p-ISSN 1607-6761, e-ISSN 2521-6244

Электротехника и электроэнергетика

Електротехніка та електроенергетика

Electrical Engineering and Power Engineering

ISSN 1607-6761

9 771607 676004 82>

3'2018

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
та
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№3’2018

Засновано Запорізьким національним технічним університетом
у травні 1999 року

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2018

ISSN 1607-6761 (Print)
ISSN 2521-6244 (Online)

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

Головний редактор д-р техн. наук Яримбаш Д.С.
Заст. гол. редактора д-р техн. наук Тіховод С.М.
Відповідальний секретар канд. техн. наук Коцур М. І.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Zgraja Jerzy, Ph.D**,** професор Лодзького технологічного університету, Лодзь, Польща;
Biro, Oszkar, Ph.D, професор інституту основ і теорії електротехніки Грацького технічного, Грац, Австрія;
Zurek Stan, Ph.D., науковий співробітник, Кардіффський університет, Кардіфф, Великобританія;
Sebastian Tomy, Ph.D, професор університету Торонто, м. Торонто, Канада, технічний експерт корпорації "Motor Drives and Control Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;
Arturi, Cesare Mario, Ph.D., професор політехнічного університету Мілана, Італія;
Ronseero-Clemente Carlos, Ph.D,, професор факультету Електроенергетика та електронні системи, Університет Естремадури, м. Бадахос, Іспанія;
José Roberto Camacho, PhD, професор електротехніки в Uberlandia федеральний університет, Бразилія;
Mohamed Ahmed Moustafa Hassan, Ph.D., професор кафедри електротехніки та електроенергетики, Каїрський університет, Гіза, Єгипет.

Включено до переліку наукових фахових видань України (наказ МОНУ № 1328 від 21.12.2015р.)

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

Загірняк М. В., д-р техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна; **Зірка С. Є.**, д-р техн. наук, проф., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Мілих В. І.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна; **Жильцов А. В.,** д-р техн. наук, проф., Національний університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; **Паранчук Я. С.,** д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна; **Толочко О. І.,** д-р техн. наук, проф., Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського", м. Київ, Україна; **Бушер В. В.,** д-р техн. наук, проф., Одеський національного політехнічного університету, м. Одеса, Україна; **Андрієнко П. Д.,** д-р техн. наук, проф., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Зіновкін В. В.**, д-р техн. наук, проф., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Мороз Ю. І.**, канд. техн. наук, доц., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Коцур І. М.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Яримбаш С. Т.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Шило Г. М.**, д-р техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Фурманова Н. І.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Пархоменко А. В.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Щербовських С. В.**, д-р. техн. наук, доц., Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; **Мартинюк В. В.**, д-р. техн. наук, проф., Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна; **Кочан В. В.**, канд. техн. наук, доц., Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна; **Глоба Л. С.**, д-р. техн. наук, проф., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; **Скулиш М. А.**, канд. техн. наук, с.н.с., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.

***Журнал включено до міжнародних наукометричних баз**: РИНЦ; **каталогів та систем пошуку:** CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Recource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; КіберЛенінка; Наукова періодика України — проект Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (НБУВ).*

У науковому журналі друкуються результати фундаментальних та прикладних досліджень, зокрема результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук у галузі електротехніки та електроенергетики у відповідності з рубриками: 1. Електротехніка; 2.Електроенергетика.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22913)

Видавець: Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №2394 від 27.12.2005р.

Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №6905 від 29.01.2003р.

Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон:+380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.
Електрона адреса журналу http://ee.zntu.edu.ua **E-mail:** etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 16.10.2018 за рекомендацією вченої ради Запорізького національного технічного університету (протокол №2 від 8.10.2018 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,13. Тираж 300 прим. Зам. №1107

© Запорізький національний технічний університет, 2018

ZAPORIZHZHIA NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№3’2018

Founded by Zaporizhzhia National Technical University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2018

ISSN 1607-6761 (Print)
ISSN 2521-6244 (Online)

«ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING»

Editor-in-chief Prof., Sc.D. DmitroYarymbash

Associate Editor-in-chief Assoc. prof., Sci.D., Sergiy Tihovod

Senior secretary Assoc. prof., Ph.D. Mikhailo Kotsur

The journal has been included scientific professional editions of Ukraine (Order of the Ministry of Education and Science № 1328 dated 21.12.2015)

FOREIGN MEMBERS OF EDITIONAL BOARD

Prof. Jerzy Zgraja, Ph.D., Lodz University of Technology, Lodz, Poland;
Prof. Oszkár Bíró, Ph.D., Technical University of Graz, Graz, Austria;
Zurek, Stan, Ph.D., Research Associate, Cardiff University, Cardiff, United Kingdom;
Sebastian Tomy, Ph.D, Toronto University, Canada, (Technical Expert, Motor Drives and Control Group, Bay City, Michigan, USA);
Arturi Cesare Mario, PhD., Prof., Polytechnic University of Milan, Italy;
Carlos Roncero-Clemente, Ph.D., Prof., Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain;
José Roberto Camacho PhD, Prof., Universidade Federal de Uberlandia, Brazil;
Mohamed Ahmed Moustafa Hassan, Ph.D., Prof., Cairo University, Giza, Egypt.

MEMBERS OF EDITIONAL BOARD (Ukraine)

M.V. Zagirnyak, Sc.D., prof., Kremenchuk Michaylo Ostrogradskiy National University; **S. E Zirka**, Sc.D., prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **V. I. Milykh**, Sc.D., prof., National Technical University "KhPI", Khrarkiv, Ukraine; **A. V. Zhyltsov**, Sc.D., prof., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; **Ya. S. Paranchuk**, Sc.D., prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **O. I. Tolochko**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kiev, Ukraine; **V. V. Busher**, Sc.D., prof., Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine; **P. D. Andrienko**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **Yu I. Moroz**, Ph.D., assoc. prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **I. M. Kotsur**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M. Shilo**, Sci.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. V. Shcherbovskykh**, Sc.D., assoc. prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **V. V. Martynyuk**, Sc.D., prof., Khmelnytsky National University, Khmelnitsky, Ukraine; **V. V. Kochan**, Ph.D., assoc. prof., Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine; **L. S. Globa**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **M. A. Skulish**, Ph.D., assoc. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine;

The journal included in the international scientometric databases*: Index Copernicus Journals Master List; Inspec; РИНЦ;* ***catalogs and search systems:*** *CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Recource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; CyberLeninka; Scientific Periodicals of Ukraine — the project of the National Library of Ukraine named V.I. Vernadsky (NBUV).*

The scientific journal publishes the results of fundamental and applied research, in particular the results of dissertation papers for obtaining the scientific degrees of a Sci.D. and a Ph.D. of technical sciences in the field of electrical engineering and electrical engineering in accordance with the headings: 1. Electrical engineering; 2. Power engineering.

The journal is distributed by the Catalog of periodicals of Ukraine (subscription index – 22913)

Founder and editor: Zaporizhzhia National Technical University, Zaporozhia. Certificate of publisher Civil Code №2394 dated 27.12.2005.

Journal was registrated: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 6905 dated January 29, 2003.

Address of editor and editorial office: Zaporizhzhya National Technical University, st. Zhukovsky, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.

E-address: http://ee.zntu.edu.ua; **E-mail:** etae@ukr.net

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on October 16, 2018 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia National Technical University (Protocol No. 2 dated October 8, 2018). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,13. Number of copies printed 300. Rep. № 1107

© Zaporizhzhia National Technical University, 2018

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Зірка С. Е., Мороз Ю. І., Артурі Ц. М., Еловаара Я., Лахтінен М.
ТОПОЛОГІЧНА ОБОРОТНА МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОГО П'ЯТИСТРИЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....8

Бондаренко С. С., Бялобржеський О. В.
РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТІ ВОЛЬТОДОДАТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ КОЕФІЦІЄНТА НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ НАПРУГИ.....16

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Радченко В. В.
СИСТЕМНІ ВИМОГИ ДО ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....24

Сінчук І. О.
ВАРТІСНО-ЦІЛЬОВІ АСПЕКТИ МОНІТОРИНГУ РІВНІВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ГАЛУЗІ КРИВОРІЗЬКОГО РЕГІОНУ.....32

Доморощин С. В., Сахно О. А.
НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВІДМОВИ АПАРАТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ.....41

СОДЕРЖАНИЕ

I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Зирка С. Е., Мороз Ю. И., Артури Ц. М., Эловаара Я., Лахтинен М.
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАТИМАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ПЯТИСТЕРЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....8

Бондаренко С. С., Бялобржеський О. В.
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ СИЛОВЫХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕННИЙ НАПРЯЖЕНИЯ.....16

II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Радченко В. В.
СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....24

Синчук И.О.
СТОИМОСТНО-ЦЕЛЕВЫЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ОТРАСЛИ КРИВОРОЖСКОГО РЕГИОНА.....32

Доморощин С. В., Сахно А. А.
НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА АПАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.....41

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Zirka S. E., Moroz Y. I., Arturi C. M., Elovaara. J., Lahtinen M.
TOPOLOGICAL REVERSIBLE MODEL OF THREE-PHASE FIVE-LIMB TRANSFORMER.....8

Bondarenko S. S., Bialobrzheskyi O. V.
DISTRIBUTION OF CAPACITY OF TRANSFORMERS OF POWER ACTIVE FILTERS IN REGULATION OF THE COEFFICIENT OF NONLINEAR DEFICIENT VOLTAGES.....16

II POWER ENGINEERING

Radchenko V. V.
SYSTEM REQUIREMENTS TO THE EFFICIENCY OF HYDRO ELECTRIC POWER STATIONS.....24

Sinchuk I. O.
FULL-TARGETED ASPECTS OF MONITORING OF ELECTRICITY LEVELS AT ENTERPRISES OF THE INDIVIDUAL DEPARTMENT OF THE KRIIVORIZHOGY REGION.....32

Domoroshchyn S. V., Sakhno O. A.
FUZZY MODELING OF FAILURE PROBABILITY OF APARATES FOR PROTECTION FROM OVERVOLTAGE.....41

UDC 621.318.001.4

TOPOLOGICAL REVERSIBLE MODEL OF THREE-PHASE FIVE-LIMB TRANSFORMER

ZIRKA S. E. Professor of the Department of physics and technology of the National University of Dnipro, Dnipro, Ukraine, e-mail: zirka@email.dp.ua;

MOROZ Y. I. Ph.D., Associate professor of the Department of physics and technology of the National University of Dnipro, Dnipro, Ukraine, e-mail: yuriy_moroz@i.ua;

ARTURI C. M. Professor of the Department of electronics, information and bioengineering of the Politechnico di Milano, Milan, Italy, e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it;

ELOVAARA. J. Ph.D., Fingrid Oyj, Helsinki, Finland, e-mail: jarmo.elovaara@fingrid.fi;

LAHTINEN M. Ph.D., Fingrid Oyj, Helsinki, Finland, e-mail: matti.2.lahtinen@gmail.com.

Purpose. *The paper continues the authors' studies devoted to transients in three-phase five-limb transformers. The main purpose of the work is to propose a method of evaluating model parameters, which cover transformer operations in saturation. This purpose is achieved by using the concept of the model reversibility.*

Methodology. *The method of obtaining model parameters employs magnetic transformer model and is based on the idea of the model reversibility. The solution is found by equating input reluctances seen from the terminals of the innermost and outermost windings to the reluctances of the corresponding windings on air.*

Findings. *The modeling of GIC events represented in the paper is the most accurate ever obtained for three-phase, five-leg transformers. The model is validated by close agreement of the predicted values and waveforms of the phase currents and reactive power with those measured in tests performed on two 400 MVA transformers connected back-to-back and to a 400 kV power network. The validity of the model was verified at 75 and 200 A dc currents in the transformer neutral. It is shown that the model is a reliable tool in evaluating inrush currents.*

Originality. *The originality and advantage of the method proposed is its ability to determine the model parameters without fitting to experimental data obtained in regimes with highly saturated core. The method ensures the reversibility of the three-winding transformer model that is its correct behavior regardless of which winding is energized.*

Practical value. *The practical value and significance of the paper is caused by the fact that the model proposed is a simple and reliable tool for power system studies. As a practically important example, time domain response of transformer subjected to geomagnetically induced currents (GIC) is analyzed and compared with results of a comprehensive field experiment.*

Keywords: five-limb transformer; topological model; reversible transient model; current waveforms; experimental validation; geomagnetically-induced currents; transformer test; inrush currents.

I. INTRODUTION

The paper continues our studies on transient modeling three-phase five-limb transformer started in [1]. Speaking generally, the structure of corresponding topological models has been sufficiently elaborated in [2] – [4]. So, the main difficulties are related to choosing model parameters and their verification under abnormal conditions. As the core approaches saturation, an appreciable magnetic flux is closed outside the core. So, the model behavior becomes increasingly dependent on elements determining the off-core fluxes.

It was shown in [1] that accurate model of five-limb transformer, which covers regimes with highly saturated core, can be developed without resorting to a detailed tank representation. So, the main elements, which control the off-core fluxes, are linear reluctances of the magnetic transformer model or corresponding inductances of its electrical equivalent.

In the presence of reliable experimental data, these elements can be found by trial and error method, which can be time-consuming, requiring some practical skills or special accelerating techniques [4].

In this paper, we propose a method to determine the model parameters without its fitting to test data obtained in regimes with highly saturated core.

A suitable approach is to make the model reversible – that is, accurate in deep saturation, irrespective of which transformer winding is energized [5]. Reversible models for single-phase transformers were then also proposed in [6] and [7]. In this paper, the method in [5] is extended to five-limb, three-winding transformer. The model is verified by comparing its predictions with results of the GIC-immunity test [8] carried out on two five-limb 400 MVA transformers connected back-to-back and to the Fingrid power network. The accurate model predictions in a wide range of dc currents in their neutrals demonstrate that the model is a reliable tool independent of the core saturation. As another limiting case, we show an adequate model behavior during inrush current events.

© Zirka S.E., Moroz Y.I., Arturi C.M., Elovaara J., Lahtinen M., 2018
DOI 10.15588/1607-6761-2018-3-1

II. TOPOLOGICAL TRANSFORMER MODEL

The model employed in the study was described in [1]. To make the paper self-contained it is shown in fig. 1 where F_1, F_2, and F_3 represent the sources of magnetomotive force (MMF) of the innermost, middle, and the outermost windings 1, 2, and 3 with number of turns N_1, N_2, and N_3 respectively. The innermost channel 0-1 and the equivalent leakage channels 1 - 2 and 2 - 3 are characterized by the linear reluctances R_{01}, R_{12}, and R_{23} respectively. The negative (fictitious) reluctances R_p are added to match all three binary short-circuit inductances [3].

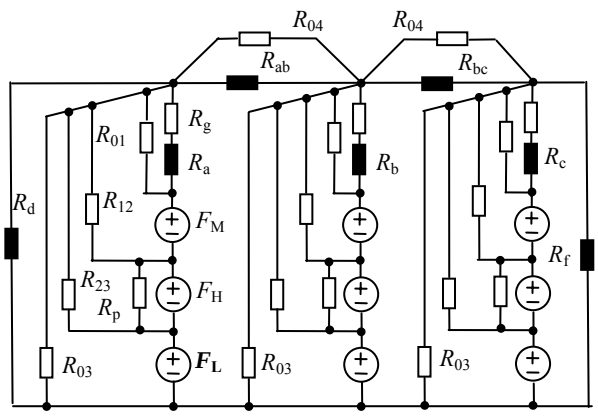


Figure 1. Magnetic circuit of five-limb, three-winding transformer.

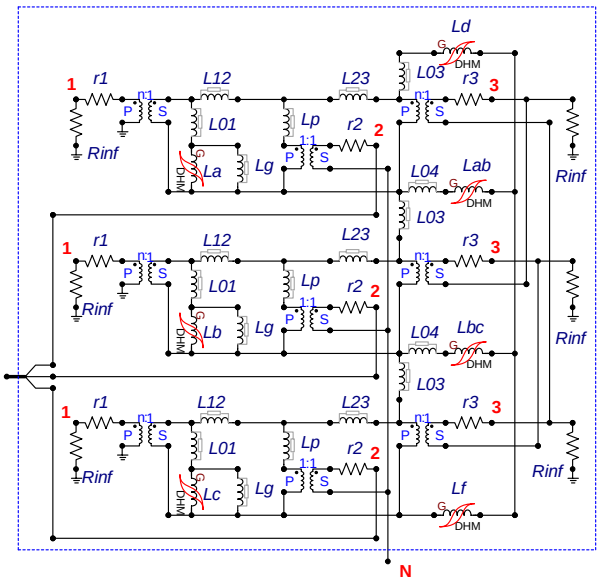


Figure 2. Electrical model of the three-winding five-limb transformer.

The winding resistances r1, r2, and r3 are brought outside the inductive part of the model. Resistances Rinf = 109 Ω make the innermost windings 1 effectively open-circuited and the delta-connected windings 3 unloaded in accordance with [8].

To match the binary short-circuit inductances LS12, LS23, and LS13 measured in [8], the conventional star-connected inductances L12, L23, and Lp are used in the model of fig. 2. The negative value of Lp is found as (LS12 + LS23 – LS13)/2 [1], then L12 = LS12 – Lp, and L23 = LS23 – Lp. Going back to the magnetic circuit in fig. 1, we find its reluctances as $R_{12} = N_2^2 / L_{12}$, $R_{23} = N_2^2 / L_{23}$, and $R_p = N_2^2 / L_p$.

In the derivation, we will also use the air-core inductances of the windings [8], calculated by the manufacturer in the absence of the core. Their values are provided in Section IV together with nameplate data of the transformer considered.

III. OBTAINING REVERSIBLE MODEL

The method of obtaining reversible model is to find its parameters so that the inductance of any single winding of the saturated core is equal to its air-core inductance L^{air}. Consequently, the parameters of the magnetic model in fig. 1 should be chosen so that the input reluctance R^{in} seen from the terminals of any MMF source associated with an N-turn winding is equal to the reluctance corresponding to the inductances of this winding on air, $R^{air} = N^2 / L^{air}$, when the other windings are open, i.e. the corresponding MMF sources are short-circuited.

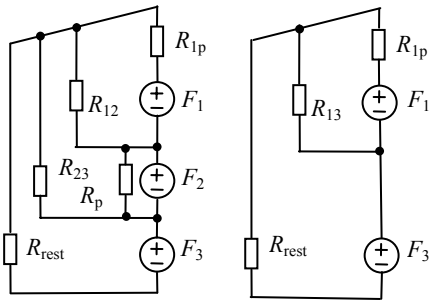
The reluctances of completely saturated legs (R_L), yokes (R_Y), and the end limbs (R_E) are calculated as $R = l/(\mu_0 A)$ where l and A are their lengths and cross sections, and $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. The core air gaps are included into the saturated legs, so we can accept that R_g=0. Consequently, only *four* elements of the magnetic scheme in fig. 1, namely R_{01}, R_{03}, R_{03B}, and R_{04}, remain to be evaluated.

Accounting for the central symmetry of the five-limb transformer, we can consider the windings of only two neighboring legs and thus write *six* equations of the type of $R^{in} = R^{air}$, so the problem is overdetermined. Significant facilitation of its solution in comparison to that in [9] is achieved when building the model reversible for two windings, innermost and outermost. This simplification is justified by the fact [10] that the winding inductances in air, and thus their binary short-circuit inductances are determined by the geometry and relative position of the actual coils. The reversibility of the model for the middle winding is then verified at the end of the derivation.

When building reversible model of *two*-winding transformer, we should remember that the windings of all three legs are identical. This allows us to divide the problem into two parts. The first one is finding reluctance R_{01} of the innermost channel, and the second is the calculation of reluctances R_{03}, R_{03B}, and R_{04}.

In the derivation, we take into account that the opening of a winding shorts the corresponding MMF source. This means that supplying the windings of only one of the

legs (A, B or C) and keeping the other transformer windings open, the scheme in fig. 1 is reduced to that in fig. 3(a). If, in addition, the middle winding 2 becomes open-circuited, the scheme is further simplified to that in fig. 3(b).



a) b)

Figure 3. Per phase equivalent models of (a) three-winding and (b) two-winding transformers.

Here R_{1p} is the equivalent reluctance of the innermost channel merged with the saturated leg:

$$R_{1p} = \frac{R_{01}R_L}{R_{01} + R_L}. \quad (1)$$

The leakage reluctance between the windings 1 and 3 is determined as

$$R_{13} = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23}}. \quad (2)$$

The element R_{rest} represents the resultant reluctance of all magnetic paths outside the outermost winding of any leg. As the windings of all three legs are identical, the values of R_{rest} and R_{1p} are the *same* for all three legs. So, regardless of the leg (A or B), the scheme in fig. 3(b) has only two unknown parameters, R_{rest} and R_{1p}. To find them, we can write relationships for two input reluctances, R_1^{in} and R_3^{in}, seen from the MMF sources F_1 and F_3 in fig. 3(b). Then the imposed equalities $R_3^{in} = R_3^{air}$ and $R_1^{in} = R_1^{air}$ become two simultaneous equations for R_{1p} and R_{rest}:

$$R_{rest} + \frac{R_{13}R_{1p}}{R_{13} + R_{1p}} = R_3^{air}, \quad (3)$$

$$R_{1p} + \frac{R_{13}R_{rest}}{R_{13} + R_{rest}} = R_1^{air}. \quad (4)$$

Expressing R_{rest} from (3),

$$R_{rest} = R_3^{air} - \frac{R_{13}R_{1p}}{R_{13} + R_{1p}}, \quad (5)$$

and inserting it in (4), we arrive to the quadratic equation for R_{1p},

$$R_{1p}^2 + R_{1p}(2R_{13} - R_1^{air}) + \\ + R_{13}\left(R_{13} - R_1^{air} - R_{13}\frac{R_1^{air}}{R_3^{air}}\right) = 0 \quad (6)$$

whose bracketed coefficients are determined by the known "air" reluctances, which are independent of the structure of the transformer core.

The positive root of (6) is substituted back into (5) to give R_{rest}. Then, at given dimensions of the core (given R_L), we find from (1) that:

$$R_{01} = \frac{R_{1p}R_L}{R_L - R_{1p}}. \quad (7)$$

Returning to the scheme in fig. 3(a), we can check the model reversibility for the middle winding. In its expanded form, condition $R_2^{in} = R_2^{air}$ becomes

$$\left[\frac{1}{R_p} + \left(\frac{R_{1p}R_{12}}{R_{1p} + R_{12}} + \frac{R_{23}R_{rest}}{R_{23} + R_{rest}}\right)^{-1}\right]^{-1} = R_2^{air}. \quad (8)$$

In the examples of Section IV, the error in fulfillment of (8) does not exceed 0.4%. This is within the accuracy of the measurement (or calculation) of R_2^{air} and corroborates the reversibility of three-winding model. The mentioned negligible error can also be viewed as model's ability to correctly predict the value of R_2^{air}, which was not used in the derivation.

Now we can return to the scheme in fig. 1 and determine reluctances R_{03}, R_{03B}, and R_{04}. Since all the elements of the scheme in fig. 3, except R_{rest}, are present in each leg of fig. 1, reluctance R_{rest} can be calculated as the input reluctances R_{restA} and R_{restB} of the scheme seen from nodes A–A' and B–B' at shorted MMF sources in the rest of the scheme.

For nodes A–A', R_{rest} is seen as:

$$R_{rest} = R_{restA} = \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_{03}} + \frac{1}{R_{AA}}\right)^{-1}, \quad (9)$$

and for nodes B–B' of the central leg,

$$R_{rest} = R_{restB} = \left(\frac{1}{R_{03B}} + \frac{2}{R_{BB}}\right)^{-1}. \quad (10)$$

Here reluctances R_{BB} and R_{AA} seen from the nodes A–A' and B–B', respectively, are expressed as:

$$R_{BB} = R_{4p} + \frac{R_{Lp}R_E}{R_{Lp} + R_E}; R_{AA} = R_{4p} + \frac{R_{LpB}R_{BB}}{R_{LpB} + R_{BB}}, \quad (11)$$

where

$$R_{LpB} = \left(\frac{1}{R_{03B}} + \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{1p}} \right)^{-1};$$
$$R_{Lp} = \left(\frac{1}{R_{03}} + \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{1p}} \right)^{-1}, \quad (12)$$

$$R_{4p} = \frac{R_{04} R_Y}{R_{04} + R_Y}. \quad (13)$$

With the above-found value of R_{rest}, relationships (9) and (10) are two simultaneous equations with three unknowns: R_{03}, R_{03B}, and R_{04}. In virtue of the excessive number of variables, they can be found by minimizing function

$$F(\mathbf{X}) = [R_{rest} - R_{restA}(\mathbf{X})]^2 + [R_{rest} - R_{restB}(\mathbf{X})]^2 \quad (14)$$

where $\mathbf{X} = [R_{03}, R_{03B}, R_{04}]$ is a vector of sought variables. Since the order of R_{rest} is 10^5 and the found minimum of (14) is near 10^{-7}, the iterative solution of (14) can be considered precise.

The peculiarity observed in minimizing (14) from different initial points is that R_{04} does not practically leave its initial value. This means that for any fixed R_{04} there is a pair of R_{03} and R_{03B}, which nullifies (14). This suggests to exclude R_{04} from vector X and chose R_{04} from physical considerations.

IV. PARAMETERS AND BEHAVIOR OF THE REVERSIBLE MODEL

The results in this Section relate to YNyn0d11 400/400/125 MVA transformer described in [8]. Its wye-connected 120-kV windings are nearest to the core, the 410-kV windings are in the middle, and the outermost are delta-connected 21-kV windings. The numbers of turns N_1, N_2, and N_3 in these windings are 224, 766, and 68. The air-core inductances of the windings are as follows: L_1^{air} = 24.9 mH, L_2^{air} = 496 mH, and L_3^{air} = 7.1 mH.

Model parameters. In accordance with the method in Section III, reluctances R_L, R_Y, and R_E of the saturated core are calculated using the lengths and cross sections given in [1].

The percentage short-circuit reactances provided in [8] yield the following binary short-circuit inductances referred to N_2 turns: L_{S12} = 263.5 mH, L_{S23} = 540.4 mH, and L_{S13} = 877.5 mH. These give the following inductances of the electrical model in fig. 2: L_{12} = 300.313 mH, L_{23} = 577.216 mH, and L_p = – 36.787 mH.

To use the method in Section III, inductances L_{12}, L_{23}, L_p, as well as three air-core inductances L^{air} from [8], are recalculated into corresponding reluctances. Then using (6) and (5) we find that R_{1p} = 1.888 10^6 1/H and R_{rest} = 1.575 10^5 1/H. Now, it follows from (7) that R_{01} = 4.605 10^6 1/H and thus L_{01} is 127.42 mH or 0.095 pu.

Following [3], we can use the coefficient $K = L_{01}/L_{S12}$ whereby L_{01} is related to the inductance L_{S12} of the nearest leakage channel 1-2. It is remarkable that the found value of K (0.4835) is close to the value of 0.5 hard-coded in the hybrid transformer model [11].

To evaluate the influence of R_{04}, it is convenient to use the corresponding inductance, $L_{04} = N_2^2 / R_{04}$. Three per-unit values of L_{04} in Table I are for the cases when $L_{04} = L_{S12}$ (= 0.197 pu); when L_{04} is equal to the inductance of the saturated yoke (0.064 pu), and when inductances L_{04} are absent in the model of fig. 2. The components of vector $\mathbf{X} = [R_{03}, R_{03B}]$, which nullify (14) for each R_{04} (i.e. L_{04}), are represented in Table I by pu values of corresponding inductances.

The fact that L_{03} and L_{03B} are by order of magnitude greater than L_{S12} is explained by different "cross-sections" of the corresponding flux paths: the zero-sequence flux is distributed over the whole transformer volume, whereas the leakage flux is confined to the thin tube of the channel 1-2.

Table 1. Parameters of Reversible Model

L_{04} [pu]	L_{03} [PU]	L_{03B} [pu]	Q [Mvar] (I_{dc} = 200 A)	Q [Mvar] (I_{dc} = 75 A)
0.197	2.512	2.313	53.1	20.18
0.056	2.639	2.566	53.9	20.27
0	2.692	2.673	53.9	20.27

Model verification under the GIC conditions. The electrical model in fig. 2 was verified by simulation of the experimental setup in [8] consisting of two 400 MVA transformers (T1 and T2) arranged in parallel relative to the power network and connected in series regarding the common dc current in the transformers' neutrals. This model configuration and its parameters are shown in fig. 4 of [1].

It was assumed that the cores of these transformers are assembled from grain-oriented steel 27ZDKH85. The DHM-inductor of this steel can be taken at [12] or in the current version of EMTP-ATP [13].

To observe transformer dynamics in the presence of the geomagnetically-induced current (GIC), it is supposed that the biasing step voltage appears at t = 2 s. The following transient is characterized by a growth in the reactive power Q consumed by transformers and increasing winding currents as shown in fig. 4(a).

The model parameters in Table I were first used to check the model's ability to reproduce transformer behavior at maximum dc current in the neutrals (I_{dc} = 200 A) reached in [8]. As the currents obtained are almost indistinguishable from those in [1], we do not show them in this paper. We only note that the reactive power Q_2 consumed by transformer T2 at I_{dc} = 200 A is close to 55 Mvar reported in [8].

In the context of the present study, it was important to verify the model at *lower* neutral current, say at I_{dc} = 75 A. The corresponding transient is illustrated by fig. 4(a),

which shows the evolution of phase currents B and C of T2. The current waveforms in steady-state are given in fig. 4(b) to show their close agreement with the measured currents in fig. 5 recorded at 75 A dc current in the HV neutrals. The same agreement with test results was also obtained for the currents in the network as can be seen from comparing the waveforms in fig. 6(a) and fig. 6(b). The values of the reactive power Q_2, given in the last column of Table I, are in a fairly good agreement with the linear dependence $Q_2(I_{dc})$ observed in [8].

The importance of these findings lies in the fact that the model parameters found for completely saturated core are also valid for modeling other transformer transients.

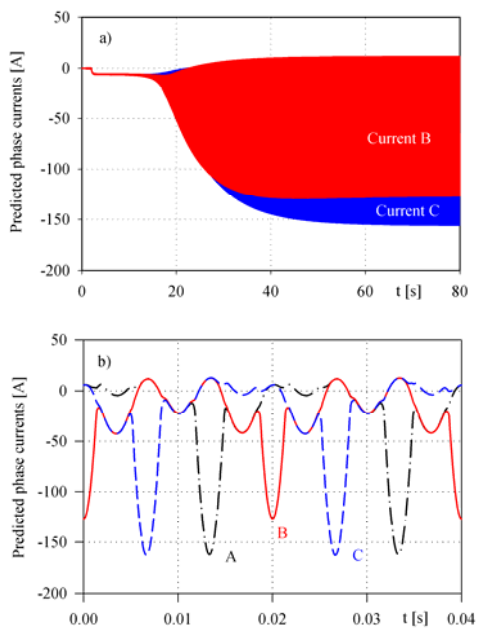


Figure 4. Predicted transient (a) and steady-state (b) phase currents of transformer T2 at the neutral GIC of 75 A.

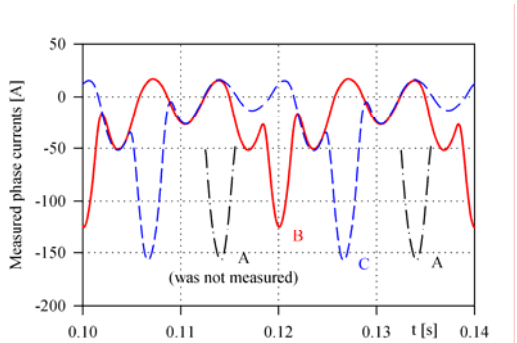


Figure 5. Measured phase currents B and C of transformer T2 at the neutral GIC of 75 A. Note that current A was not measured and is assumed by analogy with that in fig. 4(b).

It should be noted that the model is not very sensitive to changes in its parameters if the model remains reversible. For example, the currents calculated for the model parameters in all three rows of Table I are not visibly different from those in fig. 4(b). As seen in the last columns of Table I, only a small difference is observed between the values of corresponding reactive power Q_2 consumed by T2.

It was found by numerical experiments that all the results calculated in the presence of GIC with non-hysteretic outlined in [1] and hysteretic model in fig. 2 almost coincide. This relates, for instance, to the current waveforms in fig. 4(b).

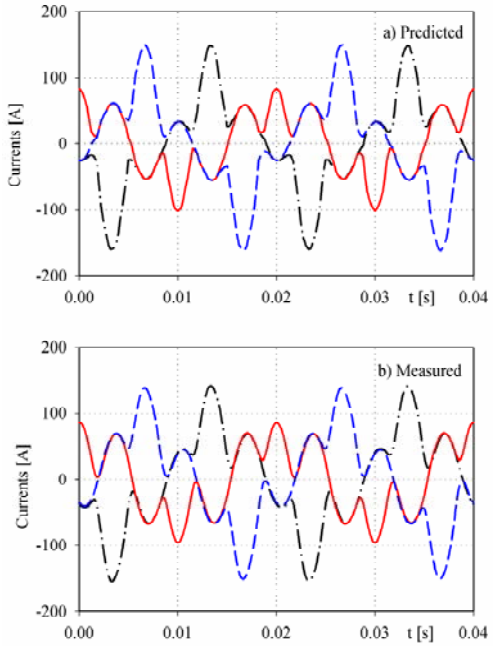


Figure 6. Predicted (a) and measured network currents at I_{dc} = 75 A (b)

Model verification by simulation of inrush currents. The hysteresis and non-hysteresis transformer models were also compared against each other in simulating inrush currents. To concentrate on the transformer only and compare the first (maximum) current peaks, we have assumed an idealized (410-kV) power network and the worst condition of excitation, when the phase voltage $v(t) = V_m \sin(\omega t)$ is switched (at t = 0) to the winding (N turns) of the leg with cross section S_{leg}. Before exciting hysteresis transformer model, all the core sections were brought into the demagnetized state using an inbuilt procedure of the DHM.

The currents in fig. 7 are calculated by the transformer model in fig. 2 supposing that the sinusoidal voltage is applied to the high-voltage (HV) winding of phase A.

It was instructive to compare the height of the first current peak in fig. 7 with the value calculated analytically. For the case considered, i.e. for the zero initial induction in the leg and the idealized sinusoidal voltage

source, the well-known formula (1) from [5] is rewritten as

$$I_m = \frac{V_m}{\omega L_{air}}\left[2 - \frac{\omega B_S N S_{leg}}{V_m}\right] \quad (15)$$

where the saturation induction B_S of steel 27ZDKH85 is 2.00825 T, and in accordance with the data above, $L_{air} = L_2^{air} = 0.496$ H, $N = N_2 = 766$, and $S_{leg} = 0.8309$ m^2.

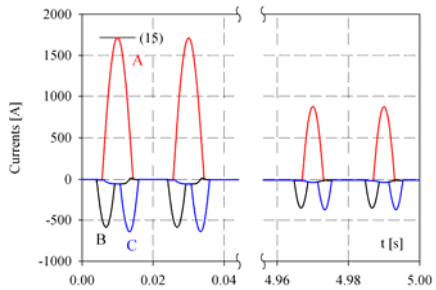


Figure 7. Predicted inrush currents in phases of the HV winding. The horizontal mark shows the current peak calculated with (15).

The value I_m = 1719.7 A, calculated with (15), is shown in fig. 7 by the horizontal line (15), which is at the same level with the current peaks calculated with hysteresis and non-hysteresis transformer models (1718.0 A and 1720.8 A respectively).

The same negligible difference between the current peak (10039.3 A) calculated with (15) and that predicted by the models (9987.5 A) takes place when the transformer is excited from its MV side, i.e. from the innermost windings. Finally, when the outermost delta winding of the model is opened, the calculated current peaks are decreased by 1.9% at the HV excitation, and by 0.05% at the MV energizations.

It worth noting that (15) is derived supposing a coil whose core material has piecewise linear *B-H* curve with two slopes and the bending point at $B = B_S$. The first segment of the curve is strictly vertical, while at $B>B_S$ the coil's inductance becomes equal to L_{air}. This means that the slope of the second segment is equal to μ_0.

The modeling above illustrates the model reversibility and corroborates the conclusion in [14] that the two-slope magnetizing curve can be used to evaluate inrush currents in large three-phase transformers. At the same time, it was noted in [14] that it is critical to identify the proper saturation level (knee point). It was pointed out in [5], however, that the notions of *saturation* and *knee* are somewhat ambiguous. For this reason, it is better to use the whole *B-H* curve, which can be represented easily by several dozen points in the EMTP software. Such a universal representation is also preferable in predicting inrush currents accompanied by moderate saturation, when the flux density does not exceed 1.9–2.0 Tesla [14].

When using the non-hysteresis version of the model, the single-valued *B-H* curve of the steel employed is converted into the flux-current curves of the core sections using the well-known relationships $\lambda = B \cdot N \cdot S$ and $i = l \cdot H / N$, where S and l are cross section and length of the section, and N is the common number of turns at which the model is referred to (here $N = N_2$).

The users of ATP can employ DHM-inductors, in which the chosen steel, as well as N, S, and l are set in the inductor window. It should be remembered that the hysteretic (DHM-based) transformer model retains the remanent flux densities in the core sections and is more accurate in predicting current peaks during subsequent transformer energizations. It can be also fitted so as to reproduce the measured no-load transformer losses in a wide range of terminal voltages [15].

V. CONCLUSION

This paper has proposed a method of obtaining a reversible topological model of five-limb, three winding transformer. A distinguishing feature of the method is its ability to determine the model parameters without fitting to experimental data obtained in conditions with highly saturated core. The validity of the obtained model was verified by simulating transformer behavior under GIC conditions. To do this, we have used parameters and field test results from two 400 MVA transformers at 75- and 200-A dc currents entering their neutrals.

We have observed that both hysteretic and non-hysteretic transformer models are equally suitable to reproduce the behavior of the five-limb transformer in the presence of GIC.

In the general-purpose modeling of five-limb transformers, the users of ATP may also employ the hysteretic version of the model. In this case, the dynamic hysteresis model (DHM) included in the current version of ATP [13] can be used.

In general, the model proposed does not require detailed information on the core, and the preliminary modeling was carried out using the core geometry different from the real one [1]. If the air core inductances of the windings are unknown and it is impossible to ensure the model reversibility, the linear inductances L_{03} and L_{03B} in the model of fig. 2 may be set equal to 2-3 pu, as seen in Table 1, or 10 − 15 times the short-circuit transformer inductance.

The hysteresis and non-hysteresis transformer models were also compared against each other in simulating inrush currents when model reversibility was verified by comparing current peaks on the HV and MV sides with accurate analytical predictions.

REFERENCE

[1] Zirka, S., Moroz, Y., Arturi, C., & Bonnman, D. (2018). Topological transient models of three-phase five-limb transformer. *Electrical Engineering And Power Engineering*, *2*, 18-25.

doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-2

[2] Arturi, C. M. (1991). Transient simulation of a three phase five limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization. *IEEE Trans. Power* Delivery, 6, 1, 196-207. doi: http://dx.doi.org/10.1109/61.103738

[3] Chen, X., Venkata, S.S. (1997). A three-phase three winding core-type transformer model for low frequency transient studies. *IEEE Trans. Power* Delivery, 12, 2, 775-782. doi: http://dx.doi.org/0885-8977/97/$10.00

[4] Walling, R. A., Khan, A. H. (1991). Characteristics of transformer exciting current during geomagnetic disturbances. *IEEE Trans. Power Delivery*, 6, 4, 1707-1714. doi: 0885-8977/91$01.00

[5] Zirka, S. E., Moroz, Y. I., Arturi, C. M., Chiesa, N., Høidalen, H. K. (2012). Topology-correct reversible transformer model. *IEEE Trans. Power Delivery*, 27, 4, 2037-2045. doi: http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2205275

[6] Jazebi, S., León, F. de, Farazmand, A., Deswal D. (2013). Dual reversible transformer model for the calculation of low-frequency transients. *IEEE Trans. Power Delivery*, 28, 4, 2509-2516. doi:http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2268857

[7] Jazebi, S., León, F. de. (2015). Experimentally validated reversible singe-phase multiwinding transformer model for the accurate calculation of low-frequency transients. *IEEE Trans. Power Delivery*, 30, 1, 193-201. doi:http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2319093

[8] Lahtinen, M., Elovaara, J. (2002). GIC occurrences and GIC test for 400 kV system transformer. *IEEE Trans. Power Delivery*, 17, 2, 555-561. doi:http://dx.doi.org/0885-8977(02)02750-4.

[9] Yang, M., Kazemi, R., Jazebi, S., D. Deswal, Leon, F. De. (2018). Retrofitting the BCTRAN transformer model with non-linear magnetizing branches for the accurate study of low-frequency deep saturating transients. *IEEE Trans. Power Delivery*, 5, 33, 2344-2353. doi:http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2825252

[10] Alexander Ch., Sadiku M., (2013). *Fundamentals of electric circuits*, 5th edition. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

[11] Høidalen, H. K., Mork, B. A., Gonzalez, F., Ishchenko, D., Chiesa, N. (2009). Implementation and verification of the hybrid transformer model in ATPDraw, *Electric Power Systems Research*, 79, 3, 454-459. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.003

[12] Moroz, Y. I., Zirka, S. E. (2014). Inverse models of magnetic hysteresis, [Online]. Available: https://sites.google.com/site/inverse-hysteresismodel.

[13] Alternative Transients Program, ATP-EMTP. (2016). [Online]. Available: http://www.eeug.org

[14] S. Jazebi, A. Rezaei-Zare, M. Lambert, et al. (2016). Duality-derived transformer models for low-frequency electromagnetic transients—Part II: Complementary modeling guidelines. *IEEE Trans. Power Delivery*, 31, 5, 2420-2430. doi: http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2556686

[15] Zirka, S. E., Moroz, Y. I., Høidalen, H. K., Lotfi, A., Chiesa, N., Arturi, C. M. (2017). Practical experience in using a topological model of a core-type three-phase transformer – no-load and inrush conditions. *IEEE Trans. Power Delivery*, 32, 4, 2081-2090. doi:http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2618900

The article was received 02.06.2018

ТОПОЛОГІЧНА ОБОРОТНА МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОГО П'ЯТИСТРИЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ЗІРКА С. Е. д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматизованого управління Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, e-mail: zirka@email.dp.ua;

МОРОЗ Ю. І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем автоматизованого управління Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, e-mail: yuriy_moroz@i.ua;

АРТУРІ Ц. М. професор факультету електроніки, інформації і біоінженерії Міланського Політехнічного інституту, Мілан, Італія, e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it;

ЕЛОВААРА Я. д-р техн. наук, Fingrid Oyj, Гельсінкі, Фінляндія, e-mail: Jarmo.Elovaara@fingrid.fi;

ЛАХТІНЕН М. д-р техн. наук, Fingrid Oyj, Гельсінкі, Фінляндія, e-mail: matti.2.lahtinen@gmail.com.

Мета роботи. *Стаття продовжує дослідження авторів, присвячені перехідним процесам в трифазних п'ятистрижневих трансформаторах. Головна мета роботи − запропонувати методику розрахунку параметрів моделі, що охоплюють роботу трансформатора з насиченим осердям. Ця мета досягається шляхом використанням концепції оберненості моделі.*

Методи дослідження. *Розрахунок параметрів моделі виконується з використанням магнітної схеми заміщення трансформатора і побудований на юдеї її оберненості. Рішення знаходиться шляхом прирівнювання вхідних магнітних опорів, розрахованих з боку внутрішньої і зовнішньої обмоток, і магнітних опорів цих обмо-*

ток у повітрі.

Отримані результати. *Точність моделювання процесів в присутності ГІТ перевищує точність відомих моделей трифазних п'ятистрижневих трансформаторів. Адекватність моделі підтверджується близькістю прогнозованих фазних струмів і споживаної реактивної потужності, до відповідних величин, виміряним в експерименті на двох 400 МВА трансформаторах, які були під'єднані до енергосистеми напругою 410 кВ. Обґрунтованість моделі перевірена при постійних струмах в нейтралі силою 75 і 200 А. Показано застосовність моделі для оцінки кидків струму включення.*

Наукова новизна. *Оригінальність і новизна методу полягає в можливості визначати параметри моделі без використання експериментальних даних, що отримані при насиченому осерді. Метод забезпечує оберненість моделі триобмоточного трансформатора, тобто її коректну поведінку при збудженні будь якої з обмоток.*

Практична цінність. *Практична цінність і значимість статті обумовлені тим, що запропонована модель трансформатора являє собою простий і надійний інструмент для дослідження електричних систем. В якості практично важливого результату, показано правильне прогнозування моделлю часового відгуку трансформатора, що спостерігався в експерименті.*

Ключові слова: п'ятистрижневий трансформатор; топологічна модель; оборотна модель; перехідний процес; форми струмів; експеримент; геомагнітно-індуковані струми; струми включення.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАТИМАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ПЯТИСТЕРЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ЗИРКА С. Е. — д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматизированного управления Днепровского национального университета, Днепр, Украина, e-mail: zirka@email.dp.ua

МОРОЗ Ю. И. — канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматизированного управления Днепровского национального университета, Днепр, Украина, e-mail: yuriy_moroz@i.ua

АРТУРИ Ц. М. — профессор факультета электроники, информации и биоинженерии Миланского Политехнического института, Милан, Италия, e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it;

ЭЛОВААРА Я. — д-р техн. наук, Fingrid Oyj, Хельсинки, Финляндия, e-mail: jarmo.elovaara@fingrid.fi;

ЛАХТИНЕН М. — д-р техн. наук, Fingrid Oyj, Хельсинки, Финляндия, e-mail: matti.2.lahtinen@gmail.com.

Цель работы. *Статья продолжает исследования авторов, посвященные переходным процессам в трехфазных пятистержневых трансформаторах. Главная цель работы − предложить методику расчета параметров модели, охватывающих работу трансформатора с насыщенным сердечником. Эта цель достигается использованием концепции обратимости модели.*

Методы исследования. *Расчет параметров модели выполняется с использованием магнитной схемы замещения трансформатора и основан на идее ее обратимости. Решение находится путем приравнивания входных магнитных сопротивлений, определяемых со стороны внутренней и внешней обмоток, и магнитных сопротивлений этих обмоток на воздухе.*

Полученные результаты. *Точность моделирования процессов при наличии ГИТ превышает точность известных моделей трехфазных пятистержневых трансформаторов. Адекватность модели подтверждается близостью предсказанных фазных токов и потребляемой реактивной мощности, к соответствующим величинам, измененным в эксперименте на двух 400 МВА трансформаторах, подключенных к энергосистеме с напряжением 410 кВ. Обоснованность модели проверена при постоянных токах в нейтрали силой 75 и 200 А. Показана применимость модели для оценки бросков тока включения.*

Научная новизна. *Оригинальность и новизна предложенного метода состоит в возможности определять параметры модели без использования экспериментальных данных, полученных при насыщенном сердечнике. Метод обеспечивает обратимость модели трехобмоточного трансформатора, то есть ее правильное поведение при возбуждении любой обмотки устройства.*

Практическая ценность. *Практическая ценность и значение статьи обусловлено тем, что предложенная модель трансформатора является простым и надежным инструментом для исследования электрических сетей. В качестве практически важного результата, показано правильное предсказание моделью временного отклика трансформатора, наблюдаемого в эксперименте.*

Ключевые слова: пятистержневой трансформатор; топологическая модель; обратимая модель; переходный процесс; форма токов; эксперимент; геомагнитно индуцированные токи; токи включения.

UDC 621.316.13

РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТІ ВОЛЬТОДОДАВЧОГО ТРАНСФОРМАТОРА СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ КОЕФІЦІЄНТА НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ НАПРУГИ

БОНДАРЕНКО С.С. аспірант кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: sergj1994@gmail.com;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemAl@kdu.edu.ua;

Мета роботи. *Дослідити параметри режиму та розподілу потужності вольтододавчого трансформатора при регулюванні коефіцієнта нелінійних спотворень напруги.*

Методи дослідження. *Методи електротехніки, методи чисельного моделювання, методи рядів Фур'є.*

Отримані результати. *В роботі проведено аналіз застосування відомих схем заміщення для вольтододавчого трансформатора. В середовищі візуального програмування розроблено модель, що імітує роботу фільтра. Розглянуто та проведено дослідження процесів, які протікають в трансформаторі. На підставі аналізу результатів моделювання, показана складність спектру потужності трансформатора за умов його роботи в режимі вольтодобавки при спотворенні форми струму та напруги. В разі спотворення напруги живлення використовують послідовний силовий активний фільтр, який підключається до мережі через вольтододавчі трансформатори, що призводить до зміни параметрів еквівалентного силового контуру навантаження. В результаті досліджень встановлено, що трансформатор послідовного силового активного фільтра в режимі вольтодобавки, при компенсації спотворення напруги мережі в загальному випадку має напругу та струм обмоток, гармонійний склад яких відрізняється. Це призводить до широкого гармонійного складу потужності трансформатора, що потребує обліку зростання втрат в обмотках та магнітопроводі. Сформульовано висновки щодо впливу параметрів вольтододавчого трансформатора на роботу активного фільтра.*

Наукова новизна. *Вперше розроблена модель еквівалентного силового кола однофазного послідовного фільтра, яка на відміну від існуючих враховує вплив вольтододавчого трансформатора на параметри режиму.*

Практична цінність. *Внутрішній опір трансформатора та струм навантаження призводять до виникнення гармонік напруги, які додатково впливають на її якість, та за проведеним експериментом складають 2,35%. Збільшення втрат потужності в трансформаторі силового активного фільтру потребує корегування методики його вибору з урахуванням спотворення напруги та струму.*

Ключові слова: якість електроенергії; послідовний силовий активний фільтр; вольтододавчий трансформатор.

I. ВСТУП

Управління режимами енергосистем повинно забезпечити виконання трьох основних вимог: економічність роботи енергосистеми, надійність електропостачання споживачів, нормативна якість електроенергії [1]. Споживачі електроенергії і апарати впливають на режим роботи мережі і через мережу один на іншого. Несиметрія, несинусоїдальність, провали напруги призводять до погіршення роботи пристроїв та виникнення додаткових втрат активної потужності у всіх елементах системи електропостачання [2], а це, в свою чергу, призводить до економічних збитків. Тому на сучасному етапі розвитку електроенергетики, забезпечення якості електроенергії є завданням, яке вирішується шляхом застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв, яким, завдяки використанню напівпровідникових перетворювачів властива керованість.

II. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Пасивні фільтри з незмінною структурою все менш задовольняють вимогам щодо підтримки якості електричної енергії [3]. Як наслідок, розробляються та впроваджуються силові активні фільтри (САФ) [4]. Сучасні активні фільтри є ефективним засобом для розв'язання низки задач, пов'язаних із покращенням показників якості електричної енергії. В залежності від поставленої задачі використовують паралельне або послідовне підключення фільтру.

Паралельний САФ застосовується, в основному, для зниження рівня гармонік струму, компенсації реактивної потужності, що обумовлені наявністю пристроїв з нелінійними вольт амперними характеристиками, які входять до складу навантаження [5].

В разі спотворення форми напруги живлення незалежно від природи виникнення цих спотворень використовують послідовний САФ [4], [5]. При цьому

© Бондаренко С.С., Бялобржеський О.В., 2018
DOI 10.15588/1607-6761-2018-3-2

вплив на струми навантаження не відбувається, незважаючи на деякий вплив за рахунок зміни напруги.

Дане технічне рішення є вкрай необхідним в певних випадках роботи експлуатуючої організації, таких, як:

– тимчасове оперативне вирішення проблеми втрат напруги в ЛЕП великої протяжності (більше 1 кілометра);

– постійне рішення для ЛЕП з відсутністю можливості реконструкції, зважаючи на особливості ландшафту місцевості та інших обмежень, а також при наявності сезонного навантаження і недоцільності проведення глибокої модернізації мережі.

Для підприємства, що експлуатує розподільчу мережу, перевагами вольтододавчого трансформатора є можливість автономної роботи, наявність елементів інтелектуального регулювання, відсутність необхідності експлуатації і мінімальні капітальні витрати при введенні в експлуатацію [6].

Послідовне підключення активного фільтра реалізується через вольтододавочний трансформатор (ВДТ). Застосування ВДТ дозволяє швидко реагувати на погіршення якості електричної напруги та виконувати технологічне приєднання споживачів.

Введення ВДТ в контур призводить до певного параметричного регулювання. Таким чином встановлення та використання послідовного САФ з ВДТ є комбінацією регулювання параметру та режиму. Достатня кількість рішень [7] з регулювання напруги послідовним САФ, залишає відкритим питання впливу трансформатору САФ на його режим та, як наслідок, на ефективність регулювання показників якості електричної енергії.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження параметрів режиму та розподілу потужності трансформатора вольтодобавки при регулюванні якості напруги навантаження.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Послідовний САФ, силова схема якого має напівпровідниковий пристрій, за умов реалізації алгоритму регулювання [9] усуває спотворення напруги мережі живлення за рахунок інжекції гармонік напруги в мережу живлення в проти-фазі. Таким чином САФ формує у своїх мережних провідниках напругу, за гармонійним складом аналогічну напрузі навантаження (за винятком першої гармоніки), але протилежну за знаком. У результаті відбувається взаємна компенсація гармонік напруги навантаження.

Послідовний силовий активний фільтр підключається до мережі через три однофазні двообмоткові вольтододавчі трансформатори, первинною обмоткою до мережі та навантаження, а вторинною обмоткою до силової частини перетворювача фільтру до якого також під'єднаний накопичуючий конденсатор C_1 [10].

Для визначення впливу трансформатора на режим розглядається електрична схема (рис. 1,а). На схемі мережа зі спотвореною напругою $u_м$ послідовно з'єднана з навантаженням, яке задається опором $R_н$ та джерелом спотвореного струму $i_н$. Обмотка трансформатора замикає контур, який забезпечує компенсацію спотворення напруги мережі за рахунок підключення до іншої обмотки трансформатора джерела u_F. Для дослідження впливу трансформатора розглянемо декілька схем заміщення: П-подібна (рис. 1,б) та Т-подібна (рис. 1,в). При цьому характеристика намагнічування магнітопроводу приймається лінійною.

Кожна з схем має застосування у конкретних випадках. В більшості випадків використовується Т-подібна схема заміщення трансформатора. Покладаючи коефіцієнт трансформації одиничним, визначається струм намагнічування:

$$i_\mu = i_1 - i_2 \tag{1}$$

де i_1 – струм первинної обмотки трансформатора, i_2 – струм вторинної обмотки трансформатора.

Відповідно визначається напруга первинної обмотки:

$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_\mu R_\mu + L_\mu \frac{di_\mu}{dt} \tag{2}$$

В результаті – напруга вторинної обмотки:

$$u_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + i_\mu R_\mu + L_\mu \frac{di_\mu}{dt} \tag{3}$$

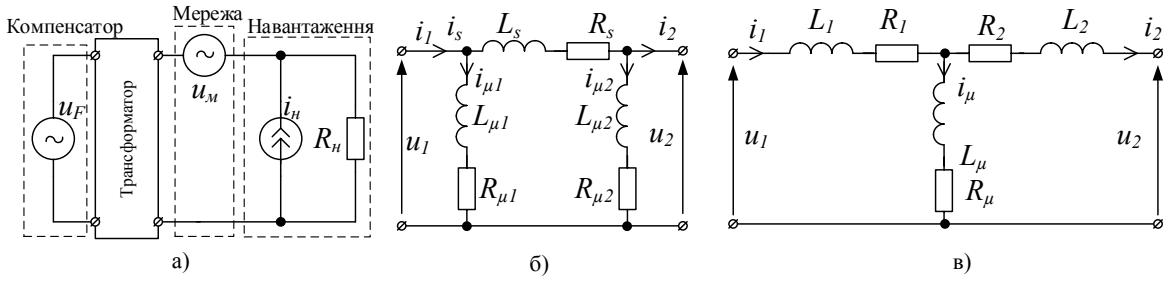


Рисунок 1. Схеми заміщення: а – досліджуваної моделі; б – П-подібна схема заміщення трансформатора; в – Т-подібна схема заміщення трансформатора.

Відмітною особливістю П-образної схеми заміщення є збереження трансформаторних зв'язків обмоток трансформатора [11]. При цьому намагнічування розподіляється між первинною та вторинною обмотками. Це дозволяє врахувати плив на намагнічування потоку енергії і зі сторони первинної обмотки, і зі сторони вторинної обмотки. Струм первинної i_1 обмотки трансформатору пов'язаний зі струмом вторинної обмотки:

$$i_2 = i_s - i_{\mu 2} = i_1 - i_{\mu 1} - i_{\mu 2}, \quad (4)$$

де $i_{\mu 1}, i_{\mu 2}$ – струми намагнічування, віднесені до відповідної обмотки, що відповідають виразу (1) а $i_\mu = i_{\mu 1} + i_{\mu 2}$. При цьому змінюється структура балансу напруг первинної та вторинної обмоток:

$$u_1 = i_{\mu 1} R_{\mu 1} + L_{\mu 1} \frac{di_{\mu 1}}{dt}; \qquad u_2 = i_{\mu 2} R_{\mu 2} + L_{\mu 2} \frac{di_{\mu 2}}{dt}, \quad (5)$$

де $R_{\mu 1}, R_{\mu 2}$ – опори гілок намагнічування; $L_{\mu 1}, L_{\mu 2}$ – індуктивність гілок намагнічування. Напруга вторинної обмотки u_2 відрізняється від напруги первинної обмотки на величину падіння напруги в трансформаторі:

$$u_1 = u_2 + u_s = u_2 + i_s R_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad (6)$$

де u_s – падіння напруги в трансформаторі, R_s – опір трансформатору, L_s – індуктивність трансформатору.

Таким чином, схеми реалізують різний розподіл напруг в трансформаторі та відповідно падіння напруги. При розрахунках і моделюванні режимів роботи трансформатору Т-подібна схема заміщення знайшла найбільше розповсюдження [11], [12].

Для дослідження впливу трансформатору обмотка якого з'єднана послідовно з навантаженням використано модель наведену на рис. 2. В досліджуваній моделі імітується регулювання компенсації спотворень напруги послідовним силовим активним фільтром, підключеним через вольтододаточний трансформатор. Схема послідовного фільтру представлена джерелом е.р.с. Джерело живлення основної гармоніки (AC voltage source 2), послідовно з'єднано з додатковим джерелом (AC voltage source 3), яке генерує напругу третьої гармоніки, спотворюючи результуючу напругу. Послідовно з джерелами з'єднана вторинна обмотка трансформатору (Linear Transformer). Контур замикає навантаження, яке імітується джерелом струму (Controlled Current Source).

Зважаючи на специфіку моделювання джерела струму, паралельно підключено резистор з великим опором (R). Струм навантаження представлений сумою двох сигналів, які генеруються блоками Sine Wave 1 та Sine Wave 2. Джерело компенсуючої напруги (AC voltage source 1) з'єднане з первинною обмоткою трансформатору.

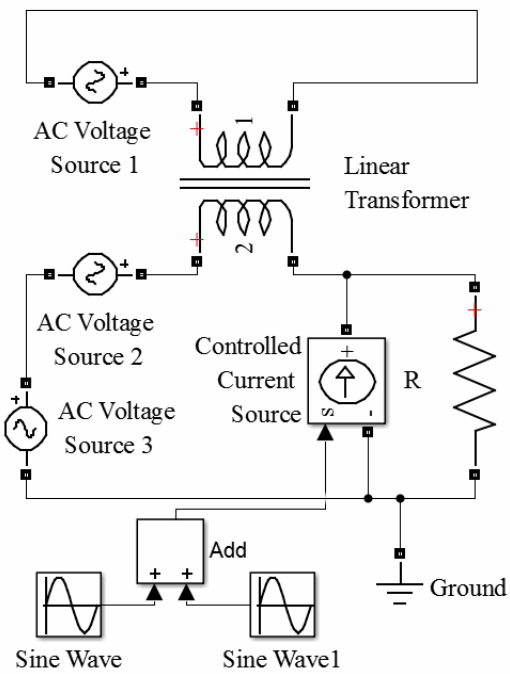


Рисунок 1. Досліджувана модель послідовного силового активного фільтру.

Таким чином емітується режим елементарного контуру зі спотвореною напругою, спотвореним струмом навантаження, причому введенням послідовного трансформатору реалізують компенсацію спотворення напруги. Параметри елементів схеми: AC voltage source 1: U=(sqrt(2)·40)/3.455 В, α=180 deg, f = 3·50 Гц; Linear Transformer: Un=380В, In=10А, R1=0.057 Ом, R2=0.677Ом, Rμ=18051Ом, L1=2.958·10-5Гн, L2=3.53·10-4Гн, Lμ=57.455Гн, Sn=4000 ВА, fn=50 Гц; AC voltage source 2: U= sqrt(2)·200 В, f=1·50 Гц; AC voltage source 3: U= sqrt(2)·40 В, f=3·50 Гц; R=100Ом; Sine Wave 1: U= sqrt(2)·2.8 В, ω=2·π·50·5 с-1; Sine Wave 2: U= sqrt(2)·5.07 В, ω=2·π·50 с-1.

В ході проведення досліджень роботи пристрою були отримані осцилограми та гармоній склад напруги та струму навантаження (рис. 3).

Вихідне викривлення напруги живлення складає 20%. В результаті роботи схеми, шляхом формування напруги компенсації, та введення її у проти-фазі вторинною обмоткою трансформатора, викривлення напруги навантаження складає 2.35% при викривленні струму 91.19% (рис. 3). При цьому під дією 5-ї гармоніки струму навантаження за рахунок відповідного падіння напруги у обмотці трансформатору у спектри напруги навантаження виникає 5-а гармоніка, яка складає 2%.

Зважаючи на дію в обмотках трансформатора гармонік струму та напруги різного порядку виконано дослідження. Так як трансформатор впливає на режим

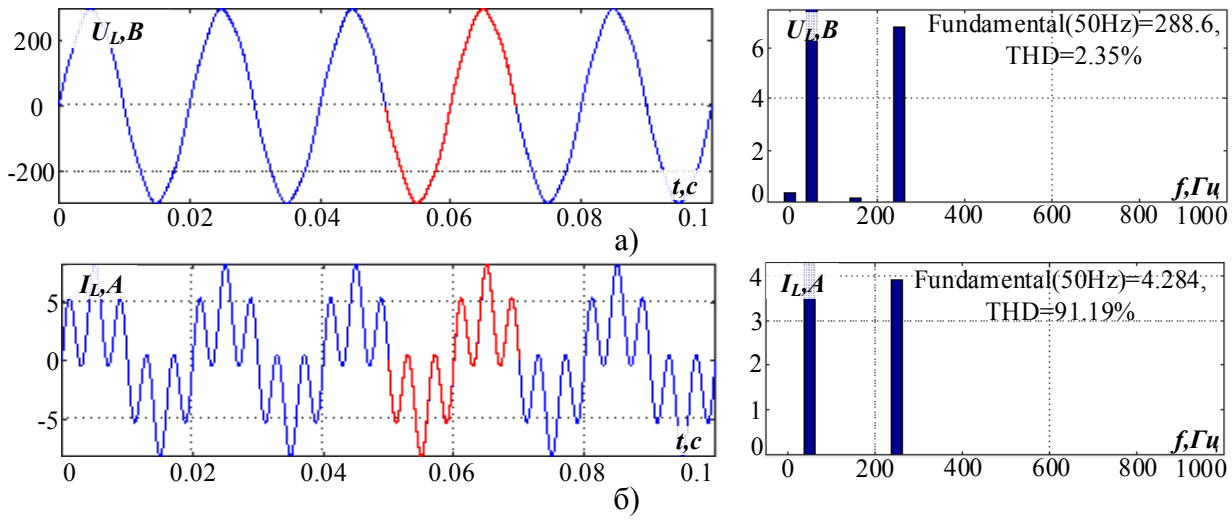


Рисунок 2. Осцилограми та гармонійний склад: а – напруги навантаження; б – струму навантаження.

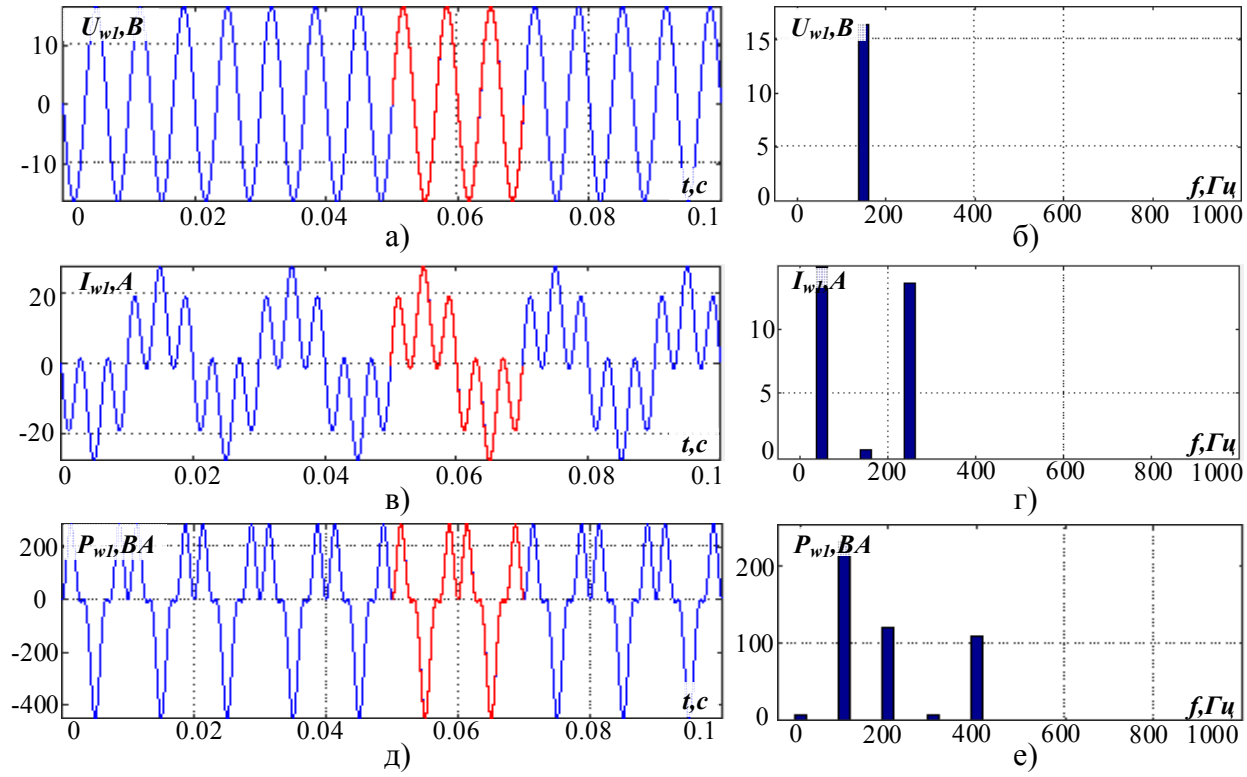


Рисунок 3. Параметри режиму первинної обмотки трансформатора: а – напруга; б – гармонійний склад напруги; в – струм; г – гармонійний склад струму; д – потужність; е – гармонійний склад потужності.

роботи послідовного активного фільтру проведемо аналіз параметрів режиму первинної (рис. 4) та вторинної (рис. 5) обмоток трансформатора. Спотворення мережі задане напругою третьої гармоніки (AC voltage source 3), тому з протилежним знаком задається напруга компенсації (AC voltage source 1) – рис 4.а,б. В результаті цього струм первинної обмотки трансформатору (рис 4. в, г) окрім першої та п'ятої гармонік зумовлених струмом навантаження (рис. 5 в, г) має складову третьої гармоніки зумовлену напругою компенсації. Таким, чином взаємодія струму та напруги призводить до потужності первинної обмотки (рис. 4 д, е), яка має в своєму спектрі гармоніки 0 (13ВА/5.6%), 2 (231ВА/100%), 4 (122ВА/52.8%), 6 (13ВА/5.6%), 8 (111ВА/48%). Напруга вторинної обмотки (рис. 5 а, б) окрім третьої гармоніки, яка компенсує спотворення напруги мережі за рахунок втрат напруги (2) в обмотці при протікання струму наван-

таження (рис. 5 в, г), додатково має першу та п'яту гармоніки, які складають відносно третьої (12.3%) та (14%) відповідно. В результаті потужність вторинної обмотки має в своєму спектрі гармоніки: 0 (24ВА/9.1%), 2 (262ВА/100%), 4 (137ВА/52.2%), 6 (25ВА/9.5%), 8 (102ВА/38.9%), та на відміну від спектру потужності первинної обмотки – 10 (13ВА/4.9%). Якщо додатково визначити різницю між потужністю первинної та вторинної обмоток отримаємо потужність обмоток та магнітопроводу трансформатора, яка має дуже складний спектр (рис. 6).

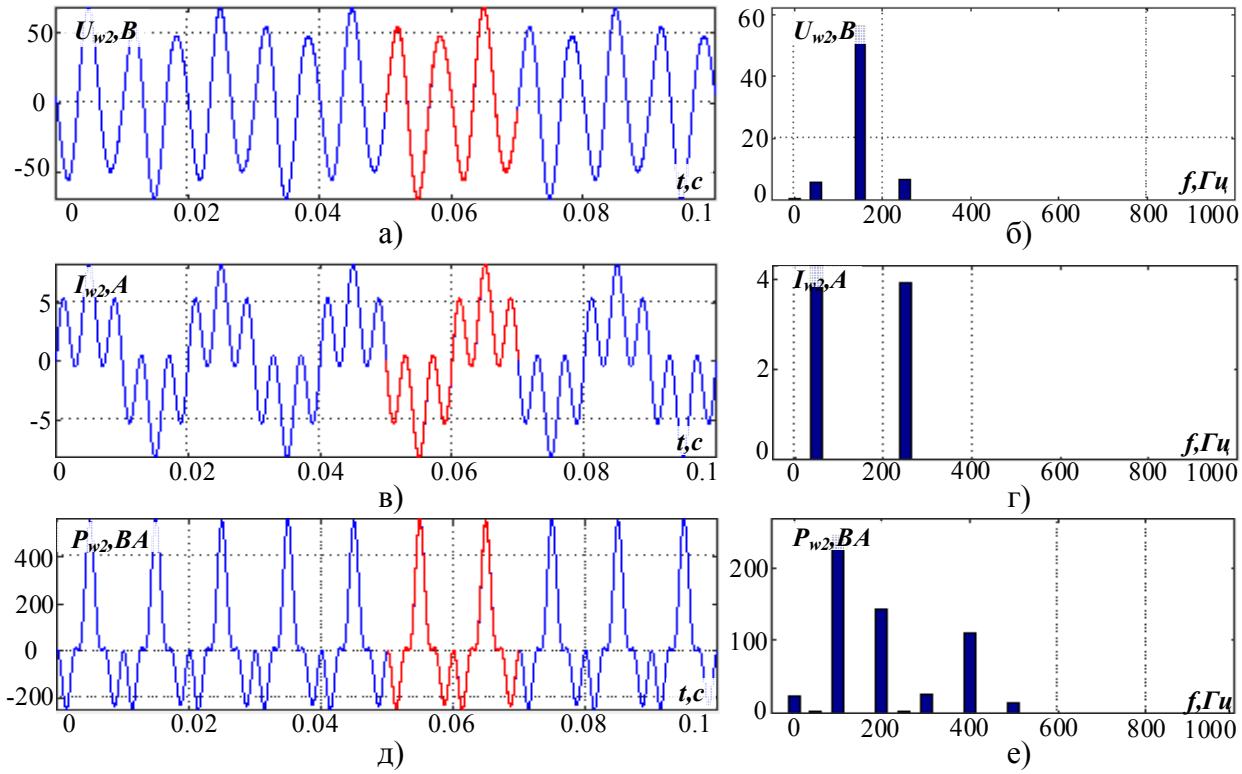


Рисунок 4. Параметри режиму вторинної обмотки трансформатора: а –; б – гармонійний склад напруги; в – струм; г – гармонійний склад струму; д – потужність; е – гармонійний склад потужності.

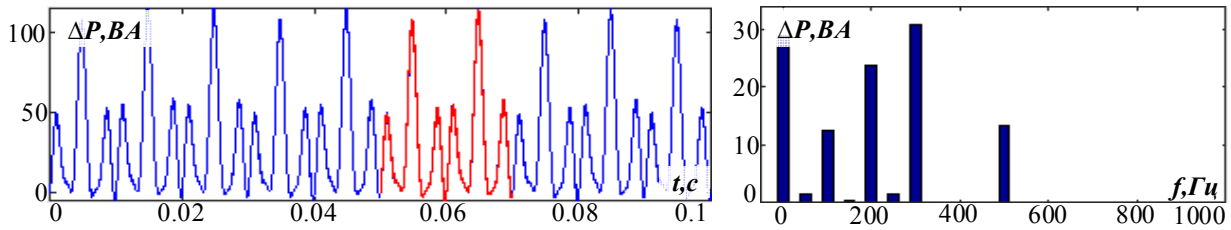


Рисунок 5. Гармонійний склад та осцилограма втрат потужностей в трансформаторі

З урахуванням формул (1)-(3), потужність в обмотках та магнітопроводі трансформатору матиме вигляд:

$$p_{w1} - p_{w2} = \Delta p = i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2 + i_\mu^2 R_\mu + \\ + i_1 L_1 \frac{di_1}{dt} + i_2 L_2 \frac{di_2}{dt} + i_\mu L_\mu \frac{di_\mu}{dt}. \quad (7)$$

У загальному випадку інтегральну потужність втрат в трансформаторі представляють у вигляді суми втрат потужностей:

$$\Delta P = \Delta P_{ст} + \Delta P_{м} \quad (8)$$

де $\Delta P_{ст}$ – втрати в сталі, $\Delta P_{м}$ – втрати в обмотках трансформатора. Зважаючи на характер потужності трансформатору (рис. 6) треба враховувати дію вищих гармонік. Додаткові втрати в обмотках трансформатору викликані зростанням опору для струмів вищих гармонік ν [3]:

$$\Delta P_\nu = \sum_\nu \left(I_{1.\nu}^2 R_{1.\nu} + I_{2.\nu}^2 R_{2.\nu} \right) \quad (9)$$

Додаткові втрати в сталі викликані зростанням частоти перемагнічування магнітопроводу:

$$\Delta P_{\ ст.\nu} = \Delta P_{ст.n} \sum_\nu \left(\frac{U_\nu}{U_n} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_\nu}{50} \right)^{1.3} \quad (10)$$

де U_ν – напруга гармоніки; f_ν – частота гармоніки $\Delta P_{ст.n}$ – втрати намагнічування трансформатора.

ВИСНОВКИ

Ефективність компенсації викривлення напруги залежить не тільки від якості формування напруги компенсації, а й від параметрів режиму трансформатору який послідовно з'єднаний з навантаженням, та забезпечує режим.

Створена модель еквівалентного силового кола однофазного послідовного фільтру, в результаті дослідження якої встановлено, що внутрішній опір трансформатору та струм навантаження призводять до виникнення гармонік напруги, які додатково впливають на її якість, та у разі проведеного експерименту складають 2,35%.

Встановлено, що трансформатор послідовного силового активного фільтра в режимі вольтододаточного, при компенсації спотворення напруги мережі в загальному випадку має напругу та струм обмоток, гармонійний склад яких відрізняється, це призводить до широкого гармонійного складу потужності трансформатора, що потребує обліку зростання втрат в обмотках та магнітопроводі.

Збільшення втрат потужності в трансформаторі силового активного фільтру потребує корегування методики його вибору з урахуванням спотворення напруги та струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Sankaran, C. Power quality [Text] / C. Sankaran. – Florida: CRC press. – 2017. – 216p.

[2] Bhim, S. Power quality [Text] / S. Bhim, C. Ambrish, A. Kamal. New York City: John Wiley & Sons. – 2014. – 600p.

[3] Dugan C., Electrical Power System Quality [Text] / C. Dugan, F. Mcgranaghan, S. Santoso. New York City: McGraw-Hill Education. – 2012. – 580p.

[4] Thomas F. Fundamentals of Electronics: Book 3 Active Filters and Amplifier Frequency Response [Text] / F. Thomas, Jr. Schubert, M. Ernest. San Diego: Morgan & Claypool Publishers. – 2016. – 292p.

[5] Lin, Tayzar. Design of Shunt Active Filter & Harmonic Compensation. [Text] / Lin Tayzar. LAP: Lambert Academic Publishing. – 2016. – 253p.

[6] Mohammad, A. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. [Text] / A. Mohammad, S. Masoum, Ewald F. Fuchs Cambridge: Academic Press. – 2015. – 1141p.

[7] Akagi, H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning [Text] / H. Akagi., E. H. Watanabe., M. Aredes. Piscataway: IEEE Press. – 2017. – 454p.

[8] Колб, А.А. Електромагнітні процеси в силових активних компенсаторах неактивних складових потужності [Текст] / А.А. Колб // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. – №4. – С.160–165.

[9] Жуйков, В. Я. Особливості режимів роботи ФКП [Текст] / В. Я. Жуйков, Д. А. Миколаєць // Технічна електродинаміка. – 2011. –№1. – С. 24–29.

[10] Алексеев, Б.А. Активные фильтры высших гармоник [Текст] / Б. А. Алексеев // Электро. – 2007. – № 3. – С. 28–32.

[11] Бондаренко, С. С. Дослідження впливу трансформатора послідовного активного фільтра на якість напруги [Текст] / С. С. Бондаренко, О. В. Бялобржеський, Р. В. Власенко // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2018. – № 1. – С. 93-101. – Режим доступу: DOI: 10.15588/1607-6761-2018-1-10.

[12] Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники [Текст] / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. – М.: Лань. – 2016.– 736 с.

[13] Кувшинов, Г.Е. Схемы замещения трансформатора [Текст] / Г.Е. Кувшинов, М.В. Красковский. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет. – 2016.– 136 с.

[14] Власенко, Р. В. Limitations of current of the three-phase active power filter in the conditions of overload and short circuit [Текст] / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка і Електромеханіка. – 2018. – № 2– С. 29-34.

[15] Черных, И. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. Черных. – М.: ДМК Пресс. – 2011.– 288с.

[16] Zakis, J. Feasibility study of flexible systems for reactive power compensation [Text] / J. Zakis, D. Vinnikov, J. Laugis, I. Rankirs // Juris Zakis. – 2010. – №4. – P.14-20.

[17] WangMan-Chung Lei. Adaptive Hybrid Active Power Filters [Text] / Lei WangMan-Chung WongChi-Seng Lam. – New York City: Springer. – 2010. – 232 p.

[18] Vangenthaym, F. L. Aktive Filter und Oszillatoren / F. L. Vangenthaym. – M.: Technosphere. – 2010. – 416p.

[19] Власенко, Р. Корекція алгоритму визначення заданого струму силового активного фільтра на основі теорії фрізе в умовах несиметрії / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський [Текст] // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 1. – С. 57-63. – Режим доступу: DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-8.

Стаття надійшла до редакції 23.08.2018

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ КОЕФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

БОНДАРЕНКО С.С. аспирант кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: sergj1994@gmail.com;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: seemAl@kdu.edu.ua;

Цель работы. *Исследовать параметры режима и распределения мощности трансформатора вольтодобавки при регулировании коэффициента нелинейных искажений напряжения.*

Методы исследования. Методы электротехники, методы численного моделирования, методы рядов Фурье.

Полученные результаты*. В работе проведен анализ применения известных схем замещения для вольтодобавочного трансформатора, в среде визуального программирования разработана модель, имитирующая работу фильтра, проведено исследование и рассмотрены процессы, протекающие в трансформаторе. На основании анализа результатов моделирования, показана сложность спектра мощности трансформатора в условиях работы в режиме вольтодобавки при искажении формы тока и напряжения. В случае искажения напряжения питания используют последовательный силовой активный фильтр, который подключается к сети через вольтодобавочные трансформаторы, приводит к изменению параметров эквивалентного силового контура нагрузки. В результате исследований установлено, что трансформатор последовательного силового активного фильтра в режиме вольтодобавочного, при компенсации искажения напряжения в общем случае имеет напряжение и ток обмоток, гармонический состав которых отличается, это приводит к широкому гармонического состава мощности трансформатора, что требует учета роста потерь в обмотках и магнитопроводе. Сформулированы выводы касательно воздействию параметров вольтодобавочного трансформатора на работу активного фильтра.*

Научна новизна. *Впервые разработана модель эквивалентной силовой цепи однофазного последовательного фильтра, которая в отличие от существующих учитывает влияние вольтодобавочного трансформатора на* ***параметры режима.***

Практическая ценность. *Внутреннее сопротивление трансформатора и ток нагрузки приводят к возникновению гармоник напряжения, которые дополнительно влияют на ее качество, и в случае проведенного эксперимента составляют 2,35%. Увеличение потерь мощности в трансформаторе силового активного фильтра нуждается в корректировке методики его выбору с учетом искажения напряжения и тока.*

Ключевые слова: качество электроэнергии; последовательный силовой активный фильтр; вольтодобавочный трансформатор; искажение напряжения.

DISTRIBUTION OF THE POWER OF THE A POWER ACTIVE FILTER BOOSTER TRANSFORMER FOR REGULATING OF THE NONLINEAR VOLTAGE DISTORTIONS COEFITIENT

BONDARENKO S.S. post-graduate student of the Department of Power Supply and Energy Management Systems of the Kremenchuk National University, Kremenchug, Ukraine, e-mail: sergj1994@gmail.com;

BIALOBRZHESKYI O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Power Supply Systems and Energy Management of the Kremenchug National University. Mikhail Ostrogradsky, Kremenchug, Ukraine, e-mail: seemAl@kdu.edu.ua;

Purpose. *Investigate the parameters of the mode and distribution of the power of the transformer of the booster when adjusting the coefficient of the nonlinear distortion of the voltage.*

Methodology. *Methods of electrical engineering, numerical simulation methods, Fourier series methods.*

Findings. *The analysis of the transformer is carried out, the processes taking place in the transformer are consid-*

ered, the filter model is developed in the visual programming environment, based on the analysis of which the application efficiency of the proposed solution is shown by the load voltage distortion. To assess the influence of the transformer on the operating mode of the device, a series of experiments was carried out. In the case of distortion of supply voltage, a serial active power filter is used that connects to the network through series transformers, which results in changes in the parameters of the equivalent power load circuit. As a result of the research it was established that the transformer of a series power active filter in the series mode, in case of compensation of voltage distortion of the network in general, has the voltage and current of the windings, the harmonic composition of which is different, this leads to a broad harmonious composition of the power of the transformer, which needs to account for the growth of losses in windings. and the magnetic circuit. The conclusions are drawn that to the effect of the parameters of the transformer on the operation of the active filter.

Originality. *For the first time a model of an equivalent force single-phase sequential filter has been developed, which, unlike the existing one, takes into account the effect of the series transformer on the parameters of the mode.*

Practical value. *The internal resistance of the transformer and the load current lead to the emergence of voltage harmonics, which additionally affects its quality, and in the case of an experiment made up 2,35%. An increase in power losses in a transformer of a power active filter requires an adjustment of the method of its selection, taking into account distortion of voltage and current.*

Keywords: power quality; serial power active filter; series transformer; voltage distortion.

REFERENCE

[1] Sankaran, C. (2017). Power quality. Florida: CRC press, 216.

[2] Bhim, S., Ambrish, C., Kamal, A. (2014). Power quality.New York City: John Wiley & Sons, 600.

[3] Dugan C., Mcgranaghan F., Santoso S. (2012). Electrical Power System Quality. New York City: McGraw-Hill Education, 580.

[4] Thomas F. Schubert Jr., Ernest M. Kim (2016). Fundamentals of Electronics: Book 3 Active Filters and Amplifier Frequency Response. San Diego: Morgan & Claypool Publishers, 292.

[5] Lin Tayzar (2016). Design of Shunt Active Filter & Harmonic Compensation. LAP Lambert Academic Publishing, 253.

[6] Mohammad, A.S. Masoum, Ewald F. Fuchs (2015). Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. Cambridge: Academic Press, 1141.

[7] Akagi, H. Watanabe, E. H. (2017). Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway: IEEE Press, 454.

[8] Kolb, A.A. (2009). Elektromagnitni procesi v silovih aktivnih kompen-satorah neaktivnih skladovih potuzhnosti [Electromagnetic processes in power active filters of inactive components of capacity]. *Transaction of Kremenchuk State Polytechnic University*, 2, 160-165. [in Ukraine].

[9] Zhujkov, V.Y. (2011). Osoblyvosti rezhymiv roboty FKP [Specialized mode of work FKP]. *Tekhnichna elektrodynamika,*. 1, 24-29 [in Ukraine].

[10] Alekseev, B.A. (2007). Aktivnyye fil'try vysshikh garmonik [Active filters of higher harmonics]. *Elektro*, 3, 28–32 [in Russia].

[11] Bondarenko, S., Bialobrzheskyi, O., & Vlasenko, R. (2018). Investigation of the influence of the transformer of a series active filter on the quality of voltage. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 93-101. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-10 [in Ukraine].

[12] Ivanov, I.I., Solovev, G.I., Frolov, V.Ya. (2016). Elektrotekhnika i osnovy elektroniki [Electrical engineering and basic electronics]. *Lan*, 736 [in Russia].

[13] Kuvshinov, G.E. (2016). Skhemy zameshcheniya transformatora [Schemes of substitution of the transformer]. Far Eastern Federal University, 136.

[14] Vlasenko, R.V., Byalobrzheskij, O.V. (2018). Limitations of current of the three-phase active power filter in the conditions of overload and short circuit. *Electrical Engineering & Electromechanics,* 2, 29-34 [in Ukraine].

[15] Chernyh, I. (2011). Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink [Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. DMK Press, 288 [in Russia].

[16] Zakis, J., Vinnikov, D., Laugis, J., Rankirs, I. (2010). Feasibility study of flexible systems for reactive power compensation. Springer, 14-20.

[17] WangMan-Chung, Lei WongChi-Seng, Lam (2018). Adaptive Hybrid Active Power Filters. New York City: Springer, 232 p.

[18] Vangenthaym, F. L. (2010). Active Filter und Oszillatoren. Technosphere, 416.

[19] Vlasenko, R., & Bialobrzeski, O. (2016). Correction algorithm for determining the given current active power filter based on the theory power fryze in terms of asymmetry. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 57-63. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-8 [in Ukraine].

УДК 681.523:621.22

СИСТЕМНІ ВИМОГИ ДО ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

РАДЧЕНКО В. В. канд. техн. наук., доцент, доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна, e-mail: radchvv@ukr.net;

Мета роботи. *Визначення резервів основного обладнання з погляду системної ролі гідроелектростанцій.*

Методи досліджень. *Комплексний поліпредметний підхід до аналізу й визначення діючих складових генерації та основного енергетичного обладнання.*

Отримані результати. *Наведена актуальність і основа системних вимог до ефективності енергетичного обладнання гідроелектростанцій, що дозволяють забезпечувати формування необхідного функціонального рівня процесу генерації. Розглянуті особливості основних компонентів технології перетворення і їх взаємодії. Відображені впливи складових наскрізного тракту процесу генерації. Отримані характеристики ефективності перетворення в умовах системної режимної мобільності. Показані основні можливості й шляхи організації ефективного енергоінформаційного обміну на рівні гідрогенератора. Запропоновані шляхи підвищення ефективності роботи діючого обладнання гідроелектростанцій.*

Наукова новизна. *Запропоновано поліпредметну конкретизацію системного підходу для визначення резервів обладнання та підвищення ефективності генерації, що дозволяє визначити динамічні складові генерації та критерії ефективності діючого обладнання гідроелектростанцій.*

Практична цінність. *Визначено системні вимоги до наскрізного тракту енергетичних перетворень та підвищення ефективності генерації основного обладнання гідроелектростанцій за його системної ролі.*

Ключові слова: гідроенергетика; резерв потужностей; динаміка гідроагрегату; гідрогенератор; ефективність.

I. ВСТУП

Гідроенергетика має особливу й важливу системну роль в формуванні збалансованої національної енергетичної сфери та надає можливості оперативного реагування на зміну її режимів.

Національні гідроенергетичні системи досить потужні й важливі технічні об'єкти, втілюють не тільки складні, багатоступеневі енергетичні перетворення. Вони вирішують ще й низку гідротехнічних, кліматичних та екологічних проблем, в тому числі й регіональних. Тому до підвищення їх показників увага не випадкова.

Системна роль вітчизняної гідроенергетики, визначена у вигляді динамічного резерву потужностей енергетичної системи, обумовлює підвищенні вимоги до поточних технічних характеристик обладнання, в тому числі динамічних, та ефективності його використання.

Можливість роботи Дніпровської гідроелектростанції (ГЕС) у компенсаційному й піковому режимах та майже хвилинна готовність гідроагрегатів, забезпечує не тільки стабільність системну, але й помірне фінансове навантаження споживачів відносно пікових системних процесів.

Саме тому ефективність роботи енергетичного обладнання суттєво залежить від врахування основних системних складових, важливих з погляду сучасних вимог до реалізації технологічних процесів генерації ГЕС.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

ГЕС та їх енергетичне обладнання за ознаками повною мірою відповідають техніці великих складних систем [1], що вимагає відповідної деталізації системних підходів до аналізу ефективності та побудови складових процесів генерації. Тому необхідною й своєчасною є увага практично до всіх ланок процесу енергетичних перетворень з погляду їх ефективної реалізації, [2]. Основними елементами зазначеної ланки на рівні гідроагрегатів ГЕС є гідротурбіна та гідрогенератор.

Схеми заміщення гідрогенераторів з електричним еквівалентом механічної потужності певною мірою сприяють уніфікації методик та алгоритмів досліджень за основними принципами системності [3], однак вони не деталізують робочих складових технологічних процесів, особисто ГЕС. Разом з тим, необхідно враховувати особливості й базові принципи побудови та властивості електромеханічних перетворювачів ГЕС, [4].

Гідромеханічні енергетичні перетворювачі – турбіни розраховані розробниками переважно на стабільні режими навантажень, що забезпечують їх досить високу ефективність, [5], [6]. Однак дані динамічної ефективності гідравлічних турбін, відповідні сучасній системній ролі гідроенергетики, практично відсутні.

Рівень та якість інформаційного забезпечення процесів керування [7], [8] теж досить суттєво впливає на ефективність генерації. Особливо важливо це за умов режимної реалізації зазначеного мобільного

© Радченко В.В., 2018
DOI 10.15588/1607-6761-2018-3-3

резерву потужностей агрегатами ГЕС.

Тому актуальним та своєчасним є напрям досліджень ефективності первинних перетворювачів енергії ГЕС за деталізованим системним підходом. Це важливо також з погляду можливостей практичної модернізації енергетичного обладнання ГЕС з погляду сучасних системних вимог.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є визначення поточних резервів та шляхів підвищення ефективності основного обладнання ГЕС з погляду його сучасної системної ролі - мобільного резерву потужностей національної енергетичної системи.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У якості базового об'єкта досліджень обрана Дніпровська ГЕС. Для цього є щонайменше декілько вагомих причин. Це одна з найперших та найпотужніших вітчизняних ГЕС, реалізованих за системним планом державної електрифікації. З початку її побудови минуло вже майже 90 років. Це досить поважний вік для такої потужної гідротехнічної споруди, зважаючи на те, що встановлені потужності за цей час теж суттєво змінилися від 640 до 1500 МВт. Тому й увага до неї підвищена.

З іншого боку, проведені добудови й модернізації за зазначений час, що фактично подвоїли встановлену потужність обладнання, суттєво підвищили загальне технологічне навантаження. Змінилась також і системна роль гідроенергетики, що теж суттєво впливає на експлуатаційні режими обладнання. Однак, навіть зміна системної ролі теж фактично не врахована в повній мірі, що загалом не сприяє ефективній генерації ГЕС – досить коштовних енергетичних об’єктів, що забезпечують найнижчу вартість пікової енергії.

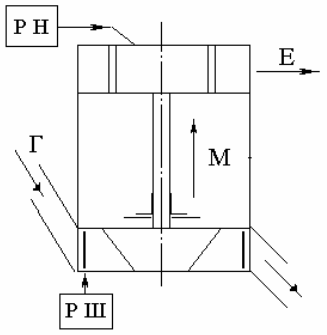
Слід зазначити, що Європа, не маючи таких можливостей, вимушено забезпечує пікові потреби використанням дорогих газотурбінних станцій, з досить низьким загальним ККД, близько 25% та функціональною готовністю приблизно 10 хв., що суттєво підвищує вартість пікової енергії. Тому проблема покриття пікових навантажень в сучасній енергетиці досить загострена.

Однак, саме така робота обладнання ГЕС, в якості динамічного резерву системи, має наслідком підвищені навантаження та втрати перехідних процесів, з якими неможливо не рахуватися, зважаючи на статистику зростання робочих циклів агрегатів, притаманну зазначеній вище ролі.

Узагальнена технологічна схема первинного енергетичного перетворювача ГЕС – гідроагрегата наведена на рис. 1. Вона містить регулятори процесу та основні діючі впливи [2].

Така модель дозволяє системно розглядати діючі впливи технологічного процесу гідроагрегату. Реалізує комплексний підхід до аналізу й визначення потрібних складових, що дозволяє провести аналіз наскрізного технологічного тракту перетворення енергії ГЕС [9].

Важливим є те, що наскрізний технологічний тракт ГЕС практично реалізує складну схему енергетичних перетворень, що послідовно включає гідравлічну, механічну та електричну складові: Г → М → Е. Кожна зі складових має свої технологічні обмеження.



Г – потік гідравлічний; М – потік механічний; Е – потік електричний; РН – регулятор напруги; РШ – регулятор швидкості.

Рисунок 1. Узагальнена технологічна модель перетворювача ГЕС.

Запропонований підхід дозволив визначити існуючий стан й шляхи підвищення ефективності ГЕС дефіцит мобільних потужностей яких досить гостро відчувається в енергетичній системі. Для цього з’ясовано наступне:

- витрати активної електричної енергії на збудження гідрогенераторів разом складають 3,71% від загальних обсягів виробленої енергії;

- витрати енергії гідрогенераторами в режимі синхронної компенсації становлять 2,44% від обсягів вироблення активної енергії за рік;

- власні потреби станції складають 3,14% від обсягів виданої енергії;

- втрати на шинах розподільчого пристрою становлять 3,97%;

- рівень ефективності гідроагрегата суттєво залежить від навантаження, так на рівні 50%, ККД зменшується на 22%;

- витрати енергії в режимі синхронної компенсації становлять 5%, що майже вдвічі менше витрат холостого ходу, які для кожного гідроагрегату Дніпровської ГЕС рівнозначні втратам 7,2 Мвт. год. на рік;

- втрати генерації суттєво зростають при відхиленні потужності гідроагрегата понад 5%;

- втрати на перехідних режимах, що становлять до 60 сек. переважно пов’язані з проточним трактом.;

- характеристики гідроагрегата нелінійні, суттєво залежить від навантаження, ККД на рівні 50% змен-

шується з 92% до 70%;

- витрати неробочого ходу складають 10% протоку крізь турбіну для кожного гідроагрегату;

Слід зазначити – витрати первинного джерела енергії мають тенденцію переважного впливу на ефективність гідроагрегату. Тоді загальний ККД ГЕС становить щонайменше 95, 12%. Однак його характеристика суттєво нелінійна (рис. 2).

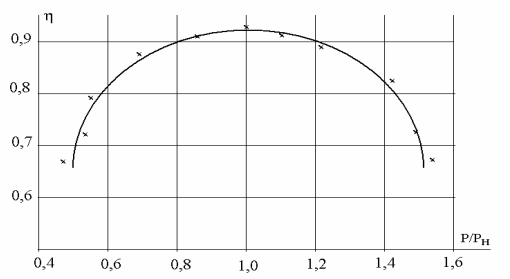


Рисунок 2. Зміна ККД ГЕС за навантаженням.

Слід зазначити, що наведені значення відображають переважно статичні чинники ефективності в роботі гідроенергетичного обладнання. При цьому існують певні технологічні, технічні резерви й можливості поліпшення якісних характеристик. Проте, на практиці найчастіше такі поліпшення досягаються ціною невиправданого технічного ускладнення обладнання, явної функціональної надмірності й неспіврозмірної витрати енергоносія. Це, у свою чергу, спричиняє масу технічних, екологічних і соціальних проблем, безпосередньо впливає на ефективність процесів та обладнання ГЕС.

Основним чинником, суттєво стримуючим розвиток сучасної енергетики є виражені умови її екологічності. Поширене рішення вказаної проблеми тільки засобами енергозбереження, точніше обмеження енерго використання без істотного підвищення ефективності процесів первинного перетворення енергії на сучасному етапі технічного прогресу практично неможливе. Тільки комплексні рішення здатні вирішити таку важливу й нагальну проблему підвищення віддачі енергетики, а також зняти багато існуючих технічних і екологічних обмежень.

Однак існуючі динамічні складові перехідних процесів суттєво знижують ефективність роботи первинних енергетичних перетворювачів ГЕС. Слід враховувати, що число робочих циклів обладнання ГЕС протягом останніх років має стійку тенденцію зростання. Так гідроагрегати Дніпровської ГЕС за останні роки подолали відмітку 5000 робочих циклів на рік й досить швидко наближаються до значень, що переважають 8000 циклів. Це означає, що час сталої роботи агрегату, для якої визначено й нормовано практично всі робочі характеристики обладнання, неупинно скорочується, а динамічна складова зростає.

Критерій ефективності процесу гідроенергетичного перетворення в загальному вигляді

$$K_E = G/P, \tag{1}$$

де G – первинний ресурс перетворений в електричну складову; P – енергетичний ресурс проточного тракту гідроагрегату.

Таким чином можливо оцінити загальну ефективність не тільки наскрізного тракту перетворення енергії, але й гідроенергетичного перетворювача. Проте в даному випадку існує проблема точності обліку важливої складової – ресурсу проточного тракту.

Ефективність гідроенергетичної системи на прикладі основної функціональної одиниці – гідроагрегату, визначається щонайменше трьома основними групами складових: гідравлічними, механічними й електричними, що природно витікає з схеми технологічного процесу ГЕС. Саме їх поєднання забезпечує загальний рівень функціональності і ефективності.

$$R_E = \sum_{i=0}^{N} G_i + \sum_{k=0}^{M} M_k + \sum_{l=0}^{J} E_l, \tag{2}$$

де G_i, M_k, E_l – відповідно гідравлічні, механічні й електричні діючі складові ефективності.

Системні вимоги до ефективності гідроагрегатів мають й динамічний аспект. Динамічні складові періодичної дії, позначаються переважно на перехідних процесах і змінах робочих режимів

$$R'_Д = \frac{dG}{dt} + \frac{dM}{dt} + \frac{dE}{dt}. \tag{3}$$

Їх інтегровану дію можливо представити як

$$R_Д = \int_0^{t_П} G_Д + \int_0^{t_П} M_Д + \int_0^{t_П} E_Д, \tag{4}$$

де $G_Д$, $M_Д$, $E_Д$ – динамічні складові перехідного процесу гідроагрегату.

Проте дані по динамічним складовим ефективності гідроенергетичних перетворювачів практично відсутні. Тому важливо визначати системний вплив окремих груп фізичних чинників.

Важливу роль в ефективності гідроагрегату відіграють характеристики регуляторів: РН та РШ. Робочу основу вказаних регуляторів складають технічні засоби цифрової обробки сигналів, [10] – [12] а також якість інформаційного забезпечення технологічного процесу генерації.

Для багатовимірного енергетичного об'єкту, яким за своєю технічною суттю є гідроагрегат, об'єднаний умовами режимної єдності технологічного процесу, структурно–функціональний опис можливо представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} u_a &= X_a\, I_a + G\, U_f \\ P &= M \cdot \omega_0 \end{aligned}. \tag{5}$$

Перше матрично–векторне операторне рівняння

безпосередньо відображає процес формування рівня основного електричного параметра гідрогенератора – його напруги u_a. Воно включає взаємодію фізичних параметрів машини і управління збудженням, де множина G фактично відображає інформаційну складову зміни напруги гідрогенератора.

Друге, з наведених рівнянь, фізично відображає загальну потужність генерації через дію гідромеханічної частини агрегату з регулятором швидкості, що забезпечує другий важливий системний параметр – частоту f, та реалізується балансним методом енергоінформаційного обміну гідроагрегату. Тоді чинник інформаційний є відображенням

$$G : T \times u \to I \,. \qquad (6)$$

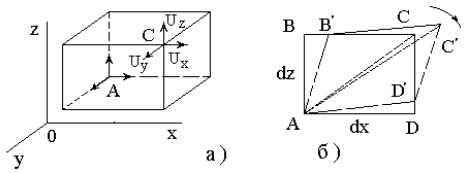
При цьому виникає ряд практичних питань про те, що саме представляє така інформація, якою має бути і в якому вигляді необхідна, а також як вона позначається на структурах і характеристиках відповідних систем, [13], [14]. Очевидно, що діючі кількісні підходи не відповідають умовам системного інформаційного забезпечення й не сприяють ефективності генерації ГЕС. Продуктивним шляхом системних рішень в інформаційній технологічній царині мають бути змістовні складові процесів, [17].

Основним чинником перетворення кінетичної енергії рідини є її швидкість [5]. Механіка рідини визначає швидкість потоку на основі формули Торічеллі

$$V = \varphi_0 \sqrt{2g \cdot h} \,, \qquad (7)$$

де φ_0 – коефіцієнт швидкості та втрати натиску.

При цьому існує об'ємна рухливість рідкого середовища на рівні елементарних часток потоку, модель якого можливо представити у вигляді рис. 3.



а) одиничний об'єм; б) складові нерівномірності й деформації

Рисунок 3. Узагальнена модель руху рідкого середовища.

Наведена об'ємна модель відображає характер руху окремих часток потоку рідини в часі. Кожна мала частинка рідини при русі змінює не тільки своє відносне положення, але й форму. Зміна форми безпосередньо пов'язана з тим, що швидкості в різних точках частинки різні за величиною та напрямом. Відповідні кутові деформації за координатами мають вигляд:

$$\theta y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}\right); \quad \theta z = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}\right). \qquad (8)$$

Наведені залежності відображають гідроенергетичні процеси мікро й макрорівнів. У загальних енергетичних характеристиках процесів вони найчастіше інтегруються й усереднюються, але впливають на загальну ефективність процесу.

Канал генерації енергії гідроагрегатом пов'язує між собою дві різнорідні пружні системи гідравлічну й електричну (рис. 4). Представлення наскрізного каналу перетворення енергії гідроагрегатом у вигляді пружної гідроелектродинамічної моделі дозволяє розглянути єдність впливів різнорідних стихій. При цьому обидві системи можуть бути представлені еквівалентними пружними елементами з певними характеристиками.

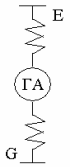


Рисунок 4. До аналізу впливів каналу перетворення енергії.

Елемент G відповідає властивостям гідравлічної складової процесу з її обмеженнями, а елемент E – відповідно електричної складової. Такий підхід дозволяє поєднати технологічні складові процесу генерації та врахувати діючі властивості й обмеження. Це також може бути основою теоретичної моделі взаємних впливів середовищ (рис. 5).

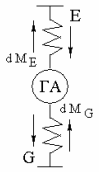


Рисунок 5. Основа гідро електродинамічної моделі.

Наведена модель дозволяє системно розглядати роботу гідроагрегату з урахуванням фактичних впливів двох метасистем: гідравлічної й електричної, що пов'язують наскрізний потік перетвореної енергії. Тоді динамічна складова гідроагрегату має вигляд

$$dM_{ГА} = \sum_{i=0}^{N} dM_{Gi} + \sum_{j=0}^{K} dM_{Ej} \,. \qquad (9)$$

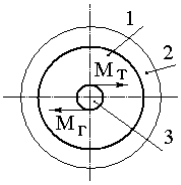
Рівняння обертання валу гідроагрегату має вигляд

$$J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_{Г} + M_{ЕЛ} \,, \qquad (10)$$

де J – момент інерції ротора, ω – частота обертання, $M_{ЕЛ}$ – електричний момент ротора гідрогенератора, $M_{Г}$ – гідравлічний момент турбіни.

Таким чином, в робочому стані, на вал гідроагре-

гату діють дві основних активних складових моменту, спрямовані протилежно: гідромеханічна й електромеханічна (рис. 6).



1 – турбіна, 2 – гідрогенератор, 3 – вал гідроагрегату.

Рисунок 6. Схема взаємодії активних складових гідроенергетичного процесу.

Проте на практиці наведені складові досить часто є поточною множиною діючих зусиль {Мт} = {Мг}.

Слід зазначити, що компонентами багатьох складових зазначених множин є величини переважно змінні. При цьому, існуючі інтегральні підходи до оцінки вказаних впливів на достатньому рівні відображають їх усереднені значення, але не в змозі забезпечити об'єктивні дані про поточні зміни. Тому основні динамічні чинники істотних складових можуть і мають виділятися й розглядатися як самостійні складові вказаних процесів.

Рівняння руху ротора агрегату можна записати у вигляді:

$$\frac{J}{k}\cdot\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2}+D\frac{\partial\theta}{\partial t}+M_c\cdot\theta=M_г, \qquad (11)$$

де θ – кут навантаження; M_C – питомий синхронізуючий момент.

В свою чергу, це є рівняння гармонійного осцилятора з власною частотою та добротністю. Наслідком є те, що під дією збурюючого моменту, синхронна машина здійснює синхронні гойдання. При цьому змінюється кут θ. Відповідно змінюються електричний момент і потужність генератора. Частота синхронних гойдань гідрогенератора знаходиться в діапазоні 0,5 – 3 Гц. Однак, на них впливають ще й коливання проточної частини гідроагрегату.

Впливають також істотні постійні часу ПІД–регулятора швидкості турбіни. Вони також вносять вагомий внесок за контуром управління в коливальну складову роботи агрегату, девіацію й поточні втрати потужності, а також істотно знижують загальний рівень його динамічної ефективності. Крім того, важливою причиною турбулентних пульсацій потоку є нестійкість руху рідини.

При критичних параметрах потоку, визначуваних числом Рейнольдса, випадкові хвилі збурень в рідині не затухають, а навпаки посилюються. При цьому відбувається якісна зміна структури потоку й характеру його руху. Із стаціонарного, ламінарного руху, потік переходить в турбулентний. Частинки рідини при цьому не рухаються по стабільних траєкторіях, а змінюються у просторі та часі, потік стохастично пульсує й об'ємно перемішується.

При перехідних процесах, нерозрахункових режимах і інших нештатних ситуаціях у відсмоктуючій трубі за певних умов можливо виникнення турбулентного вихрового, або кавітаційного джгута (рис. 7).

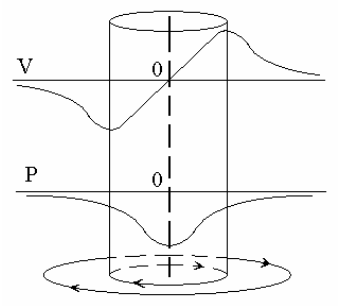


Рисунок 7. Загальна схема формування вихрового джгута.

Так, в гідротурбіні відбувається унікальне поєднання різнорідних чинників впливу, у тому числі і перерахованих механізмів нестійкості. Течія відбувається не тільки за великих чисел Рейнольдса, але й на податливій, вібруючій поверхні, в умовах замкнутих об'ємів у вигляді довгих водоводів, які можуть бути своєрідними резонаторами хвиль збурення.

Так може з'являтися стійка система стоячих хвиль. За певних умов ці хвилі здатні збуджуватися в робочому процесі гідроагрегату, і накопичувати досить значну енергію. Тоді в системі водовід – гідроагрегат можуть виникати автоколивання. Враховуючи, що на власні форми коливання відчутно впливає імпеданс водяного стовпа, залежний від швидкості звуку у відсасуючій трубі, це викликає вібрацію, кавітацію й гідроудари в проточній частині.

У натурних турбін в деяких робочих зонах з'являються пульсації тиску проточної частини, знижується ККД. Спостерігається також значне гойдання потужності гідроагрегату. В результаті цього зменшується регулювальний діапазон, гідроагрегат не може вийти на проектну потужність.

Гідрогенератор в енергосистемі поводиться як гармонійний осцилятор. У частотному діапазоні 0, 5 – 3 Гц у нього фактично існує пологий низькодобротний резонанс. Це означає, що гідроагрегат досить чутливий до коливань обертового моменту, залежного від пульсацій тиску у водоводі. При цьому коливання моменту, у свою чергу, приводять до коливань кута навантаження гідрогенератора в енергосистемі з амплітудою:

$$\theta_0\approx\frac{M_г}{D}\sqrt{\frac{J}{km_c}}\,. \qquad (12)$$

Таким чином існуюча вагома нестабільність гід-

ромеханічного тракту перетворення енергії відбивається на роботі й ефективності гідроагрегату в цілому. Цьому сприяє й динаміка електромеханічної частини енергетичного перетворювача, обумовлена її інерційністю, [15].

ПІД–регулятор системи збудження в колі зворотного зв'язку підвищує ступінь інерційності системи керування напруги, що суттєво знижує стійкість та динамічні якості первинного перетворювача енергії ГЕС. Загальний підхід до управління робочим процесом гідроагрегату становить:

$$Pm - Pe = Pa$$

або

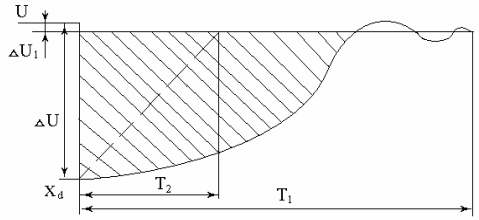
$$Pm - Pe = 2H\frac{d\omega}{dt}\cdot J\,, \qquad (13)$$

де Pe – електричний момент; Pm – механічний момент валу ротора; Pa – прискорююча потужність; ω – кутова швидкість; H – постійна часу інерції; J – момент інерції.

$$Pe(f\upsilon) = \frac{Uf\cdot U_\infty}{x_d(f\upsilon)+x_e}\sin(\theta) + \frac{U_\infty\left[x_d(f\upsilon)-x_q(f\upsilon)\right]}{2\cdot\left[x_d(f\upsilon)+x_e\right]\cdot\left[x_q(f\upsilon)+x_e\right]}\sin(2-\theta)\,, \qquad (14)$$

де: U_f – напруга збудження; U_∞ – напруга мережі; θ – кут навантаження; x_d – синхронний індуктивний опір за подовжньою віссю; x_q – синхронний індуктивний опір поперечної вісі; x_e – зовнішній індуктивний опір; f – частота коливань.

З рівняння виходить, що електричний момент Pe пропорційний напрузі збудження U_f. Таким чином, можливо регулювати електричний момент, пропорційно змінюючи напругу збудження, а механічний – швидкістю обертання. Проте умови інерційності регуляторів при цьому досить часто мають критичне значення. Розроблений комплексний поліпредметний підхід [16], [18] до реалізації технологічного процесу підвищує ефективність генерації ГЕС. Такий підхід дозволяє шляхом модернізації системи збудження (СЗ) гідрогенератора на основі системно розроблених рішень уникнути інерційності, перерегулювання й відповідно коливань в перехідному процесі відновлення напруги гідрогенератора (рис. 8). Модернізація системи збудження гідрогенератора полягає в заміні ПІД-регулятора на неінерційний, що забезпечує виключення інерційності кола зворотного зв’язку, що знижує порядок системи керування й підвищує динамічну ефективність генерації. Зростає стійкість системи регулювання, розширюються можливості форсування збудження, перехідний процес відновлення напруги суттєво скорочується.



T_1 – час відновлення за інерційної СЗ; T_2 – відсутність інерційності СЗ.

Рисунок 8. Характеристика відновлення напруги.

Попередню оцінку динамічних втрат генерації первинним енергетичним обладнанням Дніпровської ГЕС можливо визначити наступним чином. Сумарна постійна інерції гідроагрегата складає в середньому 8 сек. Тоді втрати потужності перехідного процесу гідрогенератора можливо оцінити як

$$\Delta U = 0{,}4\,U_{CT} = 5{,}52\ кВ\,,\ \Delta P = 0{,}2\cdot 80 = 16\ МВт$$

Втрати генерації агрегата за рік

$$\Delta W = \Delta P\cdot t = 16\cdot 8/60\cdot 8\,000 = 17\,066\ Мвт\cdot г$$

Визначені характеристики й одержані параметри перехідного процесу переконливо доводять необхідність суттєвого зниження динамічних втрат перехідного процесу за рахунок його оптимальної реалізації, що переважно досягається відсутністю інерційності та достатнім рівнем енерго інформаційного обміну кола збудження гідрогенератора. Наведені дані відображають продуктивність поліпредметного підходу та окремих його проекцій до підвищення ефективності гідроенергетичних процесів генерації ГЕС та в формуванні досить високого енергоінформаційного потенціалу впливів, безпосередньо залежного від реалізації первинних перетворювачів контрольованих процесів.

V. ВИСНОВКИ

1. Системні вимоги до ефективності енергетичного обладнання ГЕС дозволяють виявляти наскрізні технологічні резерви й шляхи забезпечення необхідного функціонального рівня.

2. Властивості зворотного зв'язку в гідроенергетичних перетворювачах мають переважаючий вплив на їх динамічні показники ефективності.

3. Суттєві втрати припадають на долю проточного тракту та регуляторів, що мають досить низькі динамічні властивості.

4. Втрати перехідних режимів безпосередньо пов’язані з гідро електродинамікою робочих процесів.

5. Динамічні складові процесів суттєво визначають ефективність роботи гідроагрегатів ГЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Честнат, Г. Техника больших систем [Текст] / Г. Честнат. – М.: Энергия, 1969. – 656 с.

[2] Клишевич, Г. В. Энергопроцесс гидроэнергетических установок [Текст] / Г. В. Клишевич. – Л.: Энергия, 1969. – 164 с.

[3] Китаев, А. В. Схемы замещения электрических машин [Текст] / А. В. Китаев, В. Л. Агбомасу, В. И. Глухова // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 14-26. DOI: doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-2

[4] Осин, И. Л., Электрические машины: Синхронные машины. [Текст] / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.

[5] Емцев, Б. Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Б. Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. – 460 с.

[6] Барлит, В. В. Гидравлические турбины [Текст] / В. В. Барлит. – К.: Вища школа, 1977. – 360 с.

[7] Beus, H. L. The use of information in sorting [Text] / H. L. Beus // J. ACM. – 1970. – Vol. 17 – No 3. – P.17-20.

[8] Hellerman L. A measure of computational work [Text] / L. Hellerman // IEEE Trans. – 1972. – Vol. 21 – No 5 – P. 439-446.

[9] Пожуєв, В. І. Визначення ефективності існуючих гідроенергетичних систем [Текст] / В. І. Пожуєв, В. В. Радченко, Ф. П. Шкрабець, В. Г. Кучер, В. П. Кобець // Електротехніка та електроенергетика – 2013. – № 2. – С. 71-76. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-10

[10] Драммонд, М. Методы оценки и измерений дискретных вычислительных систем [Текст] / М. Драммонд. – М.: Мир, 1977. – 381 с.

[11] Миронов, В. Г. Основы технологий цифровой обработки сигналов. Ч. 1. Свойства сигналов и современные технические средства их обработки. [Текст] / В. Г. Миронов // Электричество. – 2001. – № 3. – С. 55-65.

[12] Миронов, В. Г. Основы технологий цифровой обработки сигналов. Ч. 2. Математическое описание цифровых сигналов. [Текст] / В. Г. Миронов // Электричество. – 2001. – № 8. – С. 60-69.

[13] Палю де Ла Барьер. Р. Курс теории автоматического управления [Текст] / Р. Палю де Ла Барьер. – М.: Машиностроение, 1973. – 396 с.

[14] Robert E. Shannon, Systems Simulation: The An and Science [Text] / E. Robert // Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975 – 420 p.

[15] Dandeno, P.L. Effects Synchronous machine modelling in large-scale system stability [Text] / P.L. Dandeno, R.L. Hauth, R. Schulz // Trans. IEEE. – 1973. – Vol. 92. – №2. – P. 574-582.

[16] Радченко, В. В. Підвищення динамічної ефективності системи збудження гідрогенератора [Текст] / В. В. Радченко // Вісник НУВГП. – 2015. – № 2 (62) – С. 262-275.

[17] Радченко, В. В. Семантика інформаційних складових енергетичних процесів [Текст] / В. В. Радченко // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2012. – № 89. – С. 87-91.

[18] Радченко В. В. Поліпредметний аналіз ефективності гідроагрегата ГЕС [Текст] / В. В. Радченко НТЗ Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2016. – № 97. – С. 112-116.

Стаття надійшла до редакції 06.08.2018

СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

РАДЧЕНКО В. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики Запорожской государственной инженерной академии, Запорожье, Украина, e-mail: radchvv@ukr.net

Цель работы. *Определение резервов основного оборудования с точки зрения системной роли гидроэлектростанций.*

Методы исследований. *A comprehensive multi-subject approach to the analysis and determination of the effective components of generation and energy equipment.*

Получены результаты. *Приведена актуальность и основа системных требований к эффективности энергетического оборудования гидроэлектростанций, позволяющих обеспечивать формирование необходимого функционального уровня процесса генерации. Рассмотрены особенности основных компонентов технологии преобразования и их взаимодействия. Отражены влияния составляющих сквозного тракта процесса генерации. Получены характеристики эффективности преобразования в условиях мобильности. Показаны основные возможности и пути организации эффективного энергоинформационного обмена гидрогенератора. Предложены пути повышения эффективности работы действующего оборудования гидроэлектростанций.*

Научная новизна. *Предложена полипредметная конкретизация системного подхода для определения резервов оборудования и повышения эффективности генерации, которая позволяет определить динамических составляющих генерации и критериев эффективности.*

Практическая ценность. *Определены системные требования к исследованию сквозного тракта энергетических превращений и повышения эффективности генерации основного оборудования гидроэлектростанций и его системной роли.*

Ключевые слова: гидроэнергетика; резерв мощностей; динамика гидроагрегата; гидрогенератор; эффективность.

SYSTEM REQUIREMENTS TO THE EFFICIENCY OF HYDRO ELECTRIC POWER STATIONS

RADCHENKO V. V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of thermal energy and hydroenergy department of the Zaporizhzhia state engineering academy, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: radchvv@ukr.net;

Purpose. *Determination of the reserves of the main equipment in terms of the systemic role of hydroelectric power stations.*

Methodology. *Complex poliobjecting approach to the analysis and determination of operating constituents of generation and basic energy equipment.*

Findings. *The urgency and the basis of the system requirements for the efficiency of the power equipment of hydroelectric power stations, which allows ensuring the formation of the necessary functional level of the generation process is proposed. The features of the main components of the transformation technology and their interaction are considered. Reflects the influence of the components of the end-to-end path of the generation process. Characteristics of the conversion efficiency in the mobility conditions are obtained. The main possibilities and ways of organizing an effective energy exchange of a hydro generator are shown. The ways of increasing the operating efficiency of the existing equipment of hydroelectric power stations are proposed.*

Originality. *The multi-subject requirements of the system approach is proposed for determining equipment reserves and increasing generation efficiency, which makes it possible to determine the dynamic generation components and performance criteria.*

Practical value. *The system requirements for studying the end-to-end path of energy transformations and increasing the efficiency of generating of basic equipment of the hydroelectric power stations and its systemic role are determined.*

Keywords: hydro energy; reserve of powers; dynamics of hydro aggregate; hydro generator; efficiency.

REFERENCES

[1] Chestnat, G. (1969). Tehnyka bol'shyh system. Moscow: Energyja, 656.

[2] Klishevich, G. V. (1969). Energoprotsess gidroenergeticheskih ustanovok. Leningrad: Energiya, 164.

[3] Kitayev, A., Agbomassou, V., & Glukhova, V. (2013). Schemes of electric machines replacement. *Electrical Engineering And Power Engineering*, *2*, 14-25. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-2

[4] Osin, I. L., Shakaryan, Yu. G. (1990). Elektricheskie mashi-nyi. Sinhronnyie mashinyi. Moscow: Vyisshaya shkola, 304.

[5] Emtsev, B. T. (1987). Tehnicheskaya gidromehanika. Moscow: Mashinostroenie, 460

[6] Barlit, V. V. (1977). Gidravlicheskie turbinyi. Kyiv: Vischa shkola, 360.

[7] Beus, H. L. (1970). The use of information in sorting. JACM, 17, 3.

[8] Hellerman, L. (1972). A measure of computational work. *IEEE Trans*, 21, 5, 439-446.

[9] Pojuev, V., Radchenko, V., Skrabets, F., Kucher, V., & Kobets, V. (2013). Definition of efficiency of existing hydropower systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, *2*, 71-76. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-10

[10] Drammond, M. (1977). Metodyi otsenki i izmereniy dis-kretnyih vyichislitelnyih system. Moscow: Mir, 381.

[11] Mironov, V. G. (2001). Osnovyi tehnologiy tsifrovoy obrabotki signalov. Ch. 1. Svoystva signalov i sovremennyie tehnicheskie sredstva ih obrabotki. *Elektrichestvo*, 3, 55-65.

[12] Mironov, V. G. (2001). Osnovyi tehnologiy tsifrovoy obrabotki signalov. Ch. 2. Matematicheskoe opisanie tsifrovyih signalov. *Elektrichestvo*, 8, 60-69.

[13] Palyu de La Barer, R. (1973). Kurs teorii avtomatiche-skogo upravleniya. Moscow: Mashinostroenie, 396.

[14] Shannon, Robert E. (1975). Systems Simulation: The An and Science. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 4.

[15] Dandeno, P.L., Hauth, R.L., Schulz, R. (1973). Effects Synchronous machine modelling in large scale system stability. *Trans. IEEE*, 92, 2, 574-582.

[16] Radchenko, V. V. (2015). Pidvyshhennja dynamichnoi' efektyvnosti systemy zbudzhennja gidrogeneratora. *Visnyk NUVGP*, 2 (62), 262-275.

[17] Radchenko, V. V. (2012). Semantika informatsiynih skladovih energetichnih protsesiv. *Girnycha elektromehanIka ta avtomatika*, 89, 87-91.

[18] Radchenko, V. V. (2016). Polipredmetnyj analiz efektyvnosti gidroagregata GES. *Girnycha elektromehanIka ta avtomatika*, 97, 112-116.

62.314

ВАРТІСНО-ЦІЛЬОВІ АСПЕКТИ МОНІТОРИНГУ РІВНІВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ГАЛУЗІ КРИВОРІЗЬКОГО РЕГІОНУ

СІНЧУК І. О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна, Beridzet2016@gmail.com

Мета роботи. *Провести вартісно-цільовий аналіз в складі моніторингу рівнів електроспоживання та розробити рекомендації щодо раціональної стратегії споживання електричної енергії гірничих підприємств з підземними видами видобутку залізорудної сировини.*

Методи дослідження. *Дослідження засноване на використанні законів, закономірностей і категоріальному апарату. У процесі наукового дослідження використовувалися загальнонаукові методи дослідження (порівняння, узагальнення, метод аналогій, структурний аналіз і синтез), прийоми логіко-теоретичного аналізу, спеціальні економіко - математичні методи.*

Отримані результати. *Проаналізовано показники споживання електроенергії на залізорудних підприємствах Криворізького регіону. Проведено порівняльний аналіз запланованого та фактичного рівня споживання електроенергії. Виділено трендові складові показників споживання електроенергії на залізорудних підприємствах Криворізького регіону. Визначено динаміку структурної трансформації питомої вартості електричної енергії виробництва на залізорудних підприємствах Криворізького регіону.*

Наукова новизна. *При формуванні вартісно-цільової складової моніторингу рівнів електроспоживання запропоновано використовувати індексну методологію в сукупності з трендовими моделями, що дозволить визначати прогноз споживання електроенергії та реалізувати раціональне управління електроспоживанням. Означена індексна система структурної трансформації питомої вартості електричної енергії виробництва на гірничорудних підприємствах Криворізького регіону.*

Практична цінність*. Проведений в динаміці аналіз структурної трансформації питомої вартості електроспоживання підприємств залізорудної галузі Криворізького регіону. Визначено систему індексів питомої вартості споживання електроенергії: індекс середньої питомої вартості електроспоживання змінного складу; індекс питомої вартості електроспоживання фіксованого складу; індекс середньої питомої вартості електроспоживання структурних зрушень. Виділено і проаналізовано детерміновану компоненту часового ряду споживання електроенергії для залізорудних підприємств Криворізького регіону. Отримані трендові моделі дають підстави для визначення прогнозу рівнів споживання електроенергії з відповідним рівнем достовірності. Означено показники рівнів споживання електроенергії, які забезпечать формування інформаційно-аналітичного складової відповідного моніторингу. Проведені дослідження дозволяють сформувати стратегію споживання електроенергії на підприємствах залізорудної промисловості Криворізького регіону. Проблеми, висвітлені в роботі, тісно пов'язані з науковими та практичними завданнями щодо раціонального використання та розподілу наявних енергетичних ресурсів.*

Ключові слова: електроспоживання; вартість; моніторинг; модель; індекс; управління; підприємство

I. ВСТУП

Україна має потужний електроенергетичний комплекс, у якому функції виробництва, передавання та споживання електроенергії (ЕЕ) розділені. Всі вищевикладені функціональні складові мають значний рівень підвищення потенціалу ефективності. В повній мірі це стосується процесу споживання ЕЕ.

Енергетика – база економіки держави, що охоплює процеси видобутку, транспортування та використання паливно-енергетичних ресурсів, є організаційно складною еколого-економічною та виробничо-технологічною системою, яка активно впливає на довкілля. Рівень розвитку енергетики має значний вплив на стан економіки в державі, на вирішення проблем соціальної сфери та рівень життя людини. Перед людством стоїть украй важливе завдання вийти на новий рівень енергоспоживання за рахунок використання інноваційних енерготехнології і підвищення енергоефективності всіх галузей економіки.

Підвищення мобільності навколишнього і внутрішнього середовища сучасних підприємств, активне формування його конкурентного оточення визначають нові методи і підходи до ефективного управління електроспоживанням.

Одним з таких напрямів щодо раціонального управління електроспоживанням є моніторинг електроспоживання, розробка комплексу показників, що характеризують процеси електроспоживання і

© Сінчук І.О. 2018
DOI 10.15588/1607-6761-2018-3-4

забезпечують можливість керуючих впливів на нього.

Основним споживачем ЕЕ в державі є і, судячи з прогнозів, буде залишатися в найближчі 30-40 років промисловість, де своїм рівнем споживання особливо відзначаються енергоємні види підприємств, до яких, в повній мірі, відносяться підприємства залізорудної галузі [1]. Так з 16 енергоємних підприємств, що дислокуються на території Дніпропетровської області і ті, що споживають майже 50% від усього обсягу споживання електроенергії в області, більше 33% споживають гірничо-металургійні підприємства Криворізького регіону, котрі забезпечують більш ніж 80% загальнодержавного обсягу видобутку залізорудної сировини (ЗРС).

При цьому важливим є той факт, що більш ніж на 30% собівартість ЗРС формується за показниками рівня споживання ЕЕ. Безумовно, що в такому контексті, проблема зменшення собівартості продукції залізорудного комплексу держави – це проблема зменшення сегмента ЕЕ в дому показнику. Між тим, вирішення цієї проблеми носить відтінок певної складності, яка, в свою чергу, формується самою технологічною специфікою гірничо-металургійних підприємств [2]. Зміна умов зовнішнього і внутрішнього економічного середовища того чи іншого підприємства тягне за собою перегляд цільових параметрів: необхідно перевірити наскільки оптимальні поставлені цілі в існуючих реаліях умов, спроможне чи конкретне підприємство, зважаючи на зміни, що виникли, досягти поставлених цілей. На підставі зміни цільових параметрів, а також прогнозу змін «сильних» і «слабких» сторін самого підприємства корегується план дії щоко досягнення поставлених цілей [3].

Проте стратегія споживання ЕЕ існує як факт, і потребує свого вирішення. Безумовно, основним напрямом в знижені (оптимізації) рівня енергозатрат при видобутку і переробці ЗРС, окрім зміни технології видобутку, що не передбачається в найближчі півстоліття, є управління процесом споживання конкретного виду енергії.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналізуючи, існуючі в науковій літературі, підходи до визначення поняття моніторинг, слід зазначити, що єдиний підхід серед науковців відсутній.

У статистичному словнику - довіднику під редакцією О. Г. Осауленко моніторинг розглядається як система заходів, що дозволяють безперервно стежити за станом певного об'єкту, реєструвати його найважливіші характеристики, оцінювати їх, оперативно виявляти результати дії на об’єкт різноманітних процесів і чинників [4]. Дослідження Царук А.Ю. присвячені розробці структури комплексного моніторингу, впливу виробничої діяльності залізорудного виробництва на довкілля [5]. Дослідження Мельник О.Г. і Пецкович М.Д. присвячені використанню моніторингу у менеджменті. Наведена ними модель моніторингу являє собою систему інформаційного поточного контролювання стану та зміни досліджуваного об’єкта [6]. Значна кількість наукових доробок присвячені розробці методів і моделей ефективності управління на засадах моніторингу виробничої діяльності [7]-[9]. Кретович С.С., визначаючи суть всякого моніторингу, відмічає, що моніторинг - це єдиний науковий комплекс спостереження, контролю, управління і прогнозування об'єктів, в який трансформувався набір вузькопрофільних традиційних методів. На наш погляд, праві ті автори, які при визначенні моніторингу як перший елемент, називають збір фактичного матеріалу, мета якого полягає в отриманні необхідної інформації про об'єкт моніторингу, що буде використана для реалізації його подальших елементів [10].

Вітчизняними науковцями зроблений значний внесок у визначення моніторингу, як статистичного методу дослідження, серед них можна виділити М. Пугачову, В Галіцина, О. Олексійчук, Є. Павлюк, С. Герасименко [11], [12] та ін. Вченими – дослідниками: Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П., Попов В.С., Павловський В.В – були визначені концептуальні засади та окремо особливості моніторингу на промислових підприємствах [13]-[15]. Слід зауважити, що в наукові спеціальній літературі практично відсутні методологічні підходи моніторингу щодо рівня електроспоживання промисловими підприємствами. Серед вітчизняних наукових доробок слід відзначити дослідження Б. Додонова [16], де запропонована методологія базується на методі декомпозиції кінцевого споживання енергоресурсів за секторами й галузями економіки. Чернявський А.В., Куліков Є.О [17] теоретично дослідили можливість прогнозування електроспоживання з використанням алгоритму методу Хольта-Вінтерса, виділено основні параметри, що впливають на оцінку точності результатів розрахунку прогнозних значень електроспоживання, не умалюючи значимість представленого дослідження слід зауважити на проблемність застосування запропонованої методики для підприємств залізорудної галузі. Серед сучасних методологій дослідження електроспоживання слід виділити наукові дослідження Розен В.П, Давиденко Л.В. За допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ) виконано прогнозування споживання електричної енергії підприємств вугільної галузі. В якості вхідних параметрів нейронної мережі використовуються найбільш інформативні технологічні параметри шахт [18], [19]-[25]. Дослідження Серебреннікова Б. С. і Петрової К. Г. присвячені побудові сітьової моделі технологічного процесу та управління режимом електроспоживання [26]. Вибір критеріїв економічно

ефективних заходів щодо зниження втрат енергії в системі електроспоживання запропоновано Дьяченко В.В. [27].

Таким чином, відсутність моніторингових складових методології моделювання споживання електричної енергії на підприємствах залізорудної промисловості, надає актуальності проведеним дослідженням.

III. МЕТА РОБОТИ

Провести вартісно-цільовий аналіз в складі моніторингу рівнів електроспоживання та розробити рекомендації щодо раціональної стратегії споживання електричної енергії гірничих підприємств з підземними видами видобутку залізорудної сировини.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В даний час на підприємствах процес визначення і заявки лімітів або встановлення шахтних норм електроспоживання здійснюється практично без достатнього аналізу електроспоживання та показників роботи підприємства, що часто призводить до відхилення фактичного електроспоживання від заявочних значень. При коригуванні лімітів не завжди враховується поточне значення показників роботи підприємства, прогноз факторів, що впливають і, як наслідок - неефективно використовуються заявлені ліміти. При перевищенні ліміту електроенергії з підприємств стягується штраф за величину перебору електроенергії. У зв'язку з цим, визначення перспективних рівнів споживання електроенергії для правильної та своєчасної заявки необхідних лімітів неможливо без проведення моніторингу електроспоживання з метою забезпечення раціональної стратегії електроспоживання. Відповідно до поставленої задачі, був проведений порівняльний аналіз планової та фактично спожитої електроенергії на підприємствах з підземним видобутком залізорудної сировини Криворізького регіону (рис. 1-4).

На рис. 1 зображено споживання електроенергії за період 2012 – 2016 рр для шахти "Родіна".

Рисунок 1. Планове та фактичне споживання електроенергії шахти "Родіна".

Візуальний аналіз показує практичний збіг фактичного та планового споживання електричної енергії. Апроксимація кривої, що характеризує планове споживання електроенергії, дозволила отримати відповідну аналітичну залежність (1) (кількість спожитої електроенергії – рік).

$$Y = -131\ln(x) + 6609\,. \qquad (1)$$

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 58{,}7$, що свідчить про достатній рівень адекватності.

На рис. 2 представлено графічно споживання електроенергії для шахти "Жовтнева" з апроксимуючої кривою.

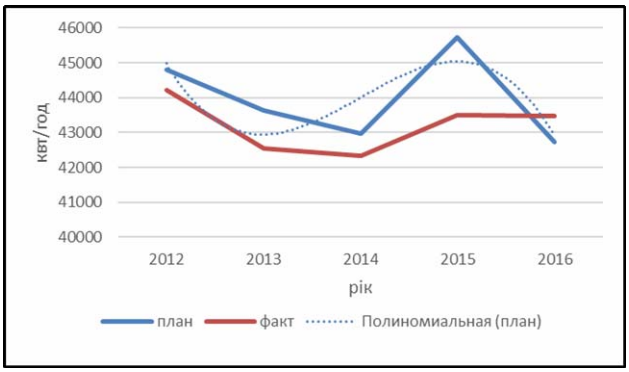


Рисунок 2. Планове та фактичне споживання електроенергії шахти "Жовтнева".

Як, видно з рисунку, значне відхилення фактично спожитої електроенергії від запланованої на ш. Жовтнева спостерігається в 2013 р. та починаючи з 2015 р.

Відповідно, для фактично спожитої та запланованої ЕЕ доцільно використовувати різні апроксимуючи криві, з різним значенням коефіцієнтів детермінації ($R^2_{пл} = 67{,}8;\ R^2_{ф} = 97{,}4\%$)

На рис.3 графічно показано споживання електроенергії на шахті "Гвардійська".

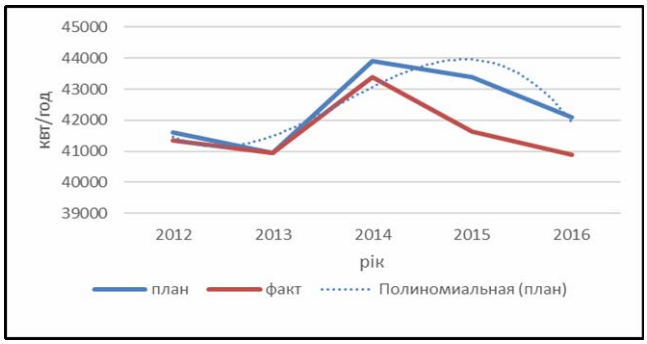


Рисунок 3. Планове та фактичне споживання електроенергії шахти "Гвардійська".

Для шахти "Гвардійська" практично фактичне та

заплановане споживання електроенергії співпадає. Для теоретичного аналізу пропонується використовувати поліноміальну залежність 3 ступеню (2):

$$Y = -369{,}9x^3 + 2980x^2 - 6325{,}9x + 45181 \ . \qquad (2)$$

На рис. 4 зображено графік споживання електроенергії для шахти "Терновська"

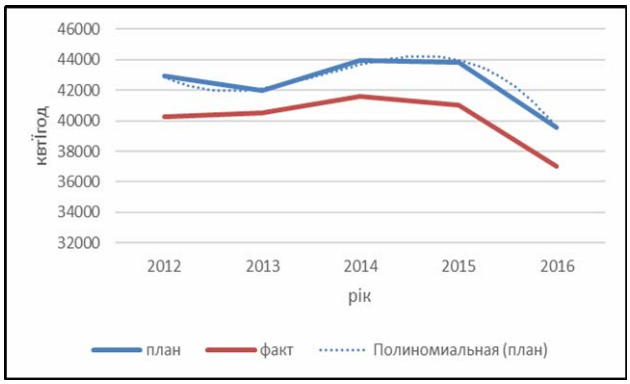


Рисунок 4. Планове та фактичне споживання електроенергії шахти "Терновська".

Візуальний аналіз вказує на значне відхилення в 2015р. Якщо, для попереднього аналізу споживання електроенергії представлених залізорудних підприємств, існує можливість теоретично визначити усереднені апроксимуючі криві, то для шахти "Терновська" існує необхідність будувати окремі апроксимуючі криві для фактично та планового споживання електроенергії.

Стратегія споживання електроенергії пов'язана не тільки з обсягами спожитої електроенергії, але і із вартісною складовою.

Ефективність функціонування гірничодобувного підприємства і саме його існування, особливо в нестабільних умовах перехідної економіки, в значній мірі залежить від ефективності системи оцінювання спожитої електроенергії.

На сучасному етапі розвитку концепції стратегії споживання електроенергії ще не сформовано єдиного універсального методичного підходу до оцінювання раціонального споживання електроенергії. Тому вартісно-цільова складова моніторингу, може бути використана при визначені оптимальних обсягів споживання електроенергії. В цьому сенсі, ми вважаємо за доцільне, використовувати індексні підходи задля дослідження вартісної складової спожитої електроенергії.

Використовуючи дані для відповідних підприємств ГРК Криворізького регіону: вартість спожитої електроенергії, обсяги спожитої електроенергії за період 2012 – 2016рр. розрахуємо динаміку середньої питомої вартості електроспоживання виробництва – структурні індекси середньої питомої вартості електроспоживання виробництва; абсолютну зміну середньої питомої вартості електроспоживання виробництва і чинники, що її формують (табл.1).

Індекс середньої питомої вартості виробництва змінного складу показує відношення рівня питомої вартості за сукупністю підприємств регіону у звітному періоді до її рівня у базисному періоді (3):

$$I_S^{зс} = \frac{\sum PB_1 d_1}{\sum PB_0 d_0}, \qquad (3)$$

де PB_1 – вартість спожитої електроенергії у звітному періоді; PB_0 - вартість спожитої електроенергії у базисному періоді; d_1 – частка спожитої електроенергії у звітному періоді; d_0 – частка спожитої електроенергії у базисному періоді.

Отже, середня питомої вартість виробництва по регіону загалом у звітному періоді (2016 р.) порівняно з базисним (2015 р.) значно знизилася.

Узагальнену характеристику впливу процесів за всіма підприємствами дає індекс питомої вартості виробництва фіксованого складу. Індекс $I_S^{фс}$ показує, як змінився середній рівень питомої вартості виробництва у звітному періоді порівняно з базисним тільки за рахунок динаміки рівня питомої вартості виробництва по окремим підприємствам регіону (4):

$$I_S^{фс} = \frac{\sum PB_1 d_1}{\sum PB_0 d_1} \ . \qquad (4)$$

На основі виконаних розрахунків доходимо висновку, що середня питома вартість виробництва значно знизилась, що складає 0,25 од., тільки в результаті динаміки її рівня за окремими підприємствами.

Ще одним чинником, який зумовив динаміку питомої вартості виробництва по регіону загалом за аналізований період, була зміна розподілу сукупних обсягів споживання електроенергії між окремими підприємствами регіону.

Узагальнену характеристику впливу зміни розподілу сукупних обсягів споживання електроенергії між підприємствами регіону дає індекс середньої питомої вартості структурних зрушень $I_S^{сз}$ (5):

$$I_S^{сз} = \frac{\sum PB_0 d_1}{\sum PB_0 d_9} \ . \qquad (5)$$

Індекс показує, як змінився середній рівень питомої вартості ЕЕ по регіону тільки за рахунок зміни розподілу сукупних обсягів спожитої електроенергії підприємств.

Отже, середня питома вартість електроенергії

Таблиця 1. Дані для аналізу абсолютних та відносних змін питомої вартості електроспоживання виробництва гірничорудних підприємств Криворізького регіону (тис. грн.).

№ з/п	Назва підприємства	Базисний період (2015 р.)		Звітний період (2016 р.)	
		Вартість спожитої ЕЕ (грн)	Обсяги спожитої ЕЕ (квт/час)	Вартість спожитої ЕЕ (грн)	Обсяги спожитої ЕЕ (квт/час)
1	Ш. Жовтнева	54 617,0	43 501,7	49 579,	43 468,
2	Ш. Родіна	77 001,9	61 009,4	74 431,	66 275,
3	Ш.Терновськя	51 315,5	40 996,7	41 171,7	37 010,9
4	Ш. Гвардійська	60 381,1	41 634,2	56 773,7	83 653,0

виробництва у звітному періоді порівняно з базисним підвищилася приблизно на 1,7 %.

При цьому, за рахунок зміни питомої вартості електроенергії виробництва по кожному підприємству регіону середня питома вартість ЕЕ знизилась на 7,8% %, а за рахунок зміни розподілу обсягу спожитої ЕЕ між підприємствами регіону середня питома вартість ЕЕ виробництва зменшилась на 6,2 %.

Таблиця 2. Динаміка структурної трансформації питомої вартості ЕЕ виробництва гірничорудних підприємств Криворізького регіону.

Індекс питомої вартість ЕЕ виробництва змінного складу	2013	2014	2015	2016
Індекс питомої вартості ЕЕ виробництва фіксованого складу	0,87	1,58	1,32	0,94
Індекс питома вартості ЕЕ виробництва структурних зрушень	0,79	1,28	0,95	1,016
Взаємозв'язок між індексами	1,09	1,24	1,38	0,92
	0,87	1,59	1,32	0,94

Проведений аналіз структурної трансформації питомої вартості електроспоживання підприємств залізорудної галузі Криворізького регіону був виконаний також в динаміці за період з 2012 по 2016 роки. Результати обчислень наведені в табл. 2.

Графічно динаміка структурної трансформації питомої вартості електроенергії на підприємствах з підземним видобутком залізорудної сировини Криворізького регіону відображена на рис. 5.

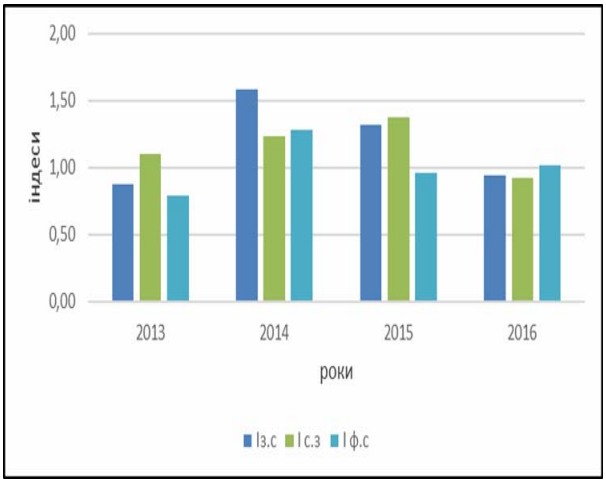


Рисунок 5. Динаміка структурної трансформації питомої вартості електричної енергії на гірничорудних підприємствах Криворізького регіону.

Найнижчі значення трансформаційних індексів по регіону були в 2013р., при цьому значне збільшення питомої вартості електроенергії виробництва відбулось саме за рахунок зростання частки вартості електроенергії, це було обумовлено впливом фінансово-економічної кризи.

V. ВИСНОВКИ

Для реалізації раціональних управлінських рішень щодо споживання електроенергії необхідно забезпечити науково обґрунтований моніторинг

електроспоживання, що передбачає не просту фіксацію фактів запланованої та фактично спожитої електроенергії на гірничорудних підприємствах. Запропонований моніторинг рівнів електроспоживання гармонізує інформаційно-аналітичні складові, містить комплекс методів і моделей для визначення оптимальних складових споживання електроенергії. В результаті дослідження проаналізовано показники споживання електроенергії на залізорудних підприємствах Криворізького регіону. Проведено порівняльний аналіз запланованого та фактичного рівня споживання електроенергії. Виділено трендові складові показників споживання електроенергії на залізорудних підприємствах Криворізького регіону. Визначено динаміку структурної трансформації питомої вартості електричної енергії виробництва на залізорудних підприємствах Криворізького регіону.

При формуванні вартісно-цільової складової моніторингу рівнів електроспоживання запропоновано використовувати індексну методологію в сукупності з трендовими моделями, що дозволить визначати прогноз споживання електроенергії та реалізувати раціональне управління електроспоживанням. Означена індексна система структурної трансформації питомої вартості електричної енергії виробництва на гірничорудних підприємствах Криворізького регіону.

Проведений в динаміці аналіз структурної трансформації питомої вартості електроспоживання підприємств залізорудної галузі Криворізького регіону. Визначено систему індексів питомої вартості споживання електроенергії: індекс середньої питомої вартості електроспоживання змінного складу; індекс питомої вартості електроспоживання фіксованого складу; індекс середньої питомої вартості електроспоживання структурних зрушень. Виділено і проаналізовано детерміновану компоненту часового ряду споживання електроенергії для залізорудних підприємств Криворізького регіону. Отримані трендові моделі дають підстави для визначення прогнозу рівнів споживання електроенергії з відповідним рівнем достовірності. Означено показники рівнів споживання електроенергії, які забезпечать формування інформаційно-аналітичного складової відповідного моніторингу. Проведені дослідження дозволяють сформувати стратегію споживання електроенергії на підприємствах залізорудної промисловості Криворізького регіону. Проблеми, висвітлені в роботі, тісно пов’язані з науковими та практичними завданнями щодо раціонального використання та розподілу наявних енергетичних ресурсів Пропонується для більш суттєвого дослідження, враховувати випадковий характер процесу формування електричних навантажень на підприємствах, сезоні коливання щодо споживання електроенергії гірничорудними підприємствами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Шидловський, А.К. Геоекономіка та геополітика України Навчальний посібник. [Текст] / А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, М.В. Рогоза, С.І. Випанасенко. – Д.: Національний гірничий університет, 2002. – 282 с.

[2] Sinchuk, O.M. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supply systems. Multi-authored monograph [Text] / O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, I. O. Sinchuk, F.I. Karamanyts, I. A. Kozakevych, M. I. Baranovska, O.M. Yalova; Edited by DSc., Prof. O.M. Sinchuk. – Warsaw: iScience Sp. z.o.o. – 2018. – 77 p.

[3] Burton, T. Wind energy handbook [Text] / T. Burton, D. Shape, N Jenkins, E. Bossanyi. – John Wiley & Sons, LTD, 2001. – 617 p.

[4] Осауленко, О. Г Статистичний словник. [Текст] / О. О. Васєчко, М. В. Пугачова та ін.; за ред. д-ра держ. упр., проф., член-кор. НАН України О. Г. Осауленка; НТК статистичних досліджень. – К.: ДП “Інформ.-аналіт. агентство”, 2012. – 498 с.

[5] Царук, А. Ю. Система економіко – математичного моніторингу залізорудного гірничо-збагачувального виробництва. [Текст] // А. Ю. Царук. Науковий вісник ЧДІЕУ. Регіональна економіка – 2014. – № 1 (21). – С. 47-50

[6] Мельник, О. Г. Моніторинг діяльності підприємства. [Текст] / О.Г. Мельник, М.Д. Пецкович // Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua [назва з екрану]. – С. 381- 385.

[7] Синчук, И. О. Электроэффективность производства с подземными способами добычи. [Текст]: монографія / И. О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко; под ред. О. Н. Синчука. - Изд. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016 – 351 с.

[8] Яріш, О.В. Моніторинг як складова управління різними сферами практичної діяльності. [Текст] //О. В. Яріш, М. О. Дуда // Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки – 2013, вип. 24. – С. 25-30.

[9] Кретович, С.С. Моніторинг розвитку вищих навчальних закладів І-ІІ рівнів акредитації як проблема педагогічної теорії та практики [Електронний ресурс] – Режим доступу: www//http://tme.umo.edu.ua/docs/6/11kreptp.pdf

[10] Галіцин, В.К. Концептуальні засади моніторингу. [Текст] / В.К. Галіцин, О.П. Суслов, Н.К. Самченко // Бізнес-інформ. – 2013. – № 9. –С. 330–335.

[11] Олексійчук, О.М. Статистичні показники виконання державного бюджету України / О.М.Олексійчук [Текст] // Статистика України,

2006 – №1 (32) – С. 30-35

[12] Пугачова, М. В. Методологічні засади використання кон'юнктурних обстежень для аналізу стану корпоративного управління на промислових підприємствах [Текст] / М. В. Пугачова // Економіка промисловості. – 2007 – № 1. – С.146-155.

[13] Стогній, Б.С. Інтелектуальні електричні мереж і електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення [Текст] / Б. С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С.44-51.

[14] IEEE Std. 15-2003. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems // IEEE Inc., USA.- 2003

[15] Кириленко, О.В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах. [Текст] / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2001 – №1 – С. 46-53.

[16] Додонов, Б. Моніторинг енергоефективності України 2016. [Текст]: монография / Б. Додонов - . К.: Наукова думка, 2016. – 20 с.

[17] Чернявський, А.В. Аналіз та прогнозування електроспоживання на підприємствах молочної галузі. [Текст] / А. В. Чернявський, Є.О. Кулікова // Енергетика. Екологія. Людина. – 2011, – №2 – С. 310-315

[18] Розен, В. П. Нейромережеве моделювання електроспоживання підприємств вугільної галузі. [Текст] / В.П. Розен, Л.В. Давиденко // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 3(62). –.С. 156-161.

[19] Farret, F.A. integration of alternative sources of energy [Text] / F.A. Farret, M. G. Simoes. John Wiley & Sons Inc. – 2006. – 471 p.

[20] Simoes, M.G. Renewable energy systems. Design and Analysis with Induction Generators [Text] / M.G. Simoes, F.A. Farret. Boca Raton, London New York Washington D.C. – CRC Press LLC, 2000. – 353 p.

[21] Maresha, l B. Weight stability intervals in multicriteria decision aid / B. Mareshal [Text] // European Journal of Operational Research. – 1988. – Vol 130(3). – P. 576-587.

[22] Saade, J.J. Defuzzification technigues for fuzzy controllers [Text] / J. J. Saade, H. B. Diab // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B. – 2000. – Vol. 30. – №1. – P. 223-229

[23] Zeleny, M. Multiple Criteria Decision Making [Text]/ M. Zeleny // N. Y.: McGraw– Hill, 1982.

[24] Lissere, M. Future Energy Systems / M. Lissere, T. Sauter, J. Y. Hung [Text] // IEEE Industrial Electronics Magasine. – March 2010.- Vol. 4(1).- P. 18-37

[25] Boyomi, E.H.E. Power electronics in smart grid power transmission systems: a review [Text]/ E.H.E. Boyomi // Int. J. Industrial Electronics and Drives. – 2015. – Vol. 2. – №2. – P. 98-115.

[26] Дяченко В.В. Формування програми енергозбереження для систем електропостачання [Текст] / В. В. Дяченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – №1. – С. 70-76. doi: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-12

[27] Серебренніков, Б. С. Управління режимом електроспоживання промислових підприємств з використанням технологічного ресурсу [Текст] / Б. С. Серебренніков, К. Г Петрова // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – №1. – С. 70-76. http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-12

Стаття надійшла до редакції 27.08.18

СТОИМОСТНО-ЦЕЛЕВЫЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ОТРАСЛИ КРИВОРОЖСКОГО РЕГИОНА

СИНЧУК И.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных електромеханических систем в промышленности и транспорте Криворожского национального университета, Кривой Рог, Украина, Beridzet2016@gmail.com

Цель работы. *Провести стоимостные-целевой анализ в составе мониторинга уровней электропотребления и разработать рекомендации по рациональной стратегии потребления электрической энергии горных предприятий с подземными видами добычи железорудного сырья.*

Методы исследования. *Исследование основано на использовании законов, закономерностей и категориальном аппарата. В процессе научного исследования использовались общенаучные методы исследования (сравнение, обобщение, метод аналогий, структурный анализ и синтез), приемы логико-теоретического анализа, специальные экономико - математические методы.*

Полученные результаты. *Проанализированы показатели потребления электроэнергии на железорудных предприятиях Криворожского региона. Проведен сравнительный анализ запланированного и фактического энергопотребления. Выделено трендовые составляющие показателей потребления электроэнергии на железорудных предприятиях Криворожского региона. Определена динамика структурной трансформации удельной стоимости электрической энергии производства на железорудных предприятиях Криворожского*

региона.

***Научная новизна**. При формировании стоимостно-целевой составляющей мониторинга уровней электропотребления предложено использовать индексную методологию в совокупности с трендовыми моделями, что позволит определять прогноз потребления электроэнергии и реализовать рациональное управление электропотреблением. Предложена индексная система структурной трансформации удельной стоимости электрической энергии производства на горнорудных предприятиях Криворожского региона.*

***Практическая ценность.** Проведен в динамике анализ структурной трансформации удельной стоимости электропотребления предприятий железорудной отрасли Криворожского региона. Определена система индексов удельной стоимости потребления электроэнергии: индекс средней удельной стоимости электропотребления переменного состава; индекс удельной стоимости электропотребления фиксированного состава; индекс средней удельной стоимости электропотребления структурных сдвигов. Выделена и проанализирована детерминированная компонента временного ряда потребления электроэнергии для железорудных предприятий Криворожского региона. Полученные трендовые модели дают основания для определения прогноза уровней потребления электроэнергии с соответствующим уровнем достоверности. Показатели уровней потребления электроэнергии обеспечивают формирование информационно-аналитическую составляющую соответствующего мониторинга. Проведенные исследования позволяют сформировать стратегию потребления электроэнергии на предприятиях железорудной промышленности Криворожского региона. Проблемы, освещенные в статье, тесно связанны с научными и практическими задачами по рациональному использованию и распределению имеющихся энергетических ресурсов.*

Ключевые слова: электропотребления; стоимость; мониторинг; модель; индекс; управления; предприятие

FULL-TARGETED ASPECTS OF MONITORING OF ELECTRICITY LEVELS AT ENTERPRISES OF THE INDIVIDUAL DEPARTMENT OF THE KRIIVORIZHOGY REGION

SINCHUK I. O. PhD, associate professor, associate professor of the department of automated electromechanical systems in industry and transport of Krivoy Rog National University, Kryvy Rih, Ukraine, e-mail: Beridzet2016@gmail.com

***Purpose.** Conduct a cost-target analysis as part of monitoring electricity consumption levels and develop recommendations for a rational strategy for consuming electricity from mining enterprises with underground mining of iron ore.*

***Methodology.** The study is based on the use of laws, regularities and categorical apparatus. In the process of scientific research, general scientific methods of research (comparison, generalization, analogy method, structural analysis and synthesis), methods of logical-theoretical analysis, special economic-mathematical methods were used.*

***Findings.** The indicators of electricity consumption at iron ore enterprises of the Krivoy Rog region are analyzed. A comparative analysis of the planned and actual energy consumption is carried out. The trend components of electricity consumption indicators at iron ore enterprises of the Krivoy Rog region are highlighted. Dynamics of structural transformation of unit cost of electric energy production at iron ore enterprises of the Krivoy Rog region is determined.*

***Originality.** When forming the cost-target component of monitoring the energy consumption levels, it is suggested to use the index methodology in combination with trend models, which will allow to determine the forecast of electricity consumption and realize rational management of power consumption. An index system of structural transformation of the unit cost of electric energy production at mining enterprises of the Krivoy Rog region is proposed.*

***Practical value.** Dynamics analysis of the structural transformation of the unit cost of electric power consumption of iron ore enterprises of the Krivoy Rog region is carried out. The system of indices of the unit cost of electricity consumption is defined: the index of the average unit cost of electricity consumption of variable composition; index of unit cost of power consumption of fixed composition; the index of the average unit cost of power consumption of structural shifts. The deterministic component of the time series of electricity consumption for the iron ore enterprises of the Krivoy Rog region was singled out and analyzed. The obtained trend models give grounds for determining the forecast of electricity consumption levels with an appropriate level of reliability. The indicators of electricity consumption levels provide the formation of an information-analytical component of the relevant monitoring. The carried out researches allow to formulate the strategy of electricity consumption at the enterprises of iron ore industry of the Krivoy Rog region. The problems highlighted in the article are closely related to the scientific and practical tasks of rational use and distribution of available energy resources.*

Keywords: electrical; consumption; cost; monitoring; model; index; management; enterprise

REFERENCES

[1] Shydlovskyj, A. K., Pivniak, H.H., Rohoza, M.V. and Vypanasenko, S.I. (2002). Heoekonomika ta heopolityka Ukrainy, Dnipro Natsional'nyj hirnychyj universytet, 292.

[2] Sinchuk, O.M. Boiko, S.M. Sinchuk, I. O. Karamanyts, F.I. Kozakevych, I. A. Baranovska, M. I and Yalova, O.M. (2018). Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supply systems. Multi-authored monograph, Warsaw, Poland, 77.

[3] Burton, T., Shape, D., Jenkins, N, Bossanyi, E., (2001). Wind energy handbook, John Wiley & Sons, LTD. USA, 617

[4] Osaulenko, O. H Vasiechko, O. O. Puhachova, M. V. (2012). Statystychnyj Kyiv: DP Inform.-analit. ahentstvo", 499

[5] Tsaruk, A. Yu. (2014). System of economic and mathematical monitoring of iron ore mining and concentrating production. *Naukovyj visnyk ChDIEU. Rehional'na ekonomika*, 1 (21), 47-50.

[6] Mel'nyk, O.H., Petskovych, M.D. (2012), Monitoring of enterprise activity. *Lviv Polytechnic National University Institutional.* Repository available at: http://ena.lp.edu.ua (Accessed 14 May 2018).

[7] Synchuk, Y.O. Huzov, E.S. Yalovaia, A.N. & Bojko S.N. (2016), Jelektrojeffektivnost' proizvodstva s podzemnymi sposobami dobychi, [Electrical efficiency of production with underground mining methods]. Berlin: Izd. LAP LAMBERT Academic Publishing, 351.

[8] Yarish, O.V. and Duda, M.O. (2013). Monitoring as a component of management in different areas of practice. *Naukovi pratsi Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky*, 24, 25-30.

[9] Kretovych, S. S. (2018). Monitoring of the development of higher education institutions of the I-II levels of accreditation as a problem of pedagogical theory and practice/ Available at: www//http://tme.umo.edu.ua/docs/6/ 11kreptp.pdf.

[10] Halitsyn, V.K., Suslov, O.P., Samchenko, N.K. (2013). Conceptual bases of monitoring, *Biznes-inform.* 9, 330-335.

[11] Oleksijchuk, O. M. (2006). Statistical indicators of the state budget of Ukraine. *Statystyka Ukrainy,* 1(32), 30-35.

[12] Puhachova, M. V. (2007). Methodological principles of use of conjuncture surveys for the analysis of the state of corporate governance at industrial enterprises. *Ekonomika promyslovosti,* 1, 146-155.

[13] Stohnij, B. S., Kyrylenko, O.V., Denysiuk, S.P. (2010). Technical aspects of the implementation of distributed generation sources in electrical networks. *Tekhnichna elektrodynamika*, 6, 44-51.

[14] (2003). IEEE Std. 15-2003. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.

[15] Kyrylenko, O.V., Pavlovs'kyj, V.V., Luk'ianenko, L.M. (2001). Technical aspects of the implementation of distributed generation sources in electrical networks. *Tekhnichna elektrodynamika,* 1, 46-53.

[16] Dodonov, B. (2016). Monitorynh enerhoefektyvnosti Ukrainy. Kyiv: Naukova dumka, 20

[17] Cherniavs'kyj, A. V., Kulikova, E.O. (2011). Analysis and forecasting of electricity consumption at dairy enterprises. *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna*, 310-315.

[18] Rozen, V.P., Davydenko, L.V. (2010). Neural network modeling of electricity consumption of enterprises of the coal industry. *Visnyk KDU imeni Mykhajla Ostrohrads'koho,* 3(62), 156-160.

[19] Farret, F.A. (2006). Integration of alternative sources of energy. John Wiley & Sons Inc., 471.

[20] Simoes M.G., Farret F.A. (2000). Renewable energy systems. Design and Analysis with Induction Generators. *CRC Press LLC*, 353.

[21] Mareshal, B. (1988). Weight stability intervals in multicriteria decision aid. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 576-587.

[22] Saade, J. J. (2000). Defuzzification techniques for fuzzy controllers. *IEEE Transactions on Systems. Man and Cybernetics*, 30, 1, 223-229.

[23] Zeleny, M. (1982). Multiple Criteria Decision Making: McGraw-Hill, 1982.

[24] Lissere, M., Sauter, T., Hung, J. Y. (2010). Future Energy Systems. IEEE Industrial Electronics Magasine, 4(1), 18-37.

[25] Boyomi E.H.E. (2015). Power electronics in smart grid power transmission systems: a review. *Int. J. Industrial Electronics and Drives*, 2, 2, 98-115.

[26] Dyachenko, V. (2015). Creation of energy saving program for power supply systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, *1*, 70-76. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-12

[27] Serebrennikov, B., & Petrova, K. (2013). The control of the electric power consumption of the industrial enterprises with the use of the technological resource. *Electrical Engineering And Power Engineering*, *1*, 70-76. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-12

УДК 621.316.13

НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВІДМОВИ АПАРАТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

ДОМОРОЩИН С.В. аспірант кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, інженер дільниці випробувань та вимірювань Дніпровської ГЕС-1, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: domoroshchin77@gmail.com;

САХНО О.А. канд. техн. наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: a.asakhno@yahoo.com;

Мета роботи. *Розробка математичної моделі комплексної оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг з використанням апарату нечітких множин, яка ґрунтується на експертних знаннях та діагностичних даних отриманих в експлуатаційний період.*

Методи дослідження. *Дослідження проведено з використанням методу експертного опитування , методу вагових коефіцієнтів, методу матриць попарного порівняння Сааті, методів нечіткої логіки, теорії нечітких множин, теорії техніки високих напруг, теорії теплового випромінювання.*

Отримані результати. *Авторами була розроблена нечітка модель за якою визначається ймовірність відмови вентильного розрядника і обмежувача перенапруг з врахуванням впливу сукупності таких факторів, як стан ізоляції, стан струмопровідних нелінійних елементів, температурного стану об'єкту дослідження, кількості спрацювань апарату. На базі моделі розроблено автоматизований програмний комплекс, з використанням якого діагностувався стан обмежувача перенапруги типу 3EP2 276-2PF32-1NA1 фірми "SIEMENS" який експлуатується на Дніпровській ГЕС-1, ВРП – 330 кВ, комірки ОПН АТ-331, та вентильний розрядник типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ.*

Наукова новизна. *Набула подальшого розвитку теорія технічного діагностування високовольтних апаратів захисту від перенапруг без відключення апаратів від мережі (онлайн) на базі нечіткої моделі визначення ймовірності відмови апарату. Від відомих модель відрізняється тим, що враховує стан ізоляції, стан струмопровідних частин, кількість спрацювань апарату, тепловий стан апарату та контактних з'єднань, та дозволяє рахувати ймовірність відмови апарату під час його експлуатації.*

Практична значимість. *Розроблена математична модель може застосовуватися в автоматизованих програмних та програмно-апаратних комплексах для: діагностування, планування обслуговування та ремонтів, розподілу фінансових активів електроенергетичних підприємств. Результати діагностування різних захисних апаратів підтвердили адекватність розробленої моделі. Розроблена модель може бути застосована для всіх типів апаратів захисту розподільчих пристроїв високої напруги. Модель дозволяє комплексно оцінити технічний стан досліджуваного об'єкта, проінтегрував різні за своєю природою вхідні параметри (струм, опір, температура і т. п.) які впливають на технічний стан та ймовірність його відмови. Побудована модель дозволяє виводити апарат в ремонт по факту поточного стану об'єкта, а не за календарним графіком ремонтів, що дозволить заощадити матеріальний та людський ресурс, та з врахуванням державного курсу на оцінку ресурсу обладнання за фактичним станом та створення розподільчих пристроїв без постійного обслуговуючого персоналу дуже актуальна.*

Ключові слова: апарат захисту від перенапруг; вентильний розрядник; обмежувач перенапруг; нечітка модель; ймовірність відмови; експертне опитування.

I. ВСТУП

Електроенергетична система України (ЕЕС) працює в умовах значного старіння парку електрообладнання. Оскільки темпи оновлення парку електрообладнання значно відстають від темпів старіння, то на деяких об'єктах електроенергетики електричне обладнання відпрацювало вже по декілька й більше нормативних строків експлуатації, що призводить до збільшення вірогідності відмов обладнання електричних станцій, підстанцій та систем. Наслідками цього є зменшення надійності ЕЕС. Старіння целюлозної ізоляції високовольтних електричних машин та апаратів призводить до втрати механічної міцності паперової ізоляцій, що внаслідок динамічних впливів на обмотки та струмопровідні контури обладнання, виникаючих під дією перенапруг або ударних струмів, може привести до руйнування ізоляції та відмовам обладнання, та ЕЕС в цілому. В зв'язку з цими обставинами забезпечення захисту ізоляції від перенапруг є важливим завданням експлуатації електроустановок.

Підвищення напруги, яке впливає на ізоляцію електрообладнання, понад найбільшого робочого значення, має як зовнішнє походження (грозові розряди), так і внутрішнє (комутаційні або аварійні режими та пов'язані з ними перехідні процеси). Апарати які за-

© Доморощин С.В., Сахно О.А., 2018
DOI 10.15588/1607-6761-2018-3-5

безпечують захист електрообладнання від всіх видів перенапруг є вентильні розрядники (ВР) та обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН). Вентильні розрядники призначені для захисту ізоляції від грозових та короткочасних комутаційних перенапруг. Обмежувачі перенапруг нелінійні призначені для захисту ізоляції електрообладнання напругою 6-750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц від комутаційних та грозових перенапруг і мають досить стабільні захисні характеристики протягом усього строку служби [1], [2].

Згідно з [3] кожного року перед початком грозового сезону треба перевіряти стан засобів захисту від перенапруг - ВРП та ліній електропередач, та забезпечувати готовність до захисту. На підприємствах повинні реєструватися випадки грозових відключень та пошкодження повітряних ліній (ПЛ), обладнання розподільчого пристрою (РП). За отриманими даними повинна проводитись оцінка надійності грозозахисту та, за необхідності, розроблятися заходи для її підвищення. Але ж необхідно оцінювати не тільки надійність виконання своїх функцій апарату захисту від перенапруги, але й його технічний стан та ймовірність його пошкодження внаслідок значного спрацьованого ресурсу. Пошкодження ВР та ОПН можуть призводити до відключення значної кількості відповідального обладнання, внаслідок «жорсткого» приєднання (без комутаційних апаратів - вимикачів) в комірках силових трансформаторів та на збірні шини РП. Таким чином, ВР та ОПН в наслідок відмови можуть також стати причиною відмови силового або вимірювального трансформаторного обладнання, що мало низьке значення ступеню полімеризації целюлози паперової ізоляції.

Згідно [1], [2] експлуатаційний нагляд виконується наступним чином – огляд черговим персоналом з обліком спрацювання за даними реєстратора та, за наявності відповідного пристрою, контролю струмів витоку апарату(для пристроїв, що знаходяться під робочою напругою). Важливою складовою експлуатаційного нагляду є періодичні профілактичні випробування – вимірювання опору елементів захисних апаратів та струму провідності (для пристав вимкнених з експлуатації). Стан ВР та ОПН ефективно контролюється засобами інфрачервоної техніки без вимкнення апаратів з експлуатації. Але ці методи не дають можливості для комплексної, інтегрованої оцінки технічного стану (ТС) апаратів захисту від перенапруги, а здебільшого аналіз зводиться до інтуїтивної (експертної) оцінки технічного спеціаліста.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Методи оцінювання надійності та ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг, які існують на сьогодення різноманітні. У [4] для вибору ОПН побудована модель, яка враховує властивості та характеристики мереж (схеми, режими та засоби заземлення нейтралі, конфігурацію та склад обладнання тощо), але ця модель є більш корисною для проектувальних цілей ніж для оцінювання технічного стану ОПН в поточній експлуатації. В статті [5] побудована модель для дослідження роботи засобів захисту від перенапруг в енергосистемах при наявності в них вищих гармонік, які призводять до зниження терміну експлуатації. Згідно з [9] надійна експлуатація засобів захисту від перенапруг залежить від правильного вибору характеристик засобів захисту в залежності від місця їхнього розташування. Але ці методи корисні лише на стадії проектування. Також в [9] пропонується для контролю стану ОПН проводити статистичний аналіз та узагальнення досвіду експлуатації на основі використання датчиків спрацювання ОПН при захисті обладнання. В [7]-[9] розглядаються методи діагностування технічного стану апаратів під робочою напругою. Розглянуті вище моделі базуються на рекомендаціях щодо вибору апаратів захисту (за основними характеристиками) на стадії проектування електроустановки, що є запорукою їхньої нормальної експлуатації, або досліджують ТС апаратів захисту за однією характеристикою, що не є досить об’єктивно.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою статті є розробка математичної моделі комплексної оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг з використанням апарату нечітких множин, яка ґрунтується на експертних знаннях та діагностичних даних отриманих в експлуатаційний період.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При наявності різнорідної вхідної інформації, яка описує поточний стан досліджуваного об’єкта, використання фізико-математичних моделей, які б могли інтегрувати різні за своєю природою параметри впливу на цей стан, задача досить складна, а в де яких випадках і неможлива. Описання стану досліджуваного об’єкта ускладнюється також відсутністю або неповною достовірності ретроспективних даних про функціонування даного виду обладнання, недоступністю інформації про устрій та технологію виробництва.

В якості однієї з передумов виникнення нечіткої логіки – є так званий принцип несумісності, котрий полягає в тому, що зі збільшенням розміру та складності системи, суттєво ускладнюється її моделювання за допомогою розповсюджених математичних засобів. Тому одним із засобів подолання цієї проблеми є використання нечіткої логіки для наближеної оцінки стану об’єкта. Побудова нечітких моделей на базі експертних знань, проведення операцій з використанням нечітких логічних правил, отримання на їхній основі нечітких висновків та приведення їх до чіткості.

Для визначення ймовірності відмови апарату захисту від перенапруги, пропонується використання параметрів згідно з [1], [2], за якими визначають ТС та ймовірність відмови апарату:

- опір елементів апаратів захисту;

- струм провідності апаратів захисту;
- контроль апаратів захисту за допомогою інфрачервоної техніки;
- контроль пропускної спроможності апарату від дії імпульсів гранично допустимих струмів.

Контроль цих параметрів обумовлений наявністю виникнення таких дефектів:

- зволоження нелінійних робочих елементів (вілітових дисків у ВР та окисно-цинкових дискових опорів у ОПН);
- пробій слюдяної ізоляційної прокладки в іскрових проміжків у ВР;
- руйнування шунтуючих резисторів для розподілення напруги по блокам іскрових проміжків;
- окислення поверхонь зерен карборунду у ВР та металізованих поверхонь окисно-цинкових дискових опорів у ОПН.

Більш різка нелінійність вольт-амперної характеристики ОПН дозволила видалити з його схеми іскрові проміжки, та дало можливість безпосереднього приєднання апарату до обладнання яке захищається. Це значно підвищує його надійність та зменшує габаритні розміри в порівнянні з ВР одного класу напруги [10], [11].

В загальному вигляді нечітка модель має наступну структуру [12]:

- функції приналежності (ФП) вхідних і вихідних змінних – $f(P)$;
- база нечітких правил виду «ЯКЩО – ТО» з ваговими коефіцієнтами $W - R(W)$;
- механізм нечіткого виводу, який реалізує логічні операції і використовує правила виду «ЯКЩО – ТО» для відображення вхідних нечітких змінних в нечітку вихідну змінну – M ;
- метод дефазифікації – D .

Тоді нечітка вихідна множина станів об'єкта S визначається із співвідношення:

$$S = F(f(P), R(W), M, D, A). \quad (1)$$

Лінгвістичні змінні A визначаються на універсальних множинах вхідних змінних $X_i = \left[\overline{x_i}, \underline{x_i}\right], i = \overline{1,k}.$

Лінгвістична змінна S визначається на універсальних множинах вихідних змінних $Y_i = \left[\overline{y_i}, \underline{y_i}\right]$

Вводяться терм множини вхідних лінгвістичних змінних $A = \{A_{i1}, A_{i2}, ..., A_{iq}\}, i = \overline{1,k}$ і терм множина вихідної лінгвістичної змінної $S = \{S_1, S_2, ..., S_n\}$.

Однією з основних задач в побудові нечіткої моделі – є визначення виду і кількості термів функцій приналежності, ступеня приналежності вхідних та вихідної лінгвістичної змінної відповідним нечітким терм множинам ФП $f(P)$. ФП зручно задавати в параметричній формі, тому їхня побудова зводиться до визначення параметрів [13]. Якщо відомі інтервальні значення (початкове та допустиме), то використовуємо лінійну апроксимацію. В цьому випадку параметр можна розглядати трикутною або трапецевидною формою ФП:

$$\mu(x,a,b,c) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a}, b \ge x > a, \\ \dfrac{c-x}{c-b}, c > x > b, \\ 0, x < a, x > c; \end{cases} \quad (2)$$

- трикутна (рис. 1).

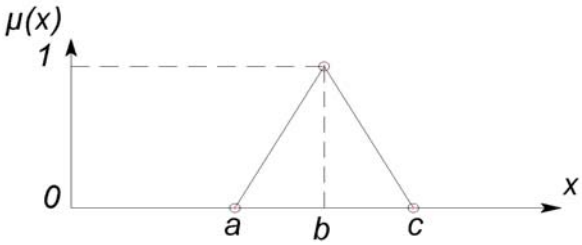


Рисунок 1. Трикутна форма ФП.

$$\mu(x,a,b,c,d) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a}, b \ge x > a, \\ 1, c > x > b, \\ \dfrac{d-x}{d-c}, d > x > c, \\ 0, x < a, x > d; \end{cases} \quad (3)$$

- трапецієвидна (рис. 2).

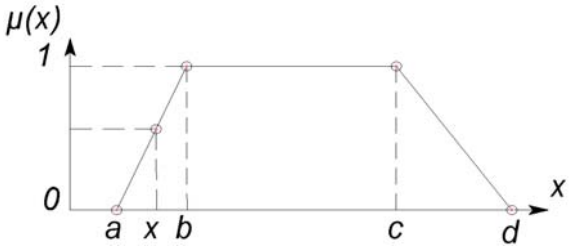


Рисунок 2. Трапецієвидна форма ФП.

Для визначення параметрів ФП вхідних лінгвістичних змінних користуємося методом експертних оцінок. Ступень приналежності нечіткій множині A_i визначаємо методом парних порівнянь Сааті [14]. Для визначення параметрів ФП вихідних лінгвістичних змінних користуємося шкалою бажаності Харрінгтона відмітки якої отримані на основі статистичного аналізу великого масиву даних та мають універсальне застосування [15]. Діапазон термів нечіткої вихідної лінгвістичної змінної наведений в табл.1.

Побудова ФП методом Сааті полягає в наступному:

- експерт, для кожної пари елементів універсальної множини, виконує оцінку переваги одного

елементу над іншим за властивостями нечіткої множини по шкалі парних порівнянь Сааті [16];
- парні порівняння записуються у вигляді матриці $\Lambda = \lfloor \lambda_{ij} \rfloor$ де λ_{ij} – рівень переваги *i*-того елементу над *j*-тим, $\lambda_{ij} = 1/\lambda_{ji}, \lambda_{ii} = 1$;
- ступені приналежності приймають рівними відповідним координатам власного вектора $W = (W_1, W_2, ..., W_n)^T$ матриці парних порівнянь W.

Таблиця 1. Шкала інтервалів бажаності Харрінгтона.

№	Бажаність	Чисельне значення
1	Висока	0,8-0,1
2	Середньовисока	0,64-0,8
3	Середня	0,36-0,64
4	Середньонизька	0,2-0,36
5	Низька	0,0-0,2

Власний вектор визначається системою рівнянь:

$$\begin{cases} (\Lambda - \lambda E)W = 0, \\ \sum_{i=1}^{n} w_i = 1. \end{cases} \quad (4)$$

де λ – найбільше власне число матриці Λ; E – одинична матриця розмірності $(n \times n)$.

Дефазифікацію виконано на основі методу центру ваги або центру площ [13]. Приблизна модифікація центру ваги:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{m} \mu_i(s) \cdot s_i}{\sum_{i=1}^{m} \mu_i(s)}. \quad (5)$$

Отримана за допомогою нечіткої моделі, яка базується на використанні правил нечіткого логічного висновку, величина S кількісно характеризує ймовірність відмови апарату захисту, залежно від стану контрольованих параметрів.

Приклад та результати

Всі основні експлуатаційні фактори за своєю фізичною природою поділяються на наступні:

- електричні;
- теплові;
- механічні;
- хімічні.

Контроль стану апаратів захисту (ВР та ОПН), який змінюється під дією цих факторів, здійснюється наступним чином: механічні та хімічні контролюються експлуатаційним наглядом (наявність тріщин та сколів, корозії, забруднень, також зняття показів реєстраторів спрацювання тощо), електричні та теплові контролюються періодичними випробуваннями (контроль електричних параметрів), контролем теплового стану засобами інфрачервоної техніки [10], [11].

Згідно [10], [11], виділяються основні контрольовані експлуатаційні параметри за якими буде побудована нечітка модель визначення ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг:

- вимірювання опору елементів ВР, ОПН;
- вимірювання струму провідності за випрямленої напруги;
- контроль теплового стану елементів за допомогою інфрачервоної техніки;
- кількість спрацювань апаратів захисту (за даними реєстратора спрацювань).

Для використання обраних параметрів, при розв'язанні задачі оцінки стану апарату захисту від перенапруг для визначення ймовірності відмови за нечіткою моделлю, обрано наступні вхідні лінгвістичні змінні:

- $\boldsymbol{A}_1$ = «Значення опору елемента»;
- $\boldsymbol{A}_2$ = «Значення струму провідності елемента»;
- $\boldsymbol{A}_3$ = «Надлишкова температурна різниця»;
- $\boldsymbol{A}_4$ = «Кількість спрацювань апарата».

Для кожної лінгвістичної змінної введені наступні нечіткі терми:

- A_1 : AH_1 = «Аварійно низьке», $Д_1$ = «Допустиме», B_1 = «Високе»;
- A_2 : H_2 = «Низьке», $Д_2$ = «Допустиме», AB_2 = «Аварійно високе»;
- A_3 : $П_3$ = «Початкова», P_3 = «Розвинена»;
- A_4 : $Д_4$ = «Допустима», B_4 = «Висока».

Вихідну множину ймовірності подій S описано лінгвістичною змінною «Суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг». Терми вихідної змінної та їхні інтервали визначено за стандартними відмітками вербально-числової шкали Харрінгтона:

- B = «Висока ймовірність відмови» (0,8; 1,0];
- CB = «Середньовисока ймовірність відмови» (0,64; 0,8];
- C = «Середня ймовірність відмови» (0,36; 0,64];
- CH = «Середньонизька ймовірність відмови» (0,2; 0,36];
- H = «Низька ймовірність відмови»[0,0;0,2].

База правил для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг формується на основі експертних знань характеристик та процесів досліджуваного об'єкта. В даній моделі вона представляє собою набір із 36 продукційних правил наступного типу: «*ЯКЩО значення опору елемента* $A_1 = \{AH_1, Д_1, B_1\}$ *ТА значення струму провідності елемента* $A_2 = \{H_2, Д_2, AB_2\}$*ТА поміж елементна температурна різниця* $A_3 = \{П_3, P_3\}$*ТА кількість спрацювань апарата* $A_4 = \{Д_4, B_4\}$*, ТО суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг* $S = \{B, CB, C, CH, H\}$».

Сформована загальна база правил для оцінки

ймовірності відмови апарату наведена в табл. 2.

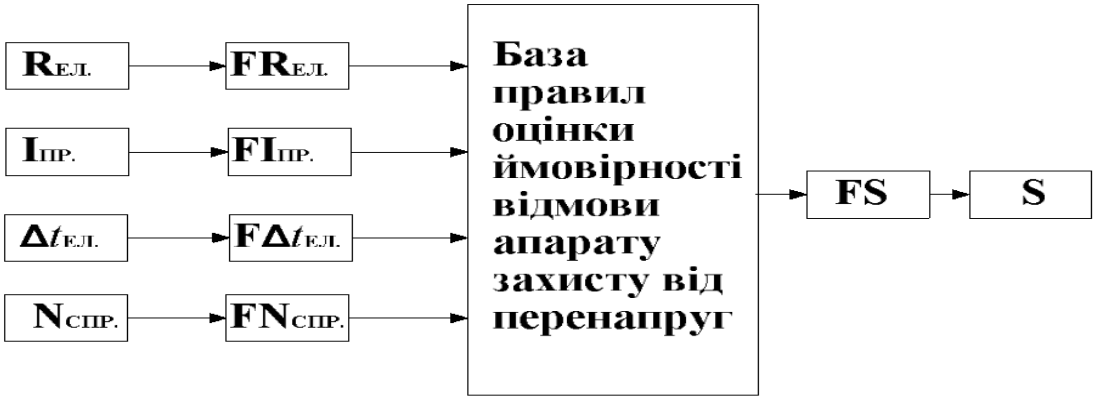
Структурна схема розробленої нечіткої моделі для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг представлена на рис. 2.

Для ОПН в яких нелінійні робочі резистори виготовляються з оксиду цинку з більш високою нелінійною характеристикою, на відміну від ВР, де використовується карбід кремнію зі зв'язкою із рідкого скла така вхідна характеристика як кількість спрацювань апарата не є впливовою [1], [2]. Завдяки гнучкості розробленої нечіткої моделі даний експлуатаційний параметр для оцінки ймовірності відмови ОПН не використовується. База правил для оцінки ймовірності відмови ОПН наведена в табл. 3.

Для достовірної оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг необхідно виконати настройку параметрів ФП вхідних та вихідних лінгвістичних змінних. У зв'язку з відсутністю достатньої кількості статистичних даних про вплив факторів на ТС апарату захисту, яка б дала нам можливість з високою мірою оцінити ймовірність його відмови, настройку параметрів ФП вхідних лінгвістичних змінних виконаємо за допомогою експертних опитувань. Для побудови ФП нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних A_1, A_2, A_3, A_4 опитано 9 експертів які мають досвід роботи в службах діагностування стану електротехнічного обладнання підприємств ПрАТ «Укргідроенерго», ДП НЕК «Укренерго» ДнЕС, ПрАТ «Запоріжжяобленерго». При опитуванні всі розмірності визначені в умовних одиницях в межах нормованих інтервальних значень апаратів захисту. Результати обробки експертних опитувань приведені в табл. 4.

Таблица 2. Загальна база правил для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг.

A_4 / A_3	**$Д_4$**				**$В_4$**			
	A_2 / A_1	$Н_2$	$Д_2$	$АВ_2$	A_2 / A_1	$Н_2$	$Д_2$	$АВ_2$
$П_3$	$В_1$	СН	СН	СВ	$В_1$	СН	СН	СВ
	$Д_1$	СН	Н	В	$Д_1$	СН	СН	В
	$АН_1$	СВ	СВ	В	$АН_1$	СВ	СВ	В
$Р_3$	A_2 / A_1	$Н_2$	$Д_2$	$АВ_2$	A_2 / A_1	$Н_2$	$Д_2$	$АВ_2$
	$В_1$	С	С	В	$В_1$	СВ	СВ	В
	$Д_1$	С	СН	В	$Д_1$	С	С	В
	$АН_1$	СВ	В	В	$АН_1$	СВ	В	В



Rел. – значення опору елемента апарата захисту; Iпр. – значення струму провідності апарата захисту; Δtел. – надлишкова температурна різниця; Nспр. – кількість спрацювань апарата; F Rел. – лінгвістична змінна «Значення опору елемента»; F Iпр. – лінгвістична змінна «Значення струму провідності елемента»; F Δtел. – лінгвістична змінна «Надлишкова температурна різниця»; F Nспр. – лінгвістична змінна «Кількість спрацювань апарата»; FS – лінгвістична змінна «Суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг»; S – значення суб'єктивної ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг.

Рисунок 3. Нечітка модель для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг:

Згідно (4) визначені ступені приналежності значень вхідних лінгвістичних змінних нечітким термам. Результати розрахунків зведені в табл. 5-8.

ФП нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних будуємо згідно (2), (3), ФП нечітких термів вихідної змінної «Суб'єктивна ймовірність відмови апара-

ту захисту від перенапруг» визначається на стандартних інтервалах вербально-числової шкали Харрінгтона. Графічне зображення ФП нечітких термів лінгвістичних змінних представлені на рис. 3-7.

Таблиця 3. База правил для оцінки ймовірності відмови ОПН.

A_3							
$П_3$				$Р_3$			
A_2 / A_1	$Н_2$	$Д_2$	$АВ_2$	A_2 / A_1	$Н_2$	$Д_2$	$АВ_2$
$В_1$	СН	СН	СВ	$В_1$	СВ	СВ	В
$Д_1$	СН	Н	В	$Д_1$	С	С	В
$АН_1$	СВ	СВ	В	$АН_1$	СВ	В	В

Таблиця 4. Результати обробки експертних оцінок.

A_1= «Значення опору елемента»						
$R_{ел.}$, в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$АН_1$ = «Аварійно низьке»	9	5	0	0	0	0
$Д_1$ = «Допустиме»	0	4	9	9	7	0
$В_1$ = «Високе»	0	0	0	0	2	9
A_2= «Значення струму провідності елемента»						
$I_{пр.}$, в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$Н_2$ = «Низьке»	9	7	0	0	0	0
$Д_2$ = «Допустиме»	0	2	9	9	1	0
$АВ_2$ = «Аварійно високе»	0	0	0	0	8	9
A_3= «Надлишкова температурна різниця»						
$\Delta t_{ел.}$, в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$П_3$ = «Початкова»	9	9	7	3	0	0
$Р_3$ = «Розвинена»	0	0	2	6	9	9
A_4= «Кількість спрацювань апарата»						
$N_{спр.}$, в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$Д_4$ = «Допустима»	9	9	9	8	2	0
$В_4$ = «Висока»	0	0	0	1	7	9

Таблиця 5. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Значення опору елемента».

$R_{ел.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{аварійно\ низьке}(R_{ел.})$	1	0,557	0	0	0	0
$\mu_{допустиме}(R_{ел.})$	0	0,443	1	1	0,776	0
$\mu_{високе}(R_{ел.})$	0	0	0	0	0,224	1

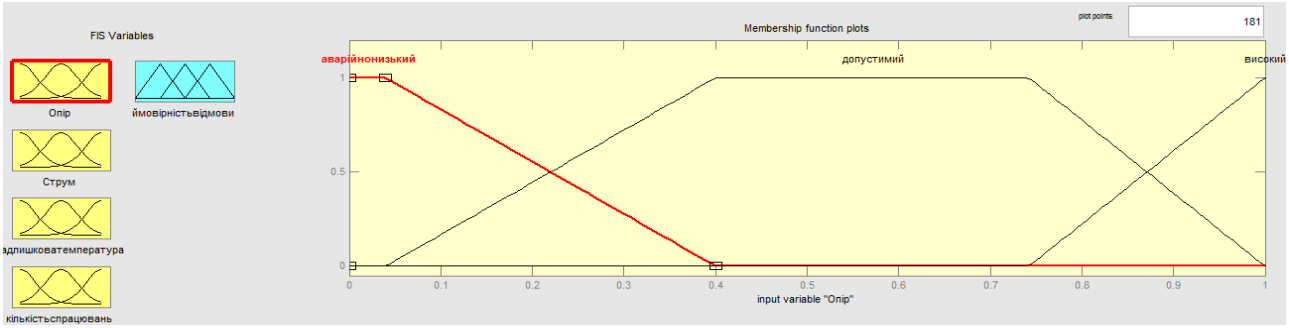


Рисунок 4. ФП термів лінгвістичної змінної «Значення опору елемента».

Таблица 6. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Значення струму провідності елемента».

$I_{пр.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{низьке}$ ($I_{пр.}$)	1	0,778	0	0	0	0
$\mu_{допустиме}$ ($I_{пр.}$)	0	0,222	1	1	0,111	0
$\mu_{аварійно\ високе}$ ($I_{пр.}$)	0	0	0	0	0,889	1

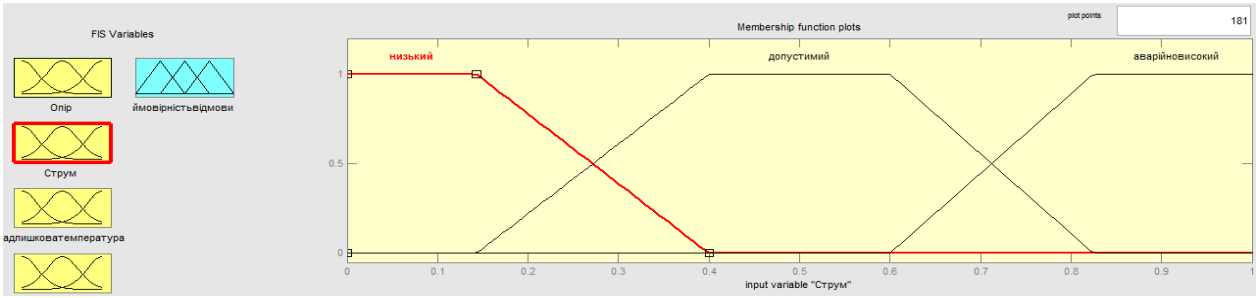


Рисунок 5. ФП термів лінгвістичної змінної «Значення струму провідності елемента».

Таблица 7. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Надлишкова температурна різниця».

$\Delta t_{ел.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{початкова}$ ($I_{пр.}$)	1	1	0,779	0,333	0	0
$\Delta t_{ел.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{розвинена}$ ($I_{пр.}$)	0	0	0,221	0,667	1	1

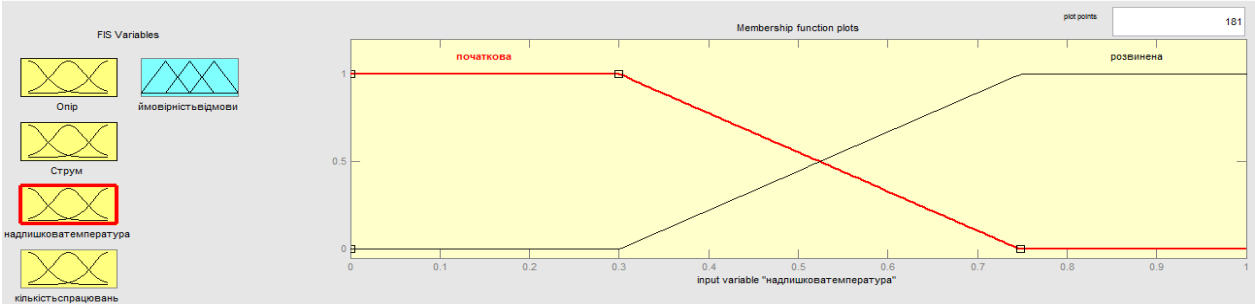


Рисунок 6. ФП термів лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця».

Таблица 8. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Кількість спрацювань апарата».

$N_{спр.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{допустима}$ ($I_{пр.}$)	1	1	1	0,890	0,223	0
$\mu_{висока}$ ($I_{пр.}$)	0	0	0	0,110	0,777	1

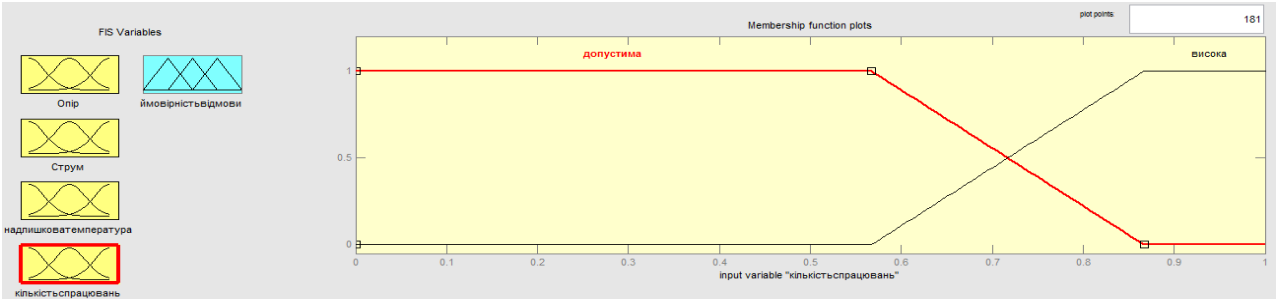


Рисунок 7. ФП термів лінгвістичної змінної «Кількість спрацювань апарата».

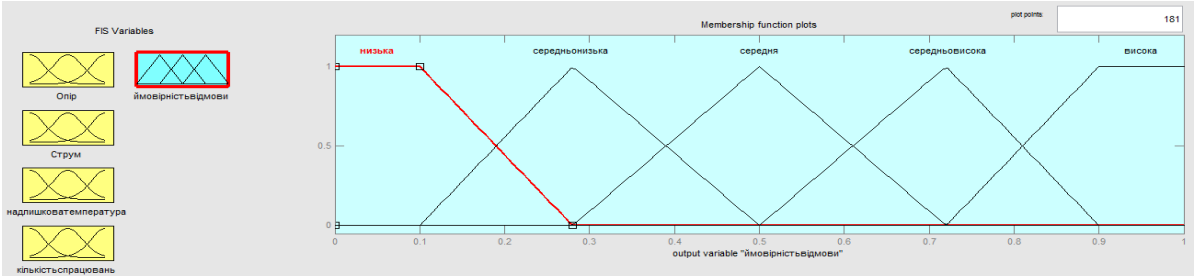


Рисунок 8. ФП термів лінгвістичної змінної «Суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг»

На ПС «Дніпровська - 750» в ході тепловізійного обстеження було виявлено підозру на дефект розрядника типу РВМК – 750М в комірці РВ 750 2АТ ф.-«А» рис. 8.

Розрядник був виведений з експлуатації для позапланових випробувань, результати яких зведені до табл.9. Нормативні значення виміряних характеристик приведені згідно [1], [2], [17], [18].

За виміряними характеристиками виконаємо оцінку ймовірності відмови розрядника за розробленою нечіткою моделлю. Згідно виміряних і нормативних значень переведемо виміряні показники з іменованих в відносні одиниці:

- значення опору елемента $R_{ел.}$>1,0 в.о.;
- значення струму провідності елемента $I_{пр.}$=0,125 в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{ел.}$>1,0 в.о.;
- кількість спрацювань апарата $N_{спр.}$=0,59 в.о.

Оцінка ймовірності відмови апарату захисту виконується за допомогою пакету MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, яка представлена на рис. 9. Значення отриманої ймовірності відмови розрядника:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{m} \mu_i(s) \cdot s_i}{\sum_{i=1}^{m} \mu_i(s)} = 0{,}518, \text{ â.î.}$$

На ПС Правобережна-330 кВ Дніпровської ГЕС-1 виконано оцінку ймовірності відмови обмежувача перенапруги ОПН – 330 кВ комірки ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS» . В комірці АТ – 331 ф. «С» на протязі чот ирьох років двічі відбувалося коротке замикання на землю за помилкою обслуговуючого персоналу. Оцінку виконано за розробленою нечіткою моделлю, без виводу обладнання з експлуатації. Характеристики за якими визначено ймовірність відмови апарату захисту отримані за даними термограми елементів ОПН (рис. 10 а; рис. 10 б; рис. 10 в), показами

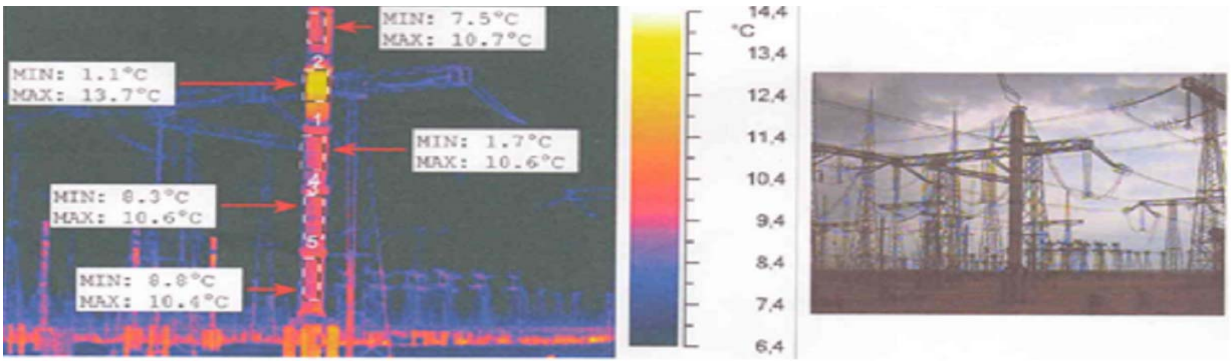


Рисунок 9. Термограма розрядника типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ ф.-«А».

Таблиця 9. Результати позапланових випробувань розрядника типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ ф.-«А».

Найменування підстанції	Диспетчерське найменування	Значення опору елемента, МОм		Значення струму провідності елемента, мкА		Надлишкова температурна різниця, ^{0}С		Кількість спрацювань (за даними реєстратора), одиниць.	
1	2	3		4		5		6	
ПС – Дніпровська – 750 кВ	РВ 750 2АТ ф.-«А»	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Зареєстровано	Нормативне
		8500	Від 1300 до 7000	260	Від 250 до 330	12,6	Не більш 2,0 ^{0}С	11	20

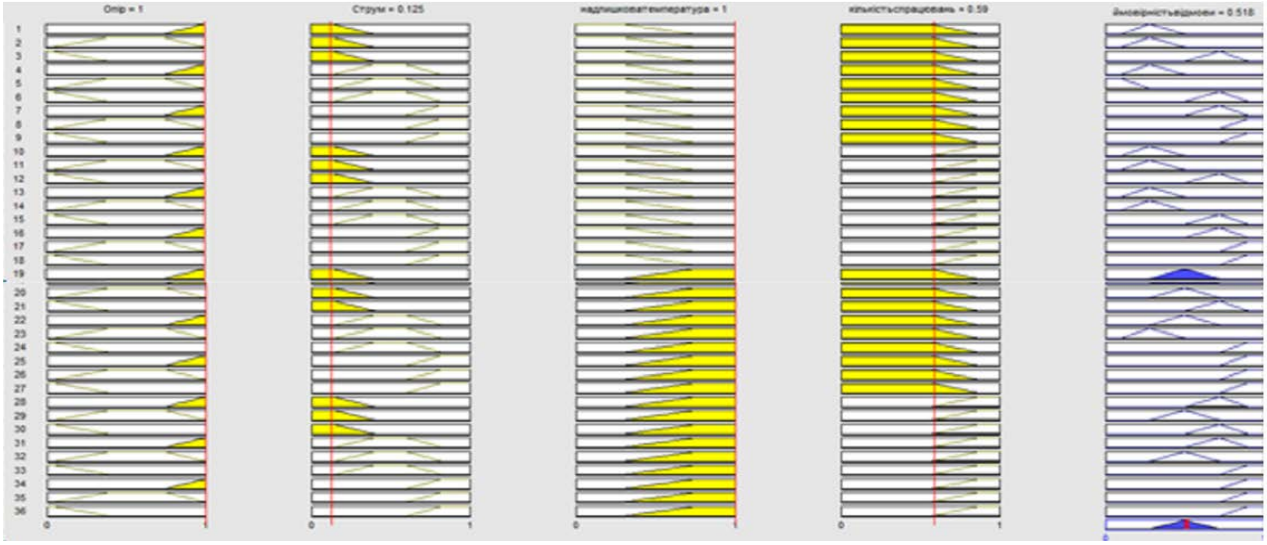


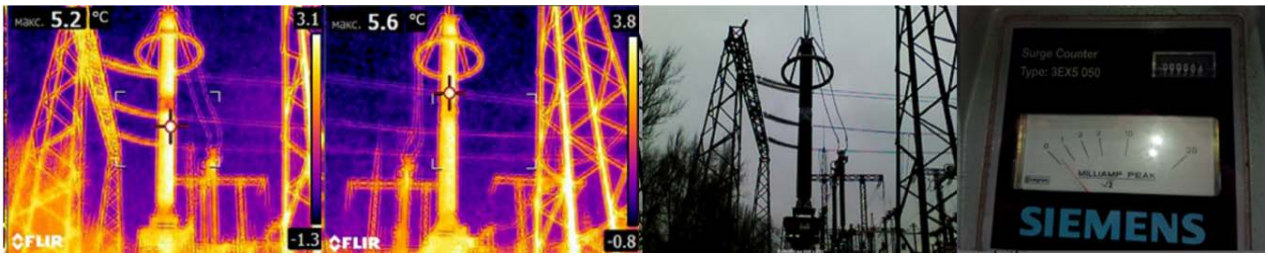
Рисунок 10. Оцінка ймовірності відмови розрядника типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ ф.-«А» ПС Дніпровська – 750 кВ.

Згідно виміряних і нормативних значень переведемо виміряні показники з іменованих в відносні одиниці:

- значення опору елемента $R_{ел.}$=0,429 в.о.;
- значення струму провідності елемента $I_{пр.}$=0,083 в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{ел.}$=0,2 в.о.;

Оцінка ймовірності відмови апарату захисту виконується за допомогою пакету MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, яка представлена на рис.11. Значення отриманої ймовірності відмови обмежувача перенапруг:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{m} \mu_i(s) \cdot s_i}{\sum_{i=1}^{m} \mu_i(s)} = 0{,}293\, в.о.$$



а) б) в) г)

Рисунок 11. Термограма обмежувача перенапруг з показниками реєстратора спрацювань з токовою індикацією комірки ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS» ПС Правобережна – 330 кВ Дніпровської ГЕС-1.

Таблиця 10. Результати виміряних характеристик обмежувача перенапруг фірми «SIEMENS» комірки ОПН АТ - 331 ф.-«С».

Найменування підстанції	Диспетчерське найменування	Значення опору елемента, МОм		Значення струму провідності елемента, мкА		Надлишкова температурна різниця,0С	
ПС – Правобережна – 330 кВ	ОПН АТ - 331 ф.-«С»	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне
		6000	Від 3000 до 10000	250	Від 0 до 3000	0,4	Не більш 2,0 0С

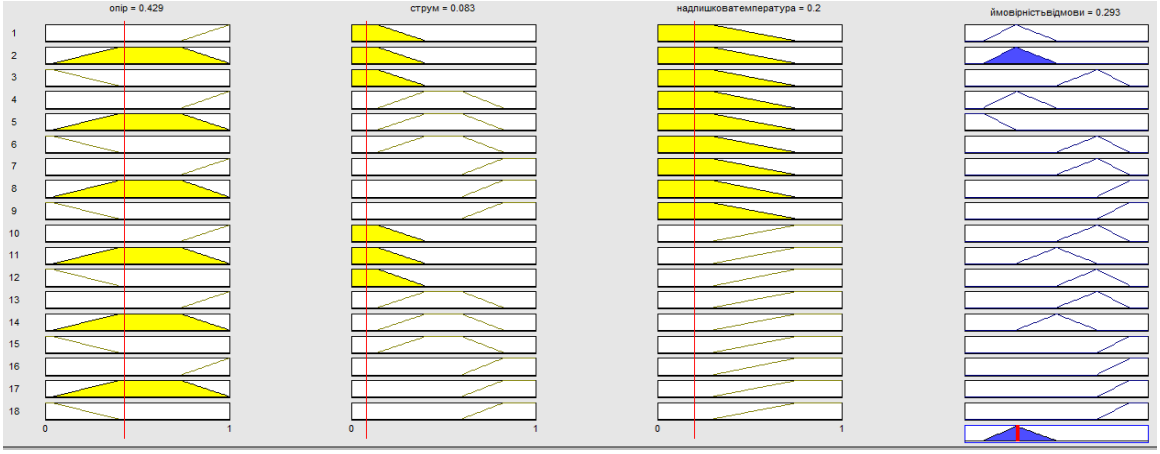


Рисунок 12. Оцінка ймовірності відмови обмежувача перенапруг комірки ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS» ПС Правобережна – 330 кВ Дніпровської ГЕС-1.

V. ВИСНОВКИ

Набула подальшого розвитку теорія технічного діагностування високовольтних апаратів захисту від перенапруг без відключення апаратів від мережі (онлайн) на базі нечіткої моделі визначення ймовірності відмови апарату. Від відомих модель відрізняється тим, що враховує стан ізоляції, стан струмопровідних частин, кількість спрацювань апарату, тепловий стан апарату та контактних з'єднань, та дозволяє рахувати ймовірність відмови апарату під час його експлуатації. Розроблена математична модель може застосовуватися в автоматизованих програмних та програмно-апаратних комплексах для: діагностування, планування обслуговування та ремонтів, розподілу фінансових активів електроенергетичних підприємств. Розроблена нечітка модель оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг може бути застосована для всіх типів апаратів захисту розподільчих пристроїв високої напруги.

На базі моделі розроблено автоматизований програмний комплекс, з використанням якого діагностувався стан обмежувача перенапруги типу 3EP2 276-2PF32-1NA1 фірми «SIEMENS», який експлуатується на Дніпровський ГЕС-1, ВРП-330 кВ, комірки ОПН АТ-331, та вентильний розрядник типу РВМК-750М комірки РВ 750 2АТ. Була оцінена ймовірність відмови розрядника типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ ф.-«А», яка виявилась рівною S=0,518 в.о. Виходячи з того, що по побудованій нечіткій моделі при S=1,0 в.о. відбувається повна відмова обладнання, тобто аварія з пошкодженням обладнання, технічним керівником було прийнято рішення про вивід обладнання з роботи для обстеження його окремих вузлів. При обстеженні було виявлено дефект у вигляді значного окислення контактів шунтуючих опорів основного елементу розрядника. Також була проведена оцінка ймовірності відмови обмежувача перенапруг комірки ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS» ПС Правобережна – 330 кВ Дніпровської ГЕС-1 без виводу апарата з роботи, який останній термін експлуатації працював в важких умовах і потребував оцінки його технічного стану. За розробленою нечіткою моделлю технічний стан ОПН склав S=0,293 в.о., без відхилень по вхідним контрольованим параметрам. Контроль технічного стану ОПН продовжено без виводу з експлуатації. Результати діагностування різних захисних апаратів підтвердили адекватність розробленої моделі.

Побудова цієї моделі потребує експертного досвіду в експлуатації та діагностуванні технічного стану апарату захисту, але не потребує досконалого знання технології виробництва та наявності ретроспективної інформації про функціонування об'єкта дослідження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Засоби захисту від перенапруг у електроустановках 6-750 кВ. [Текст]: Інструкція з монтажу та експлуатації. М-вом палива та енергетики України 20.02.2002. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2002. – 138с.

[2] Норми випробування електрообладнання [Текст]: СОУ-Н ЕЕ 20.302: 2007: затв. М-вом палива та енергетики України 15.01.2007. –К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2007. – 278с.

[3] Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила [Текст]: ГКД 34.20.507-2003: затв. М-вом палива та енергетики України 13.06.2003. –К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2003. – 597с. – ISBN 966-96099-1-7.

[4] Лебедка, С.Н. Математическое моделирование режимов работы электросетей с ОПН [Текст]/ Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – №3/8. – С.25-29.

[5] Гриб, О.Г. Работа средств защиты от перенапряжения в энергосистемах при наличиии высших гармоник [Текст] / О.Г Гриб, С.Ю. Шевченко, Д.А. Гапон [и др.] / Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 41(1084). – С. 78-86.

[6] Шевченко, С.Ю. Особенности защиты оборудова-

ния подстанций от перенапряжений [Текст]/ С.Ю. Шевченко, О.Н. Довгалюк, А.Е. Пиротти / Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – №1(14). – С. 308-312.

[7] Heinrich, C. Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures [Text] / C. Heinrich, V. Hinrichsen. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – Volume 16. – Issue 1. – P. 138-143. DOI: 10.1109/61.905619.

[8] Yu-ting, Xu. Research on On-line Monitoring of Insulation of Metal Oxide Surge Arrester [Text] / Xu Yu-ting, Xiao-hua Yuan, Ya-li MO, Guo-tai Dong and De-cheng ZHU // International Conference on Material Science and Civil Engineering. – 2016. – 328-336.

[9] Metwally, I. A. Online condition monitoring of surge arresters based on third-harmonic analysis of leakage current [Text] / I. A. Metwally, M. Eladawy, E. A. Feilat // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2017. – Volume 24. – Issue 4. –P. 2274-2281. DOI:10.1109/TDEI.2017.006334/.

[10] Чунихин, А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. -3-е изд. переаб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.

[11] Электрические аппараты высокого напряжения: Учебное пособие для вузов [Текст] / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, В.Л. Иванов и др.; Под ред. Г.Н. Александрова. –Л.: Энегоатомиздат, 1989. – 344 с.

[12] Костерєв, М.В. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем [Текст] / М.В. Костерєв, Є.І. Бардік. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 131 с.

[13] Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – телеком, 2007. – 288 с.

[14] Літвінов, В.В. Використання методів попарного порівняння для визначення пріоритетності способів забезпечення статичної стійкості асинхронних двигунів в умовах багатокритеріального вибору [Текст] / В.В. Літвінов, М.В. Костерєв, П.Л. Денисюк/ Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – №2. – С. 24-29.

[15] Ременников, В.Б. Управленческие решения [Текст] / В.Б. Ременников. Минск: Юнити, 2005. – 144 с.

[16] Saati, T. Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy. [Text]/ T. Saati – M.: Radio i svyaz', 1993. – 278 p.

[17] Гобрей, В. Чернов, Є. Удод Діагностування електроустановок 0,4-750 кВ засобами інфрачервоної техніки. [Текст] / Навч. методичний посібник / Р. Гобрей, В. Чернов, Є. Удод. – К.: «КВІЦ», – 2007. – 374с. ISBN 978-966-96441-8-3.

[18] Техническое диагностирование электрооборудования и контактных соединений электроустановок и воздушных линий электропередачи средствами инфракрасной техники [Текст]: СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007: затв. М-вом палива та енергетики України 15.02.2007. – К.: ГП НЭК «Укрэнерго», 2007. – 123 с. ISBN 978-966-96441-7-6.

Стаття надійшла до редакції 06.05.2018

НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА АПАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

ДОМОРОЩИН С.В. аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, инженер участка испытаний и измерений Днепровской ГЭС-1, г. Запорожье, Украина, e-mail: domoroshchin77@gmail.com;

САХНО А.А. канд. техн. наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, Украина, e-mail: a.asakhno@yahoo.com;

Цель работы. *Разработка математической модели комплексной оценки вероятности отказа аппарата защиты от перенапряжений с использованием аппарата нечетких множеств, которая основывается на экспертных знаниях и диагностических данных полученных в эксплуатационный период.*

Методы исследования. *Исследование проведено с использованием метода экспертного опроса, метода весовых коэффициентов, метода матриц попарного сравнения Саати, методов нечеткой логики, теории нечетких множеств, теории техники высоких напряжений, теории теплового излучения.*

Полученные результаты. *Авторами была разработана нечеткая модель по которой определяется вероятность отказа вентильного разрядника и ограничителя напряжения с учетом влияния совокупности таких факторов как состояние изоляции, состояние токопроводящих нелинейных элементов, температурного состояния объекта исследования, количества срабатываний аппарата. На базе модели разработан автоматизированный программный комплекс, с использованием которого диагностировалось состояние ограничителя перенапряжения типа 3EP2 276-2PF32-1NA1 фирмы "SIEMENS" который эксплуатируется на Днепровской ГЭС-1, ОРУ-330 кВ, ячейки ОПН АТ-331, и вентильный разрядник типа РВМК-750М ячейки РВ 750 2 АТ.*

Научная новизна. *Приобрела дальнейшее развитие теория технического диагностирования высоковольт-*

ных аппаратов защиты от перенапряжений без отключения аппаратов от сети (онлайн) на базе нечеткой модели определения вероятности отказа аппарата. От известных модель отличается тем, что учитывает состояние изоляции, состояние токопроводящих частей, количество срабатываний аппарата, тепловое состояние аппарата и контактных соединений, и позволяет рассчитывать вероятность отказа аппарата во время его эксплуатации.

Практическое значение. *Разработанная математическая модель может применяться в автоматизированных программных и программно-аппаратных комплексах для: диагностирования, планирования обслуживания и ремонта, распределения финансовых активов электроэнергетических предприятий. Результаты диагностирования разных аппаратов защиты подтвердили адекватность разработанной модели. Разработанная модель может быть применена для всех типов аппаратов защиты распределительных устройств высокого напряжения. Модель позволяет комплексно оценить техническое состояние исследуемого объекта проинтегрировав различные по своей природе входящие параметры (ток, сопротивление, температура и т.д.) которые влияют на техническое состояние и вероятность его отказа. Построенная модель позволяет выводить аппарат в ремонт по факту текущего состояния объекта, а не по календарному графику ремонтов, что позволит сэкономить материальный и человеческий ресурс, и с учетом государственного курса на оценку ресурса оборудования по фактическому состоянию и создание распределительных устройств без постоянного обслуживающего персонала очень актуальна.*

Ключевые слова: аппарат защиты от перенапряжений; вентильный разрядник; ограничитель перенапряжения; нечеткая модель; вероятность отказа; экспертный опрос.

FUZZY MODELING OF FAILURE PROBABILITY OF APARATES FOR PROTECTION FROM OVERVOLTAGE

DOMOROSHCHYN S.V. post-graduate of the electrical and electronic devices department of the Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, engineer of the test and measurement of the DneproHPS-1, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: domoroshchin77@gmail.com;

SAKHNO O.A. Ph.D, Associate professor of the electrical and electronic apparatuses department of the Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: a.asakhno@yahoo.com;

Purpose. *The aim of the article is to develop a mathematical model for a comprehensive assessment of the probability of failure of an overvoltage protection device using a fuzzy set device, which is based on expert knowledge and diagnostic data obtained during the operational period.*

Methodology. *The study was carried out using the expert survey method, weight coefficients method, Saati pair comparison matrix method, fuzzy logic methods, fuzzy sets theory, high voltage technology theory, thermal radiation theory.*

Findings. *The authors developed a fuzzy model for determining the probability of failure of a gate arrester and a voltage limiter, taking into account the influence of a combination of such factors as the state of insulation, the state of current-carrying nonlinear elements, the temperature state of the object under study, and the number of operations of the apparatus. On the basis of the model, an automated software system was developed, using which the state of the voltage limiter type 3ER2 276-2PF32-1NA1 of the «SIEMENS» company was diagnosed. It is operated at Dneprovskaya HPP-1, 330 kV for cell ОПН АТ-331, and arresters of type РВМК -750М for cell РВ 750 2 АТ.*

Originality. *The theory of technical diagnostics of high voltage overvoltage protection devices without disconnecting devices from the network (online) on the basis of a fuzzy model for determining the probability of failure of the device has been further developed. The known model differs from the known ones in that it takes into account the state of insulation, the state of the conductive parts, the number of operations of the apparatus, the thermal state of the apparatus and the contact connections, and allows calculating the probability of failure of the apparatus during its operation.*

Practical value. *The developed mathematical model can be used in automated software and hardware-software systems for: diagnosis, maintenance and repair planning, and distribution of financial assets of electric power enterprises. The results of diagnosing different protection apparatus confirmed the adequacy of the developed model. The developed model can be used for all types of protection devices for high voltage switchgears. The model makes it possible to comprehensively evaluate the technical state of the investigated object by integrating the input parameters (current, resistance, temperature, etc.) that are inherently different in nature and which affect the technical state and the probability of its failure. The constructed model allows the machine to be put out of repair after the current state of the object, and not according to the schedule of repairs, which will save the material and human resource, and taking into account the state course for estimating the equipment resource according to the actual state and creating switchgears without a permanent maintenance staff is very relevant.*

Keywords: overvoltage protection device; arrester; voltage limiter; fuzzy model; probability of failure; interviewing experts.

REFERENCES

[1] (2002). Zasoby zakhystu vid perenapruh u elektroustanovkakh 6-750 kV. Instruktsiia z montazhu ta ekspluatatsii. HKD 34.35.512-2002. Obiednannia enerhetychnykh pidpryemstv "Haluzevyi rezervno-investetsiinyi fond rozvytku enerhetyky", 138.

[2] (2009). Normy vyprobuvannia elektroobladnannia. SOU-N EE 20.302:2007. Ministerstvo palyva ta enerhetyky, 278.

[3] (2002). Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii I merezh. Pravyla. HKD 34.20.507-2003. "LvovORHRES, HDP "DonORHRES", 341.

[4] Lebedka, S.N. (2012). Matematicheskoe modelirovanie rezhimov raboty elektrosetey s OPN. *Skhidno-Evropeyskii zhurnal peredovyh technologii*, 3/8, 25-29. (in Russian.)

[5] Grib, O.G. (2014). Rabota sredstv zaschity ot perenapryazheniya v energosistemah pri nalichii vysshih garmonik. *Visnyk NTU "HPI"*, 41(1084), 78-86. (in Russian.)

[6] Shevchenko, S. Yu. (2013). Osobennosti zaschity oborudovaniya podstantsiy ot perenapryazheniy. *Naukovi pratsi DonNTU. Elektrotekhnika i enerhetyka*, 1(14), 308-312. (in Russian.)

[7] Heinrich, C., Hinrichsen, V. (2001). Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16, 1, 138-143. DOI: 10.1109/61.905619.

[8] Yu-ting XU, Xiao-hua YUAN, Ya-li MO, Guo-tai Dong and De-cheng (2016). Research on On-line Monitoring of Insulation of Metal Oxide Surge Arrester. *2016 International Conference on Material Science and Civil Engineering (MSCE 2016)*, 328-336.

[9] Ibrahim, A. Metwally, Mohamed Eladawy, E. A. Feilat. (2017). Online condition monitoring of surge arresters based on third-harmonic analysis of leakage current. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24, 4, 2274-2281. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006334.

[10] Chunihin, A.A. (1988). Elektricheskie apparaty: Obschiy kurs. Moscow: Energoamizdat, 720.

[11] Aleksandrov G.N., Borisov V.V., Ivanov V.L. (1989). Elektricheskie apparaty vysokogo napryazheniya. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Leningrad: Energoatomizdat, 344.

[12] Kosteriev, M. V. (2010). Pytannia pobudovy nechitkykh modelei otsinky tekhnicnoho stanu obiektiv elektrychnykh system. Kyiv: NTUU "KPI", 131.

[13] Shtovba, S.D. (2007). Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB. Moscow: Goryachaya liniya – telekom, 288.

[14] Litvinov V.V. (2010). Vykorystannia metodiv poparnoho porivniannia dlia vyznachennia priorytetnosti sposobiv zabezpechennia statychnoi stiikosti asynkhronnykh dvyhuniv v umovakh bahatokryterialnogo vuboru. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 2, 24-29.

[15] Remennikov, V.B. (2005). Upravlencheskie resheniya. Minsk: Yuniti, 144.

[16] Saati T. (1993). Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy. Moscow: Radio i svyaz', 278.

[17].Hobrei, R., Chernov V., Udod Ye. (2007). Diagnostuvannia elektroustanovok 0,4 – 750 kV zasobamy infrachervonoi tekhniky. Kyiv: "KVITs", 374.

[18](2007). Tekhnicheskoe diagnostirovaniye elektrooborudoviniya i kontaktnykh soedineniy elektroustanovok I vozdushnykh liniy elektroperedachi sredstvami infrakrasnoy tekhniki. SOU-N EE 20.577:2007. Ministerstvo palyva ta enerhetyky, 123