Г. І.</i> Вплив низької якості електричної енергії на роботу електрообладнання.....	18
<i>Бедерак Я. С., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Дяченко О. В., Захаренко Н. С.</i> Економічні збитки від низької якості електричної енергії.....	25
<i>Бедерак Я. С., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В., Янчик О. Г.</i> Робота трансформатора при низькій якості електроенергії.....	33
<i>Безверхня Ю. С., Коцур М. І., Яримбаш Д. С., Коцур І. М.</i> Підвищення ефективності визначення параметрів тролейних шинопроводів на основі польового моделювання.....	38
<i>Важинський А. І., Жуков С. Ф.</i> Методика оцінки ресурсу енергетичного обладнання металургійних цехів.....	44
<i>Гапон Д. А., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Зуєв А. О., Донецька Т. С.</i> Облік електроенергії при низькій її якості.....	49
<i>Гапон Д. А., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Рудевич Н. В.</i> Автоматизовані системи обліку і якості електроенергії у системах електропостачання.....	54
<i>Гринишина М. В.</i> Особливості технології виготовлення силових високовольтних кабелів з термопластичною полімерною ізоляцією.....	59
<i>Довгалюк О. М., Бондаренко Р. В., Яковенко І. С., Мірошник К. А., Високих В. О.</i> Моделювання повітряних ліній електропередачі з композитними опорами для електричних мереж напругою 35-330 кВ.....	66
<i>Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Мінакова К. О., Дроздов А. М., Шкода Д. С.</i> Підвищення ефективності промислових зразків кремнієвих сонячних елементів.....	75
<i>Золотарьов В. М., Антонєць С. Ю., Обозний А. Л., Антонєць Ю. О., Гонтар Ю. Г., Щєбенюк Л. А., Кєссаєв О. Г.</i> Дослідження переважувальної здатності силових кабелів середньої напруги із зшитю поліетиленовою ізоляцією.....	84
<i>Кривенко С. В.</i> Вплив клапанного ефекту на енергоефективність шарових газодинамічних систем.....	93
<i>Кулик О. С.</i> Розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур у високовольтному маслонаповненому обладнанні за результатами аналізу розчинених у маслі газів.....	102
<i>Мороз О. М., Мірошник О. О., Павлов А. О., Савченко О. А., Тоберт М. Ю.</i> Експериментальні дослідження факторів впливу на генерацію сонячної електростанції.....	114
<i>Пономаренко С. Г.</i> Порівняльний аналіз інтенсивності старіння масла в трансформаторах напругою 110 кВ та автотрансформаторах напругою 330 кВ.....	124
<i>Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Потривай А. Е., Дривецький С. І., Білик С. Ю.</i> Пошук оптимального засобу моделювання електричного поля ізоляторів.....	137
<i>Шкода Д. С., Кіріченко М. В., Зайцев Р. В., Мінакова К. О., Білик С. Ю.</i> Розробка накопичувача енергії для високовольтного електромагнітного генератора імпульсів.....	144

CONTENT

<i>Shutenko O. V., Barbashov I. V., Omelianenko H. V.</i> Analysis of gas content dynamics in power transformers during development of spark discharge.....	3
<i>Bederak Y., Gryb O., Karpaliuk I., Demianenko R., Karpaliuk H.</i> Effect of low quality of electric power on the operation of electric power supply	18
<i>Bederak Y., Gryb O., Karpaliuk I., Diachenko O., Zakharenko N.</i> Economic damages from low-quality electric energy	25
<i>Bederak Y., Gryb O., Karpaliuk I., Shvets S., Yanchyk A.</i> Operation of the transformer at low power quality.....	33
<i>Bezverkhnia Y. S., Kotsur M. I., Yarymbash D. S., Kotsur I. M.</i> Increasing the efficiency of determining the parameters of trolley busbars based on field simulation.....	38
<i>Vazhinskiy A., Zhukov S. F.</i> Methodology for assessing the resource of power equipment of metallurgical workshops.....	44
<i>Gapon D., Gryb O., Karpaliuk I., Zueva, Donetska T.</i> Electric power metering with its low quality	49
<i>Gapon D., Gryb O., Karpaliuk I., Rudevich N.</i> Automated metering and power quality systems in power supply systems	54
<i>Grynyshyna M. V.</i> Features of technology of manufacture of power high voltage cables with thermoplastic polymeric insulation	59
<i>Dovgalyuk O. M., Bondarenko R. V., Yakovenko I. S., Miroshnyk K. A., Vysokykh V. O.</i> Modelling of overhead transmission lines with composite towers for 35-330 kV electric power networks	66
<i>Zaitsev R., Kirichenko M., Minakova K., Drozdov A., Shkoda D.</i> Improving the efficiency of industrial samples of silicon solar elements	75
<i>Zolotarov V., Antonets S., Oboznyi A., Antonets Y., Gontar Y., Shchebeniuk L., Kiessaiev O.</i> Research overload capability power cables medium voltage of XLPE insulation.....	84
<i>Krivenko S. V.</i> Influence of valve effect on energy efficiency of layer gasdynamic systems.....	93
<i>Kulyk O.</i> Recognition of overheating in different temperature ranges in high-voltage oil-filled equipment by the dissolved gas analysis.....	102
<i>Moroz O., Miroshnyk O., Pavlov A., Savchenko O., Tobert M.</i> Experimental studies of factors of influence on solar generation power plants.....	114
<i>Ponomarenko S.</i> Comparative analysis of oil ageing intensity in 110 kV transformers and 330 kV autotransformers ..	124
<i>Shevchenko S. Yu., Danylchenko D., Potryvai A., Dryvetskyi S., Bilyk S.</i> Search for the optimal means for modelling the electric field of insulators	137
<i>Shkoda D., Kirichenko M., Zaitsev R., Minakova K., Bilyk S.</i> Development of energy storage for high voltage electromagnetic pulse generator	144

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: ЕНЕРГЕТИКА: НАДІЙНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

Збірник наукових праць

№ 2 (3) 2021

Відповідальний редактор: Шевченко С. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар: Кулик О. С., аспірант, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск Довгалюк О. М., канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ:
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра передачі електричної енергії
Тел.: (057) 707-66-43; e-mail: visnyk.erec@khpri.edu.ua



Підп. до друку 29.12.2021 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 13,37. Облік.-вид. арк. 5,22.
Тираж 100 пр. Зам. № 802. Ціна договірна.

Видавець та виготовлювач ТОВ «Друкарня Мадрид»
через ФОП Гобельовська Л. П.
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18. Тел.: **0800-33-67-62**
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: Серія ДК № 4399 від 27.08.12 р.
www.madrid.in.ua info@madrid.in.ua