

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів

№ 32 (1204) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 32 (1204). – 63 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Дмитрисенко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;

Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;

В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;

В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора: В. Ф. Болух, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І. С. Варшамова, асистент.

Члени редколегії: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; В. І. Мілих, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д.т.н., проф.; В. Ю. Райнін, д-р техн. наук, проф.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів», індексується в наукометричних базах **Index Copernicus**, **Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ**, **WorldCat** і **Google Scholar** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 7 від 23.09.2016 р.

V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov

SYNTHESIS ASPECTS OF CRYOGENIC HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING SHIELDING INDUCTIVE SHORT-CIRCUIT CURRENT LIMITER

The short-circuit current limiter of inductive type with the high-temperature superconducting winding and screen is considered. The basic design parameters of the magnetic system were determined and features of the transition process at the initiation of short-circuit were analyzed.

Key words: short-circuit, current limiter, high temperature superconductor, ferromagnetic core.

Розглянуто обмежувач струму короткого замикання індуктивного типу з високотемпературними надпровідними обмоткою та екраном. Визначено основні конструктивні параметри магнітної системи і проаналізовано особливості перехідного процесу при виникненні струму короткого замикання.

Ключові слова: коротке замикання, обмежувач струму, високотемпературний надпровідник, магнітопровід.

Рассмотрен ограничитель тока короткого замыкания индуктивного типа с высокотемпературными сверхпроводящими обмоткой и экраном. Определены основные конструктивные параметры магнитной системы и проанализированы особенности переходного процесса при возникновении тока короткого замыкания.

Ключевые слова: короткое замыкание, ограничитель тока, высокотемпературный сверхпроводник, магнитопровод.

Introduction. Limiting short-circuit currents are quite actual problem as fault regimes that lead to equipment failure of electrical systems and power stations and can require later their removal and replacement.

The use of such device as superconducting short-circuit current limiter (SCCL) with low-temperature superconducting elements have no broad application because of expensiveness of liquid helium. Only with occurrence of the high-temperature superconducting (HTSC) materials cooled at temperature of liquid nitrogen (77 K), the different constructions of SCCL have been created. They can be divided into two basic groups: resistive and inductive [1].

Analysis of the SCCL. The constructive scheme of inductive SCCL with the HTSC screen, HTSC winding and magnetic core is shown in fig. 1. Whole magnetic system is immersed into cryostat [2].

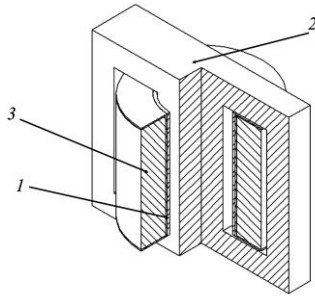


Fig. 1 – The constructive scheme of inductive SCCL:
1 – superconducting screen, 2 – magnetic core, 3 – superconducting winding

Analysis of the proposed inductive superconducting current limiter to determine the main parameters and mathematical model of transient short-circuit is a very important task.

The nominal current I_n flows through HTSC winding 3 connected in series with load. At normal operation (nominal parameters) the magnetic induction B_s created by the winding 3 is less than its critical value of the magnetic induction B_{sc} for HTSC screen 1 and magnetic field will not penetrate into the core 2.

At short-circuit the current in a HTSC winding 3 starts to increase and reaches value at which intensity of a magnetic field for the HTSC screen 1 becomes critical

H_{cr} . The HTSC screen loses superconducting properties at achievement on its surface value of critical magnetic induction B_{sc} and it ceases to shield a magnetic flux. The magnetic flux penetrates into the magnetic core 2, inductance of SCCL repeatedly increases, that results in limiting of the fixed value of short-circuit current.

SCCL is intended for an electric grid with nominal parameters: total power S_n , voltage U_n , current I_n . The HTSC wire tape [3] with width a_w and thickness b_w can be used for a winding. Its critical current i_{cr} should be 4–5 times more than nominal current I_n . The cross section of a superconductor is much less than cross section of a substrate, therefore in a zone of HTSC winding it is possible to take the relative magnetic permeability $\mu_r = 1$ [4].

The magnetic induction on a surface of superconducting screen B_s should be 2.5–3 times smaller than critical value B_{sc} . This magnetic induction determines number of rows of a superconducting winding by

$$n = \frac{B_s \cdot a_w}{\mu_0 \cdot I_n}. \quad (1)$$

The number of wires in row of winding is equal to:

$$m = h/a_w, \quad (2)$$

where h is the height of the superconducting screen and winding.

The total number of conductors of a superconducting winding is:

$$w = \frac{B_s \cdot h}{\mu_0 \cdot I_n}. \quad (3)$$

Considering that winding of SCCL keeps a superconducting condition both under nominal operation, and at short-circuit, it is possible to assume, that the voltage applied to it goes on compensation of electromotive force of a self-induction. At preservation of a superconducting condition of a winding the active component of a voltage drop across it is negligible. Therefore the voltage drop across SCCL at normal operation is characterized by voltage coefficient k_{CL} as follows:

$$U_{CL} = k_{CL} \cdot U_n = 4,44 f \cdot w \cdot \Phi, \quad (4)$$

where f is the frequency; Φ is the magnetic flux linked to a superconducting winding.

At first approximation the thickness of the HTSC

screen can be leave out of owing to its smallness thus $r_{mw} = r_{rod}$ and magnetic flux can be evaluated:

$$\Phi = B_s \pi \cdot r_{rod} \cdot n \cdot b_w. \quad (5)$$

At short-circuit the superconducting winding is under rated voltage

$$U_n = 4,44 f \cdot w \cdot B_{mc} \cdot \pi \cdot r_{rod}^2. \quad (6)$$

The magnetic induction B_{mc} of flux penetrated into an average rod of the magnetic core should correspond to average zone of B-H curve saturation. Otherwise the increase of short-circuit current will result in over-saturation of the magnetic core.

Comparing a voltage drop U_{CL} cross SCCL and nominal voltage U_n the dependence of radius of an average rod of magnetic core on voltage coefficient k_{CL} can be obtained as:

$$r_{rod} = \frac{B_s \cdot n \cdot b_w}{k_{CL} \cdot B_{mc}}. \quad (7)$$

It is possible to find the dependence of volumes of the magnetic core and a superconducting winding on voltage coefficient k_{CL} . Assuming on that at short-circuit the magnetic induction in the magnetic core is identical on all its pats, the volume of magnetic core V_{cr} is equal to the sum of volumes of two average rods of magnetic core and two yoke connections their total cross section is equal to cross section of an average rod of magnetic core:

$$V_{cr} = \pi \cdot r_{rod}^2 (2h + A). \quad (8)$$

The height of the screen h can be found from the expression (6), substituting the number of turns of a superconducting winding by formula (3):

$$h = \frac{\mu_0 \cdot S_n}{2\pi^2 f \cdot B_s \cdot B_{mc} \cdot r_{rod}^2}. \quad (9)$$

Substituting in (8) r_{cr} and h , also specifying with a sufficient degree of accuracy that $A = 4r_{rod}$, the volume of magnetic core expressed by:

$$V_{cr} = \frac{\mu_0 \cdot S_n}{\pi \cdot f \cdot B_s \cdot B_{mc}} + \frac{4\pi}{k_{CL}^3} \left(\frac{B_s \cdot n \cdot b_w}{B_{mc}} \right)^3. \quad (10)$$

The volume of superconducting winding V_{sw} is determined by number of turns multiplied into their average length and into cross section of a wire:

$$V_{sw} = \frac{\mu_0 \cdot S_n \cdot k_{CL}}{\pi \cdot f \cdot B_s^2}. \quad (11)$$

Thus, it is possible to determine the basic design parameters of SCCL proceeding from critical parameters of superconducting winding and screen. Comparison of volumes of magnetic core and winding gives a possibility to choose their parameters [5].

Considering the transient process in circuit with SCCL under normal operation, the current of load I_n is defined by nominal voltage U_n and impedance of load Z_l . Taking into account that the voltage drop across the SCCL does not exceed 3–5 % of U_n and nature of a voltage drop is only inductive, it is possible to consider, that $I_n = U_n / Z_l$. Thus the initial condition at the moment of short-circuit initiation is:

$$i_{n0} = I_{nm} \sin(\psi_u - \varphi_l), \quad (12)$$

where $I_{nm} = U_{nm} / Z_l$ is the amplitude of load nominal current; ψ_u is the initial phase of short-circuit; φ_l is the phase angle of load.

The transient process becomes complicated because at increase of short-circuit current flowing through the SCCL, the intensity of magnetic field on the surface of HTSC screen increases up to its critical value H_{cr} , the screen loses its superconducting properties, also the superconductivity of a HTSC winding can be lost when the current achieves critical value i_{cr} . Both the first and the second circumstances change the inductance of the current limiter and the resistance of its winding, this results in changing of the time constant and impedance of the SCCL.

All above-stated gives the basis to divide transient process in SCCL at short-circuit into three stages in two variants [6]:

1) from an initial current expressed by (12) to loss of superconducting properties of HTSC screen (or to loss of superconductivity of HTSC winding);

2) from loss of superconducting properties of HTSC screen to loss of superconductivity of HTSC winding (or on the contrary from loss of superconductivity of HTSC winding to loss of superconductivity of HTSC screen);

3) from loss of all effects of superconductivity to the fixed limiting current in electric grid.

Realization of the first or second variants is defined by selection of HTSC materials for the screen and winding, accordingly their critical parameters.

The induction of magnetic field on the surface of HTSC screen B_s is defined by a current and the number of rows n of HTSC winding. Therefore, knowing critical magnetic induction B_{cr} for HTSC material of the screen, it is possible to realize the first variant, when the number of rows of HTSC winding is n and B_{cr} reaches at $i_{cr} = (2,5-3) I_{nm}$. Thus the critical value of current should be $i_{cr} = (4-5) I_{nm}$, this guarantees normal operation of SCCL at potential fluctuations of current in the electric grid.

The second variant occurs if the critical value of current i_{cr} is equal to $(2,5-3) I_{nm}$, and B_{cr} for the screen reaches at current $(4-5) I_{nm}$.

The first stage is identical to both variants. Its parameters are following: R_{CL1} is the resistance of HTSC winding, L_{CL1} is the inductance of the current limiter and $Z_{CL1} = \sqrt{R_{CL1}^2 + (\omega L_{CL1})^2}$ is the impedance of current limiter, where $\omega = 2\pi f$ – angular frequency.

The resistance of HTSC winding is

$$R_{CL1} = P_0 / I_n^2, \quad (13)$$

where P_0 is the total losses in a superconducting winding.

Substituting B_s by (1) into expression (5) linked to w in ratio to I_n we obtain the inductance of the SCCL as:

$$L_{CL1} = \mu_0 n^2 w \frac{b_w}{a_w} \pi r_{rod}, \quad (14)$$

where w is the number of turns in HTSC winding; a_w is the width of tape wire; b_w is the thickness of tape wire.

At the first stage the solution can be presented as $i_{cr1} = i_{fx1} + i_{fr1}$, where fixed current

$i_{fx1} = \frac{U_{nm}}{Z_{CL1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{CL1})$ and the free component i_{fr1}

is determined by the differential equation

$L_{CL1} \frac{di_{fr1}}{dt} + R_{CL1} i_{fr1} = 0$, that gives in a general form

$$i_{fr1} = A_1 e^{-\frac{R_{CL1} t}{L_{CL1}}}$$

$$\text{Then } i_{cr1}(t) = \frac{U_{nm}}{Z_{CL1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{CL1}) + A_1 e^{-\frac{R_{CL1} t}{L_{CL1}}},$$

$$\text{where } \varphi_{CL1} = \arctg \frac{\omega L_{CL1}}{R_{CL1}}.$$

From initial condition the constant of integration is

$$A_1 = I_{nm} \sin(\psi_u - \varphi_l) - \frac{U_{nm}}{Z_{CL1}} \sin(\psi_u - \varphi_{CL1}).$$

Accordingly, the initial phase of voltage for the second stage of transient process increases by ωt_{cr1} , in particular the solution in a general form is as follows:

$$i_{cr2}(t) = \frac{U_{nm}}{Z_{CL2}} \sin[\omega(t + t_{cr1}) + \psi_u - \varphi_{CL2}] + A_2 e^{-\frac{R_{CL2} t}{L_{CL2}}},$$

where readout relative to time t begins from zero: $0 \leq t \leq t_{cr2}$, where t_{cr2} is the time of the second stage end.

From initial condition for the second stage at $t=0$ $i_{cr2} = k_{i1} I_{nm}$ ($k_{i1} = 2,5-3$) we determine

$$A_2 = k_{i1} I_{nm} - \frac{U_{nm}}{Z_{CL2}} \sin(\omega t_{cr1} + \psi_u - \varphi_{CL2}).$$

At the third stage its initial condition is $i_{cr3} = k_{i2} I_{nm}$ ($k_{i2} = 4-5$) at $t=0$ where readout of time t starts from zero: $0 \leq t \leq t_{cr3}$ (t_{cr3} is the third stage end). The initial phase of voltage increases by ωt_{cr2} , and the solution has a general form:

$$i_{cr3}(t) = \frac{U_{nm}}{Z_{CL3}} \sin[\omega(t + t_{cr1} + t_{cr2}) + \psi_u - \varphi_{CL3}] + A_2 e^{-\frac{R_{CL3} t}{L_{CL3}}}.$$

From initial condition for the third stage it is determined $A_3 = k_{i2} I_{nm} - \frac{U_{nm}}{Z_{CL3}} \sin[\omega(t_{cr1} + t_{cr2}) + \psi_u - \varphi_{CL3}]$.

Thus the transient process of the current at short-circuit can be described by system of equations

$$\begin{cases} i_{cr1}(t) = \frac{U_{nm}}{Z_{CL1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{CL1}) + \left[I_{nm} \sin(\psi_u - \varphi_l) - \frac{U_{nm}}{Z_{CL1}} \sin(\psi_u - \varphi_{CL1}) \right] e^{-\frac{R_{CL1} t}{L_{CL1}}}; \\ i_{cr2}(t) = \frac{U_{nm}}{Z_{CL2}} \sin[\omega(t + t_{cr1}) + \psi_u - \varphi_{CL2}] + \left[k_{i1} I_{nm} - \frac{U_{nm}}{Z_{CL2}} \sin(\omega t_{cr1} + \psi_u - \varphi_{CL2}) \right] e^{-\frac{R_{CL2} t}{L_{CL2}}}; \\ i_{cr3}(t) = \frac{U_{nm}}{Z_{CL3}} \sin[\omega(t + t_{cr1} + t_{cr2}) + \psi_u - \varphi_{CL3}] + \left[k_{i2} I_{nm} - \frac{U_{nm}}{Z_{CL3}} \sin[\omega(t_{cr1} + t_{cr2}) + \psi_u - \varphi_{CL3}] \right] e^{-\frac{R_{CL3} t}{L_{CL3}}}, \end{cases} \quad (15)$$

where SCCL parameters of transient process: second stage: first variant – $R_{CL2} = R_{CL1}$; $L_{CL2} = \frac{w B_{mc} \pi r_{rod}^2}{k_{i1} I_{nm}}$;

$$Z_{CL2} = \sqrt{R_{CL1}^2 + (\omega L_{CL2})^2}; \quad \varphi_{CL2} = \arctg \frac{\omega L_{CL2}}{R_{CL1}}; \text{ second}$$

$$\text{variant} \quad - \quad R_{CL2} = \rho_w \frac{w 2 \pi r_{rod}}{S_w}; \quad L_{CL2} = L_{CL1};$$

$$Z_{CL2} = \sqrt{R_{CL2}^2 + (\omega L_{CL1})^2}; \quad \varphi_{CL2} = \arctg \frac{\omega L_{CL1}}{R_{CL2}}; \quad \text{third}$$

$$\text{stage} \quad - \quad R_{CL3} = \rho_w \frac{w 2 \pi r_{rod}}{S_w}; \quad L_{CL3} = \frac{w B_{mc} \pi r_{rod}^2}{k_{i2} I_{nm}};$$

$$Z_{CL3} = \sqrt{R_{CL3}^2 + (\omega L_{CL3})^2}; \quad \varphi_{CL3} = \arctg \frac{\omega L_{CL3}}{R_{CL3}}.$$

Calculations of SCCL inductance can be spent by program FEMM in plane-parallel equivalent model. The magnetic flux is proportioned symmetrically on sections had along an axis "x" between HTSC screen and winding in a positive allowance δ_g and becomes isolated on a magnetic circuit (fig. 2), and also – on axis "y" sections lengthways organising leakage fluxes.

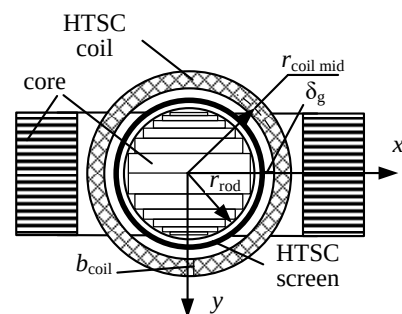


Fig. 2 – Cross-section of SCCL

On fig. 3 the geometry of build-up of the equivalent model SCCL in FEMM and allocation of magnetic field SCCL is resulted. The geometrical model recreates real magnetic core with such assumption that cross section of SCCL the right-angled, and magnetic flux allocation radially does not vary.

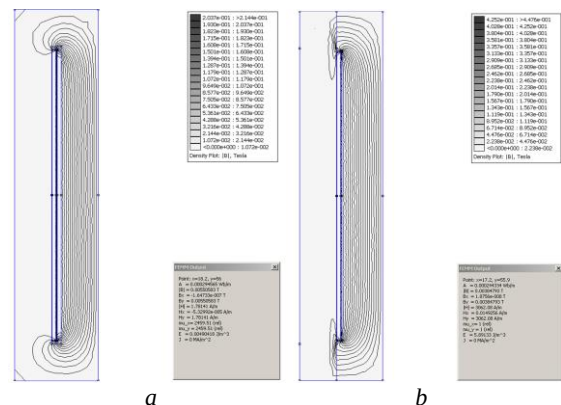


Fig. 3 – Rated distribution of magnetic field of SCCL at the nominal regime along axis "x" (a) along axis "y" (b)

Diamagnetic properties to the superconducting screen are set by boundary conditions of Dirichlet – a vector potential on a surface to screen $A = 0$. Defining in the nominal regime is the magnitude of voltage drop on a current limiter, a magnetic flux induction near screen band which will spot power losses in a winding, and electromagnetic pressure on the screen.

The mathematical model of electromagnetic transient which consists of three stages, in an emergency opera-

tion of the electric circuit with a superconducting current limiter is presented by system of equations (15) which consider a modification of parameters of the electric circuit depending on sequence of loss superconductivity of the shield and a winding. On fig. 4 analytical dependence of a current for the first variant of transient when at the second stage superconductivity of the shield is lost at a short-circuit initial phase is presented $\psi_u = 0$ and $\psi_u = \pi/2$.

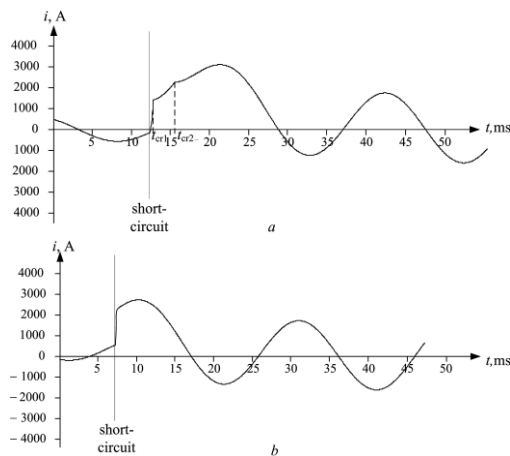


Fig. 4 – First variant of transient process at initial phase $\psi_u = 0$ (a) and $\psi_u = \pi/2$ (b)

Conclusions. The method of calculation basic parameters of the magnetic system of superconducting short-circuit current limiter is based on consideration of the coefficient voltage drop k_{CL} , allows selection of parameters in compliance grid and the critical parameters of superconductors.

Mathematical model of transient which consider the design features and capabilities of second-generation superconductors in electrical circuit during short-circuit and limiting current by inductive limiter constraint that considers crush circuit parameters depending on the sequence of losing the superconducting properties by screen and winding that is connected with their critical parameters is improved.

The duration of time transition t_{cr} to a greater extent depends on the moment of short-circuit, the slowest at $\psi_u = 0$. At the first and second stages of transient process, the duration of time t_{cr1} , t_{cr2} transition decreases depending on an initial phase of short-circuit at the shortest time $\psi_u = \pi/2$ which is less ms for second variant. The duration of the third stage of transient process depends on wire resistance R_{CL} of HTSC winding in normal state [7]. When the winding losses superconductivity, SCCL provides to the electric circuit the active resistance, which reduces current and time constant at the third stage of the

transient process after the loss of superconductivity of screen for easy operation of protection apparatus.

References (transliterated)

1. Noe M., Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Supercond. Science and Technology*. 2007. Vol. 20, No 3. P. 15–29.
2. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. *Vysokotemperaturnyy nadprovidnyy obmezhuвач strumu korotkogo замыкания z povnistyu kriohen-nym okholodzhenniyam* [High-temperature superconducting short-circuit current limiter with a fully cryogenic cooling]. Patent UA, no 107531, 2015.
3. Zhang Y., Lehnert F., Fukushima T., et al. Progress in Production and Performance of Second Generation (2G) HTS Wire for Practical Applications. *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*. 2014. Vol. 24, No 5. P. 7500405.
4. Goncharov E.V. Ekvivalentna magnitna proniknist nadprovidnikovoї obmotki. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2010. – No 1. P. 11–13.
5. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Calculating the parameters of an inductive short-circuit current limiter with a superconducting shield. *Russian Electrical Engineering*. 2013. Vol. 84, No 9. P. 478 – 481.
6. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Features of the superconducting current limiter at the sudden short-circuit. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2014. No 6. P. 30 – 33.
7. Janowski T., Kozak S., Kondratowicz-Kucewicz B., et al. Analysis of transformer type superconducting fault current limiters. *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*. 2007. Vol. 17, No 2. – P. 1788 – 1790.

Список літератури

1. Noe M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status / M. Noe, M. Steurer // *Supercond. Science and Technology*. – 2007. – Vol. 20, № 3. – P. 15–29.
2. Пат. 107531 Україна, МПК H02H 9/00. Високотемпературний надпровідний обмежувач струму короткого замикання з повністю криогенним охолодженням / Данько В.Г., Гончаров Є.В.; власник патенту НТУ "ХПІ". – № а 201312286; заявл. 21.10.13; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 4 с.: 1 іл.
3. Zhang Y. Progress in Production and Performance of Second Generation (2G) HTS Wire for Practical Applications / Y. Zhang, T.F. Lehnert, T. Fukushima, et al. // *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*. – 2014. – Vol. 24, № 5. – P. 7500405.
4. Гончаров Є.В. Еквівалентна магнітна проникність надпровідникової обмотки / Є.В. Гончаров // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 1. – С.11–13.
5. Dan'ko V.G. Calculating the parameters of an inductive short-circuit current limiter with a superconducting shield / V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – Vol. 84, № 9. – P. 478 – 481.
6. Данько В.Г. Особливості роботи надпровідного обмежувача струму при раптовому КЗ / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 6. – С. 30 – 33.
7. Janowski T. Analysis of transformer type superconducting fault current limiters / T. Janowski, S. Kozak, B. Kondratowicz-Kucewicz, et al. // *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1788 – 1790.

Надійшла (received) 18.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Синтез аспектів криогенного високотемпературного екранованого індуктивного обмежувача струму короткого замикання / В. Г. Данько, Є. В. Гончаров // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 3-7. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Синтез аспектов криогенного високотемпературного экранированного индуктивного ограничителя тока короткого замыкания / В. Г. Данько, Е. В. Гончаров // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 3-7. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter / V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 3-7. Bibliography: 7. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Данько Володимир Григорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри загальної електротехніки, м. Харків; тел.: (057) 707-64-27.

Данько Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", заведующий кафедрой общей электротехники, г. Харьков; тел.: (057) 707-64-27.

Dan'ko Vadymir Grigorovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", head of Department of general electrical engineering, Kharkiv; tel.: (057) 707-64-27.

Гончаров Євген Вікторович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", н.с. кафедри загальної електротехніки, м. Харків; тел.: (057) 707-64-27.

Гончаров Евгений Викторович – кандидат технических наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", н.с. кафедры общей электротехники, г. Харьков; тел.: (057) 707-64-27.

Goncharov Evgen Viktorovich – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Researcher of Department of general electrical engineering, Kharkiv; tel.: (057) 707-64-27.

УДК 330.341:621.3

В. В. АЛЕКСАНДРОВ**ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБОК ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ**

В статті приділена увага практичним аспектам оцінки економічної ефективності розробок електротехнічної продукції. Розглянуто існуючі проблеми практичного застосування існуючих теоретичних методик оцінки ефективності на етапі відбору до виробництва нової техніки. На основі практичного досвіду розрахунків економічної ефективності виробів запропоновано для попередньої оцінки ухвалення рішення про виробництво застосовувати розрахунки показників економічного ефекту у виробника, економічного ефекту у споживача та дисконтовані показники економічної ефективності.

Ключові слова: оцінка економічної ефективності, електротехнічна продукція, економічний ефект у виробника, економічний ефект у споживача, дисконтовані показники економічної ефективності, грошовий потік, інвестиції, норма прибутку, дисконтована рентабельність інвестицій, чиста дисконтована рентабельність.

В статье уделено внимание практическим аспектам оценки экономической эффективности разработок электротехнической продукции. Рассмотрены существующие проблемы практического применения существующих теоретических методик оценки эффективности на этапе отбора к производству новой техники. На основе практического опыта расчетов экономической эффективности изделий предложено для предварительной оценки принятия решения о производстве применять расчеты показателей экономического эффекта у производителя, экономического эффекта у потребителя и дисконтированные показатели экономической эффективности.

Ключевые слова: оценка экономической эффективности, электротехническая продукция, экономический эффект у производителя, экономический эффект у потребителя, дисконтированные показатели экономической эффективности, денежный поток, инвестиции, норма прибыли, дисконтированная рентабельность инвестиций, чистая дисконтированная стоимость.

The article deals with the practical assessment of the economic efficiency development of electrical products. Currently existing theoretical techniques are complicated in practical use. Proposed by scientists methods have been studied and describes their shortcomings. On the basis of practical significance were selected indicators of economic benefit from the manufacturer, the economic effect of the consumer and the present indicators of economic efficiency. Estimation of economic efficiency of product development can be carried out using traditional indicators: the present value of "cash flow"; net present value; payback period; the rate of return (profitability). The article details the method for calculating these indicators. These evaluation methods do not require too high craftsmanship. It is an integral part of their positive aspect. Most of the calculations of a preliminary assessment of prospects for the production can be made in terms of economic benefit the producer and the consumer. More detailed calculations in terms of discounted cash flows is performed, if necessary, to attract investment funds and justification of the business plan the release of new products. To date, the proposed methods can easily be utilized of the enterprise managements, because they do not require special training on the economic specialty.

Keywords: economic evaluation, electrical products, the economic effect of the manufacturer, the economic effect of the consumer, discounted indicators of economic efficiency, cash flow, investment rate of return, discounted return on investment, net present value.

Вступ. Подолання спаду економіки виробництва в Україні в значній мірі залежить від створення конкурентоздатних виробів, засобів праці та удосконалення організації їх експлуатації. Вирішення цієї проблеми залежить від обрання методів обґрунтування техніко-економічних рішень на виробництві. На даний час існує багато наукових праць, які пропонують шляхи начебто вирішення складної проблеми впровадження нових напрямків виробництва, або заміни існуючих на ринку виробів на більш досконалі. Вони містять у собі більшою частиною теоретичні методики оцінки соціально-економічної ефективності нововведень, управлінських і господарських рішень. Як відзначають автори [1-4], при їхній недосконалості матиме місце нерациональний розподіл коштів, що з урахуванням їх обмеженості може призвести до вибору неоптимальних варіантів, збільшення строків їхнього створення й освоєння, і відповідно, до зменшення величини прибутку від їхньої реалізації. Питання визначення ефективності розробок електротехнічної продукції розглядаються як в офіційних методиках [2], так й у працях окремих авторів. Важливість даної проблеми визначила значну кількість публікацій з даного питання.

Так, вагомий внесок у теорію з питань оцінювання ефективності розробок промислових товарів зробили закордонні та вітчизняні вчені А.І. Яковлев, Е. Крилов., В. Власова, А. Ідрісов, У. Мікков, А. Гойко, П. Завлін, А. Савчук, Є. Пеліхов та ін.

На жаль більшість запропонованих вченими ме-

тодик не мають можливості практичного втілення на виробництві. Багато з запропонованих критеріїв оцінки ефекту від впровадження нових розробок або не відповідають сучасній фінансово-господарській практиці діяльності підприємств, або мають в собі величини, які не має можливості визначити підприємство, або робить поставлену задачу дуже трудомісткою.

Мета. Метою даної статті є узагальнення теоретичних засад та можливості практичного застосування на виробничому підприємстві підходів з визначення доцільності випуску нових виробів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- узагальнити існуючі підходи до визначення ефективності або ефекту нових розробок;
- запропонувати показники для оцінки ефекту від виробничої діяльності підприємств, які б надали змогу без значних зусиль визначити перспективність випуску нового виробу.

Викладення основного матеріалу. Звичайно, для підприємств різних галузей і типів у різний час та за неоднакових умов показники ефективності будуть відрізнятися.

Обсяги реалізації і величина прибутку, рівень рентабельності залежать також від виробничої, постачальницької, збутової і торгівельної діяльності підприємства.

Рішення про економічну доцільність виробництва і використання нового виробу у вітчизняній практиці традиційно ухвалювалося на основі розрахунку

економічного ефекту. Існували обов'язкові для використання відповідні методики його визначення. Зараз немає вимог обов'язкового використання якої-небудь методики. В той же час, економічне обґрунтування серйозних розробок, як правило, виконується.

Оцінка значущості розробок, що закладаються в основу рішень, що приймаються в інноваційному бізнесі, є достатньо складною і на даний час ще невирішеною проблемою. І річ не в тому, що для її вирішення не приділялося достатньо уваги.

Навіпаки, є багато робіт, в яких описані критерії і методи для порівняльної оцінки значущості розробок. Так, проведено багато досліджень по систематизації і виділенню особливостей існуючих підходів до оцінки значущості розробок. Найбільш перспективні з цих досліджень дозволяють дійти висновку, що найбільший вплив на характеристику значущості розробки роблять п'ять критеріїв: новизна, наукова значущість, складність, масштабність і практична реалізація розробки. Для здійснення практичної оцінки значущості розробки можливо скласти матрицю, в якій кожному рішенню відповідає набір координат, що визначають його положення в просторі. В результаті кожна розробка, що піддається оцінці, може бути формалізована у вигляді набору цифр, відповідних числу чинників, які формують інтегральний критерій. Проте, відсутність економічних критеріїв робить неможливим застосування описаної методики в умовах ринкової економіки. У деяких роботах для оцінки значущості розробок пропонується використовувати інші шість критеріїв: ступінь фундаментальності розробки; багатоаспектність (по ланцюжку понять); територіальну широту застосування (країни світу); актуальність; економічність; застосовність в різних галузях техніки. Як бачимо, тут вже з'явилися деякі елементи маркетингових досліджень, але чіткої відповіді на питання: «Який ступінь прибутковості розробки?» – ми не отримуємо.

Зважаючи на сучасний розвиток економіки промисловості необхідно використовувати принципи багатокритерійної постановки завдань оптимізації виробничої програми. За головний критерій пропонується вибрати тріаду критеріїв: ефективність, вартість, час. Це створює передумови для переоцінки тих розробок, для яких на момент проведення досліджень можна розрахувати економічний ефект від їх використання і кількісно оцінити соціальний ефект, і недооцінки тих розробок, для яких на дату проведення досліджень відсутні початкові кількісні показники, необхідні для розрахунку економічного ефекту і ступеня значущості соціального ефекту. Процес визначення найбільш ефективної розробки з ряду відомих з метою залучення венчурного капіталу для його подальшого промислового використання, може бути ототожнений з вибором однієї з декількох альтернатив.

Для практичного застосування пропонується три підходи, які дадуть змогу оцінити ефективність можливого впровадження у виробництво альтернативних варіантів, це:

- економічний ефект у виробника;
- економічний ефект у споживача;
- оцінка економічної ефективності розробки виробу.

Нижче викладається методика розрахунку цих

показників.

1 Економічний ефект у виробника

Економічний ефект у виробника може бути визначений як:

$$E_{\text{в}} = B_t - C_t - \Pi_t \quad (1)$$

де B_t – виручка від реалізації продукції в рік, грн.;
 C_t – собівартість річного випуску виробів в рік, грн.;

Π_t – загальна сума податків і виплат з балансового прибутку в рік t , грн.

Величина B_t може бути визначена як:

$$B_t = \Pi_{\text{прі}} \cdot A_t \quad (2)$$

де $\Pi_{\text{прі}}$ – ціна продажу i -го виробу, грн.;

A_t – об'єм продажів, шт.

Величину Π_t можна визначити як:

$$\Pi_t = \Pi_{\text{ДВ}} + \Pi_n \quad (3)$$

де $\Pi_{\text{ДВ}}$ – податок на додану вартість, грн.

Π_n – податок на прибуток (станом на 2016 рік – 18% від величини прибутку на виріб), грн.

Різниця між економічними ефектами у виробника може бути визначена як:

$$\Delta E_{\text{в}} = E_{\text{вб}} - E_{\text{вн}} \quad (4)$$

де $E_{\text{вб}}$, $E_{\text{вн}}$ – економічний ефект у виробника для випуску базового та нового виробу відповідно, грн.

2 Економічний ефект у споживача

Економічний ефект може бути розрахований за ціною споживання як:

$$E_{\text{сн}} = \Pi_{\text{снб}} \cdot a - \Pi_{\text{снн}} \quad (5)$$

де $\Pi_{\text{снб}}$, $\Pi_{\text{снн}}$ – ціна споживання базового і нового виробу, грн.

Коефіцієнт еквівалентності a містить дві складові, які враховують зміни в обсягах виробництва та терміні служби:

$$a = a_1 \cdot a_2,$$

де a_1 – коефіцієнт обліку зростання одиниці нового виробу (B_2) в порівнянні з одиницею базового виробу (B_1);

a_2 – коефіцієнт обліку зміни терміну служби нового виробу (T_1) в порівнянні з терміном служби базового виробу (T_2).

Визначити ці коефіцієнти можна наступним чином:

$$a_1 = \frac{B_2}{B_1}; \quad a_2 = \frac{\frac{1}{T_1} + R_i}{\frac{1}{T_2} + R_i}$$

де R_i – ставка банківського відсотку по кредиту.

Ціна споживання в загальному вигляді визначається як:

$$\Pi_{\text{сн}} = \Pi_{\text{пр}} + I \quad (6)$$

де I – експлуатаційні витрати за термін служби, грн.

Склад і методи розрахунку експлуатаційних витрат залежать від виду виробу. Так для електротехнічних виробів експлуатаційні витрати, як правило, включають такі основні елементи:

$$I = B_e + B_n + B_{\text{н}} + A + 3B \quad (7)$$

де B_e – витрати на покриття втрат електроенергії, грн.;

B_n , $B_{\text{н}}$ – витрати на планові і непланові ремонти, грн.;

A – амортизаційні відрахування по виробу, грн.;

ЗБ – збиток через відмови виробу, грн.

Витрати на покриття втрат електроенергії визначаються так:

$$B_e = P \cdot \Phi_0 \cdot K_{зп} \cdot K_{зч} \cdot B_{кВт\cdot г} \quad (8)$$

де P – споживана потужність електротехнічного виробу, кВт;

Φ_0 – дійсний фонд часу роботи виробу (в машинобудуванні при двозмінному режимі роботи $\Phi_d = 4015$ годин);

$K_{зп}$, $K_{зч}$ – коефіцієнти завантаження по потужності і за часом;

$B_{кВт\cdot г}$ – вартість однієї кіловат-години електроенергії, грн/кВт·г.

Для електродвигунів, тиристорних перетворювачів і деяких інших електроустановок можливе застосування показника втрат електроенергії ΔP замість споживаної потужності електротехнічного виробу. Величина ΔP розраховується так:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{P_2}{\eta} - P_2,$$

де P_1 , P_2 – первинна і вторинна потужність, кВт;

η – коефіцієнт корисної дії електродвигуна.

Витрати на планові ремонти, як правило, включають:

$$B_n = B_o + B_n + B_c + B_k \quad (9)$$

де B_o – витрати на технічні огляди, грн.;

B_n – витрати на поточні ремонти, грн.;

B_c – витрати на середні ремонти, грн.;

B_k – витрати на капітальні ремонти, грн.

Конкретні методики їх розрахунку залежать від системи технічного обслуговування і ремонту, що використовується в галузі споживача. Витрати на капітальний ремонт виробу в машинобудуванні можуть бути розраховані, наприклад, так:

$$B_k = K_{кр} \cdot C_{рек} \cdot R \quad (10)$$

де $K_{кр}$ – коефіцієнт враховує річну частину витрат на капітальний ремонт;

$C_{рек}$ – собівартість капітального ремонту однієї ремонтної одиниці, грн.;

R – коефіцієнт ремонтної складності виробу.

Витрати на непланові ремонти укрупнено можуть бути розраховані так:

$$B_n = C_n \cdot P_n, \quad (11)$$

де C_n – середня вартість одного непланового ремонту (на практиці визначається спеціальними дослідженнями в експлуатації), грн.;

P_n – середнє число непланових ремонтів за рік (визначається надійністю виробу).

При експоненціальному законі розподілу відмов величина P_n може бути знайдена як:

$$P_n = \frac{\Phi_d}{T}, \quad (12)$$

де T – напрацювання виробу на відмову, год.

Амортизаційні відрахування при цьому визначаються по самому виробу як:

$$A = \frac{(C_{np} + K') \cdot H_a}{100}, \quad (13)$$

де C_{np} – ціна проектного виробу;

K' – супутні капітальні вкладення (за відсутності конкретних даних в якості K' можуть бути взяті витрати на транспортування, монтаж і наладку виробу у розмірі 0,05 – 0,1 вартості виробу);

H_a – норма амортизації на виріб (визначається з терміну служби виробу).

Збиток через відмови визначається надійністю і особливостями роботи виробу.

3 Оцінка економічної ефективності розробки виробу

Оцінка економічної ефективності розробки виробу може бути виконана за допомогою широко вживаних в країнах із сталою ринковою економікою традиційних показників:

1) дискontована сумарна величина «кеш-флоу»;

2) чиста дискontована вартість;

3) строк окупності;

4) норма прибутку (рентабельність).

Розрахунок річного грошового потоку $ГП_t$ («кеш-флоу») проводиться для кожного року розрахункового періоду згідно з формулою:

$$ГП_t = Пр_{чист} \cdot A_t + Ам_{річн} \quad (14)$$

де $Пр_{чист}$ – розмір чистого прибутку на одиницю виробу у t -му році, грн.;

A_t – кількість виробів у t -му році, шт.;

$Ам_{річн}$ – річна величина амортизаційних відрахувань, грн.

Для врахування фактору часу необхідно застосовувати в розрахунках коефіцієнт дискontування.

Розрахунок коефіцієнтів дискontування $K_{дискт}$ проводимо згідно з формулою:

$$K_{дискт} = \frac{1}{(1 + Ri)^t} \quad (15)$$

де Ri – дисконтна ставка (розмір ставки банківського кредиту).

Розрахунок дискontування грошового потоку за роками виконується для всього розрахункового періоду згідно з формулою:

$$ДГП_t = ГП_t \cdot K_{дискт} \quad (16)$$

Розрахунок кумулятивного грошового потоку наростаючим підсумком проводимо згідно з формулою:

$$КГП_t = \sum ДГП_t \quad (17)$$

Розрахунок чистого грошового потоку наростаючим підсумком проводимо згідно з формулою:

$$ЧГП_t = КГП_t - \sum I_t \quad (18)$$

де I_t – величина інвестицій за весь період, грн.

Найбільш часто в умовах ринкової економіки застосовується показник чистої дискontованої (поточної) вартості NPV. Цей показник є аналогічним за економічним змістом з показником чистого грошового потоку.

Чиста дискontована вартість (NPV) – це різниця між поточною, дискontованою на базі розрахункової ставки відсотка, вартістю надходжень від інвестицій і величиною капітальних вкладень:

$$NPV = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{CF_i}{(1 + Ri)^t} - \sum_{t=1}^{t=m} \frac{Ki}{(1 + Ri)^t} \quad (19)$$

де CF_i – «кеш-флоу», грн.;

Ki – величина капітальних вкладень в i -му році, грн.

Внутрішня норма окупності відповідає такій ставці відсотка, при якій досягається нульова чиста дискontована вартість. Визначається величина, при якій досягається нульове значення NPV. Термін окупності застосовується в недискontованому і дискontованому

вигляді.

Дисконтований термін окупності визначається по формулі:

$$\sum_{i=1}^{i=T} \frac{Pi + Ai}{(1 + Ri)^t} = \sum_{i=1}^{i=T} \frac{Ki}{(1 + Ri)^t} \quad (20)$$

де $Pi + Ai$ – «кеш-флоу» в i -тому році, грн.;

Ki – інвестиції в i -тому році, грн.;

T – термін окупності інвестиційного проекту, років;

Ri – дисконтна ставка;

t – кількість років, яка відділяє момент оцінки від моменту початку випуску нового виробу;

T – період часу, в який дисконтовані надходження порівнюються з дисконтованими інвестиціями (термін окупності).

Приблизний термін повернення капіталу можна розрахувати згідно з формулою :

$$T_n = \frac{\Sigma I_t}{ДГП_{сер.річн}} \quad (21)$$

де $ДГП_{сер.річн}$ – середньорічний дисконтований грошовий потік за весь розрахунковий період, що розраховуємо згідно з формулою:

$$ДГП_{сер.річн} = \frac{\Sigma ДГП_t}{T_{розр}} \quad (22)$$

де $T_{розр}$ – розрахунковий період існування проекту.

Норма прибутку також широко застосовується для оцінки ефективності проектів.

Дисконтована рентабельність інвестицій ($R_{ИНВ}$), ще її називають індекс прибутковості ($ІП$), розраховуємо згідно з формулою :

$$R_{ИНВ} = ІП = \frac{КГП_t}{\Sigma I_t} \quad (23)$$

Застосовують декілька варіантів розрахунку норми прибутку (H_n):

$$H_n = \frac{P_6}{K}, H_n = \frac{P_ч}{K}, H_n = \frac{ГП}{K}, \quad (24)$$

де P_6 , $P_ч$, $ГП$ – валовий прибуток, чистий прибуток і «кеш-флоу» відповідно.

Висновки за результатами дослідження. За-

пропоновані методики оцінки попередньої перспективності виробництва нової продукції можуть широко застосовуватися на виробництві. Дані способи оцінки не потребують надто високої кваліфікації виконавців, що є їх невід'ємним позитивним моментом. Більшість розрахунків на виробництві для попередньої оцінки привабливості можуть бути виконані за показниками економічного ефекту у виробника та у споживача. Більш детальні розрахунки за показниками дисконтованих грошових потоків проводять у необхідності залучення інвестиційних коштів та обґрунтування бізнес-плану випуску нової продукції. На сьогоднішній день запропоновані методики достатньо легко можуть бути освоєні на виробництві керівним складом підприємства, бо вони не потребують спеціальної підготовки з економічного фаху.

Список літератури

1. Яковлев А.І. Методика визначення ефективності інвестицій, інновацій, господарських рішень в сучасних умовах [Текст] / А.І. Яковлев. – Х.: Бізнес-інформ, 2001. – 56 с.
2. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво [Текст] – К.: Мінекономіки, 2006. – 18с.
3. Яковлев А.І. Методи оцінки збитку на підприємствах при виході з ладу електротехнічного обладнання : монографія [Текст] / А.І. Яковлев, О.В. Мозенков, В.М. Кобелев. – Харків : ВВП "Контраст", 2012. – 120 с.
4. Старик Д.Э. Экономическая эффективность машин: Критерии и методы оценки.[Текст] / Д.Э. Старик. – М.: Машиностроение, 1991.

References (transliterated)

1. Yakovlyev A.I. Metodyka vyznachennya efektyvnosti investytsiy, innovatsiy, hospodars'kykh rishen' v suchasnykh umovakh [Tekst] A.I. Yakovlyev. Kharkov: Biznes-inform, 2001. 56 p.
2. Metodyka vyznachennya ekonomichnoyi efektyvnosti vytrat na naukovy doslidzhennya i rozrobky ta yikh vprovadzhennya u vyrobnytstvo [Tekst] Ksev: Minekonomiky, 2006. 18 p.
3. Yakovlyev A.I. Metody otsinky zbytku na pidpryemstvakh pry vykhodi z ladu elektrotekhnichnoho obladnannya : monohrafiya [Tekst] A.I. Yakovlyev, O.V. Mozenkov, V.M. Kobelyev. Kharkiv : VVP "Kontrast", 2012. 120 p.
4. Starik D.Je. Jekonomicheskaja jeffektivnost' mashin: Kriterii i metody ocenki.[Tekst] D.Je. Starik. Moscow: Mashinostroenie, 1991.

Надійшла (received) 21.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Практичні аспекти визначення ефективності розробок електротехнічної продукції / В. В. Александров // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 8-11. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

Практические аспекты определения эффективности разработок электротехнической продукции / В. В. Александров // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 8-11. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

Practical aspects of determining the efficiency of electrical products development / V. V. Aleksandrov // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 8-11. Bibliography: 4. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Александров Віталій Володимирович – асистент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, тел.: (099) 186-90-01, e-mail: alexsandrov.v@mail.ru

Александров Віталій Володимирович – ассистент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, тел.: (099) 186-90-01, e-mail: alexsandrov.v@mail.ru

Aleksandrov Vitaliy Volodymyrovych – assistant, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel. : (099) 186-90-01, e-mail: alexsandrov.v@mail.ru.

УДК 65.011.8:621.3

В. О. АЛЕКСАНДРОВА**ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І АПАРАТІВ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ АУТСОРСИНГА БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ**

В статті розглядається актуальна проблема підприємств електротехнічної промисловості по зниженню витрат виробництва. В час економічної скрути підприємствам доцільно використовувати для зниження своїх виробничих витрат найменш витратні методи. Так в статті пропонується застосовувати для таких цілей організаційні методи, а саме передачу деяких бізнес-процесів підприємства на аутсорсинг. Досліджено загальні відомості про аутсорсинг на підприємстві та запропоновано модель відбору бізнес-процесів підприємства для передачі їх на аутсорсинг.

Ключові слова: витрати, електротехнічна промисловість, методи зниження витрат, аутсорсинг, бізнес-процеси, наскрізні бізнес-процеси, прибуток, критерії відбору бізнес-процесу, ефективність бізнес-процесу.

В статье рассматривается актуальная проблема предприятий электротехнической промышленности по снижению издержек производства. Во время экономических трудностей предприятиям целесообразно использовать для снижения своих производственных затрат наименее затратные методы. Так в статье предлагается применять для таких целей организационные методы, а именно передачу некоторых бизнес-процессов предприятия на аутсорсинг. Исследованы общие сведения об аутсорсинге на предприятии и предложена модель отбора бизнес-процессов предприятия для передачи их на аутсорсинг.

Ключевые слова: затраты, электротехническая промышленность, методы снижения затрат, аутсорсинг, бизнес-процессы, сквозные бизнес-процессы, прибыль, критерии отбора бизнес-процесса, эффективность бизнес-процесса.

In the article the actual problem of electrical industry enterprises to reduce production costs. Development of measures to reduce production costs for enterprises is an urgent problem for many businesses the electrical industry. Methodological and organizational bases of lower production costs of enterprises in the regulation of market economy has not sufficiently investigated. In times of economic hardship enterprises should be used to reduce their production costs Lowest cost method. Recently, one of the most promising areas of lower production costs in enterprises electrical equipment and instrumentation and have the opportunity to transfer to outsourcing expensive. When using outsourcing to domestic enterprises plan to achieve the following objectives: improve economic efficiency and reduce costs of economic activity; reducing the need for investment in the development of non-core activities; the creation of conditions to meet seasonal needs in additional staff; improving the quality of work performed and services transferred to outsourcing. Costs of business processes in detail might consider if automated systems that cover almost the entire life cycle of products and first used a process approach to management. Since the article proposed to use for purposes such organizational methods, namely the transfer of certain business processes outsourcing. To analyze the impact of changes in costs to the amount of profit a business process is proposed to use a model that presents linear dependence of profit on the cost of the implementation of business processes. Researched overview of outsourcing in the company and the model selection business processes to transfer them to outsource.

Keywords: costs, electrical industry, methods of cost reduction, outsourcing, business processes, through business processes, revenue, selection criteria of the business process, business process efficiency.

Вступ. В умовах дії ринкових відносин, коли падає ділова активність підприємств і відбувається загальний спад виробництва, для більшості підприємств процедура зниження витрат є питанням виживання.

Успішна діяльність підприємств багато в чому залежить від ефективності їх господарювання, і, в першу чергу, від розмірів виробничих витрат. Витрати виробництва є одним з найбільш узагальнювальних показників ефективності роботи підприємства. Від того, наскільки точно визначені витрати виробництва і реалізації продукції залежить величина прибутку підприємства.

Витрати виробництва найбільш чуйні до будь-яких змін у виробничій діяльності. Ефективність використання сировини, матеріалів, палива, енергії, робочої сили відбивається на величині витрат виробництва і вже пізніше, через них, на величині інших показників, що характеризують результати виробничо-господарської діяльності і рівень конкурентоспроможності підприємства.

В зв'язку з цим необхідність розробки методичних і організаційних основ зниження витрат виробництва на підприємствах стає назрілим актуальним завданням. Завдання це багатопланове і складне. Його рішення багато в чому залежить від вдосконалення теоретичної бази обліку і зниження виробничих витрат; від впровадження ресурсозберігаючих і високопродуктивних технологій; від формування маркетингової політики підприємства; від інформатизації і автоматизації системи обліку і управління витратами виробництва на підприємствах.

По питаннях місця і ролі витрат виробництва в ефективному функціонуванні підприємств, їх впливи

на конкурентоспроможність підприємств, по методах розрахунку витрат і виборі шляхів їх зниження є ряд робіт таких економістів як В.Я. Горфинкель, Л. Вальрах, А. Маршалл, Д. Рікардо, В.Г. Воронін, В.П. Грузинів, В.В. Денискін, Е.М. Купряков, В.П. Прасолова, Г.М. Лич і ін. [1, 2].

Проте проблема методичних і організаційних основ зниження витрат виробництва підприємств в умовах регулювання ринкової економіки ще не достатньо досліджена. З'явилася необхідність в проведенні усестороннього аналізу існуючих методичних підходів до розрахунку витрат виробництва, в розробці ефективної організаційно-методичної бази шляхів їх зниження і в дослідженні впливу витрат виробництва на конкурентоспроможність підприємств. Назріла потреба в розробці першочергових організаційних заходів, направлених на зниження витрат виробництва.

Останнім часом одним з найбільш перспективних напрямів зниження витрат виробництва на підприємствах апарато- і приладобудування є можливість передачі на аутсорсинг дорогих процесів. Тобто підприємство повинне оцінити які компоненти вигідно виробляти самостійно, а які вигідніше купувати у інших виробників або це стосується знаходження альтернатив в управлінській і фінансово-господарській діяльності.

При ухваленні управлінського рішення по використанню аутсорсинга і виборі постачальника подібних послуг визначальним чинником є ступінь доцільності того або іншого варіанту. Саме визначення доцільності повинне грати головну роль в ухваленні управлінських рішень.

При розробці методики до оцінки доцільності

використання аутсорсинга підприємством автором були проаналізовані результати, отримані за підсумками робіт Б. А. Анікіна, І. Л. Рудої, Ж.-Л. Бравар, Р. Моргана, В.Г. Елиферова, В.В. Репіна, В.С. Пономаренко, С.В. Мінухіна, С.В. Знахура, С. Клементс, Дж. Харрінгтона, Дж. Б. Хейвуда та інших присвячених відповідній предметній області [3-10].

Мета. Розробка заходів щодо зниження витрат виробництва на підприємствах є актуальною проблемою для багатьох підприємств електротехнічної промисловості. Це пов'язано з тим, що основним фінансовим результатом діяльності будь-якого підприємства є прибуток, підвищити який можна, збільшуючи об'єми виробництва, ціни на продукцію, що виробляється, або зниженням витрат. Оскільки для збільшення об'ємів виробництва необхідні додаткові джерела фінансування, а при підвищенні ціни знижується попит на продукцію і відбувається захоплення наявної частки ринку конкурентами, тому на підприємстві підвищення фінансового результату доцільно досягати шляхом зниження витрат. Як було зазначено вище найменш витратними заходами зниження витрат є організаційні, серед яких набуло популярності передача частини повноважень у виробництві іншій керуючій організації. Такий процес називається аутсорсингом. Основною проблемою, на вирішення якої направлено дослідження, є відсутність чітких показників відбору бізнес-процесів (БП) для можливості подальшого їх аутсорсинга в умовах наявності тільки даних бухгалтерського обліку, що характерно для більшості електротехнічних підприємств України. Дана проблема вимагає вирішення наступних завдань:

- вибір ключових бізнес-процесів для передачі їх на аутсорсинг;
- вибір моделі аутсорсинга;
- вибір аутсорсингової організації.

Метою даної статті є вирішення тільки першого завдання – формалізації ухвалення рішення та вибору ключових бізнес-процесів для передачі їх на аутсорсинг.

Викладення основного матеріалу. У сучасній економіці інструменти аутсорсинга є актуальними і достатньо широко використовуються для зниження витрат виробництва та оптимізації бізнес-процесів. Під аутсорсингом бізнес-процесів розумітимемо передачу підприємством якого-небудь процесу (функції, роботи) або його частини сторонній організації, що надає професійні послуги в цій області. Таким чином, аутсорсинг БП дозволяє підприємству (замовникові) понизити витрати за рахунок використання ефекту спеціалізації аутсорсингових організацій (постачальників) на певних видах діяльності, які вони здійснюють з меншими витратами і якісніше, ніж сам замовник [4]. Як правило, підприємства набувають у аутсорсингових організацій наступного вигляду послуг: підтримка інформаційної системи або її компонентів, ведення бухгалтерського обліку, проектування і дизайн нового вигляду продуктів, супровід і підтримка продуктів, рекрутинг, маркетинг і тому подібне.

В цілях підвищення ефективності роботи будь-якого підприємства, успішного розвитку конкурентного бізнесу і його адаптації до змінних ринкових умов необхідна перебудова не тільки методів і форм господарювання, але і ухвалення нових концептуальних рішень, принципів ведення бізнесу і його струк-

турної організації. Комплексним вирішенням цих проблем, на думку зарубіжних і вітчизняних фахівців в області менеджменту, служить аутсорсинг як стратегічне рішення, направлене на реструктуризацію компанії з передачею окремих функцій або цілих бізнес-процесів зовнішнім виконавцям.

На даний час аутсорсинг застосовується на багатьох закордонних підприємствах. При використанні аутсорсинга на вітчизняних підприємствах планується досягнення наступних цілей:

- підвищення економічної ефективності і зниження витрат господарської діяльності;
- зниження потреби в інвестиціях на розвиток не-профільних видів діяльності;
- створення умов для задоволення сезонної потреби в додатковому персоналі;
- підвищення якості виконуваних робіт, послуг, переданих на аутсорсинг.

Проте основною причиною впровадження аутсорсинга є прагнення понизити витрати при одночасному поліпшенні якості продукції та послуг, що надаються.

При всіх своїх позитивних моментах аутсорсинг може проявляти себе і з негативного боку. Це відбувається внаслідок того, що при передачі стороннім постачальникам точно не визначено, що потрібно передавати, а що залишати «усередині» підприємства, тому необхідно точно описати процес, а також використовувати ресурси, і оцінити ефективність аутсорсинга.

Крім того, в багатьох засобах масової інформації найчастіше описується досвід компаній, що успішно здійснили проекти по аутсорсингу, і, навпаки, мало освітлюють невдалі спроби. Це пов'язано з тим, що багато компаній не хочуть поширювати інформацію про невдалі спроби реалізації (виводу) яких-небудь функцій на аутсорсинг, щоб не підірвати свою ділову репутацію. За даними Deloitte Consulting, з 25 великих організацій із загальним об'ємом аутсорсингових контрактів в 50 млрд. дол. 70 % мали негативний досвід роботи з аутсорсинговими компаніями, 44 % не отримали очікуваного зменшення витрат, а одна з чотирьох компаній взагалі повернула передані функції. Близько 80 % опитаних вказали, що найпоширенішою проблемою є приховані витрати унаслідок відсутності доступу до структури цін і витрат фірми-виконавця, 62 % – збільшення управлінського штату і 57 % – відсутність можливості вивільнення внутрішніх ресурсів для інших проектів. Ці факти свідчать, що спрощення процесу управління компанією і економія засобів за допомогою аутсорсинга є міфом.

Вивчаючи досвід вітчизняних підприємств, що застосовують аутсорсинг, виявлені наступні проблеми:

- погіршення психологічного клімату в колективі підприємства-замовника (оскільки дана форма трудових відносин багатьом працівникам незрозуміла і невідома);
- погіршення корпоративної культури на підприємстві-замовнику унаслідок приходу позикових працівників з аутсорсингових підприємств;
- відсутність угод про розділення відповідальності між підприємством-замовником і аутсорсинговим підприємством в питаннях забезпечення охорони праці і техніки безпеки;
- відсутність професійної підготовки і перепідготовки кадрів на аутсорсингових підприємствах;
- втрата керованості виробничими процесами;

- втрата конфіденційної інформації; відсутність своєчасного запобігання зниженню якості продукції, що випускається;
- спричинення збитку від невірних дій найманих працівників;
- негативне відношення з боку контролюючих органів унаслідок відсутності чіткої нормативної бази, що регламентує аутсорсингову діяльність;
- поліпшення економічних показників за рахунок застосування аутсорсинга, а не завдяки впровадженню нових технологій, техніки, організації праці і т. д.;
- відсутність профспілкових організацій в аутсорсингових компаніях;
- економічна і професійна деградація, а також соціальна незахищеність працівників аутсорсингових підприємств.

Є ще один складний аспект застосування аутсорсинга – це складність розробки методики оцінки його ефективності. Вимірювання можна отримати за допомогою різних досліджень: фінансового, управлінського, соціально-економічного, економіко-статистичного, маркетингового, інвестиційного, економіко-екологічного, функціонально-вартісного, логістичного і інших видів аналізу. Проте дані дослідження характеризують роботу підприємства у минулому і не дають уявлення про те, як поліпшити роботу в майбутньому. В даний час, теоретичні і методичні положення аутсорсинга як інструменту оптимізації бизнес-процесів організацій, досить добре відображені в роботах [4, 6, 8, 10]. Також аналіз існуючих літературних джерел дозволив виділити основні моделі аутсорсинга, які можуть бути використані для оптимізації бизнес-процесів підприємств [3, 4]:

1. Традиційний аутсорсинг. Підприємство передає свої допоміжні бизнес-процеси сторонній організації, для того, щоб понизити витрати і зосередити зусилля на реалізації своїх основних бизнес-процесів.

2. Сумісний аутсорсинг. Підприємство стає партнером аутсорсингової організації для вдосконалення своїх бизнес-процесів для зниження витрат і підвищення гнучкості системи управління.

3. Аутсорсинг з елементами реорганізації мережі бизнес-процесів. Підприємство об'єднує зусилля зі своїми партнерами і перетворює структуру управління для підвищення ефективності і поліпшення показників діяльності підприємства.

4. Аутстафінг. Даний вид аутсорсинга припускає, що підприємство платить не стільки за виконаний сервіс, скільки за час роботи зовнішнього фахівця. Використання аутстафінга дозволяє підприємству згладити ефект пікових навантажень на ключових бизнес-процесах і скоротити капітальні витрати на утримання інфраструктури.

Визначення ключових бизнес-процесів полягає у виявленні таких бизнес-процесів підприємства або інтегрованих структур, які привносять максимальну або мінімальну цінність в загальну вартість продукту. В загальному вигляді ключовими бизнес-процесами є бизнес-процеси, зміни яких істотним чином впливають на кінцевий результат діяльності підприємства або інтегрованих структур в рамках наскрізного бизнес-процеса (НБП). Розумітимемо під наскрізним бизнес-процесом сукупність взаємозв'язаних основних, забезпечуючих і управлінських бизнес-процесів, спрямованих на повний цикл перетворення вхідних ресурсів в продукт або послугу (результат БП), які задовольняють потреби клієнтів [7,8]. Як ключові індикатори, які характеризують вхід бизнес-процесів визначені матеріальні витрати (сировина, комплектуючі матеріали, електрична енергія і т. д.), трудові (час і вартість трудових ресурсів), а також використання амортизаційних відрахувань.

Кожен бизнес-процес можна розглядати як окремий продукт (послугу), який має цінність і споживчі властивості. Відповідно, кожен бизнес-процес може характеризуватися витратами (собівартістю) і прибутком. Витрати на здійснення бизнес-процесів можливо детально врахувати за наявності автоматизованих систем, які охоплюють практично весь життєвий цикл продуктів і спочатку використовують процесний підхід в управлінні підприємствами. Складність викликає розрахунок величини прибутку для кожного бизнес-процесу в умовах, коли на підприємстві спочатку не розглядалася система господарських відносин на базі взаємозв'язаних господарських підрозділів або бизнес-структур. Розрахунок вартості бизнес-процесу є актуальним при ухваленні рішення про ефективність бизнес-процесу і необхідності його аутсорсинга. Для аналізу впливу змін витрат на величину прибутку бизнес-процесу пропонується використовувати модель, яка представлена на рис. 1.

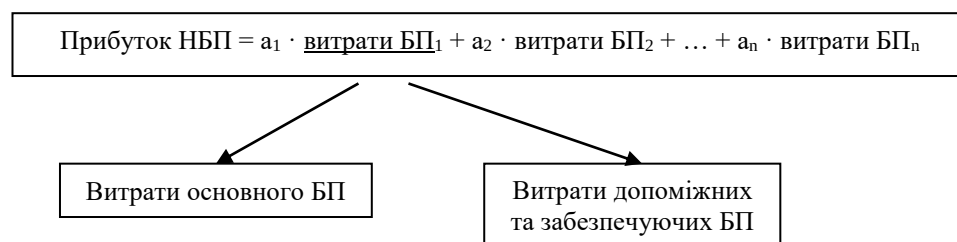


Рис. 1 – Модель для аналізу залежності прибутку від зміни витрат на здійснення бизнес-процесів [11]

Модель представляє лінійну залежність величини прибутку від витрат на здійснення бизнес-процесів. Для детального дослідження можливо окремо враховувати витрати як тільки основних бизнес-процесів, так і сукупні витрати (основні + допоміжні + забезпечуючі).

Коефіцієнт a_i може бути розрахований на основі вирішення задачі регресійного аналізу. В даному випадку, коефіцієнт a_i має наступну економічну інтерпретацію – це частка прибутку, що доводиться на від-

повідний бизнес-процес (етап бизнес-процеса).

Відповідно, на основі a_i можливо розрахувати величину прибутку для кожного бизнес-процесу і його ефективність по формулі:

$$Ебп_i = (a_i \cdot \text{витрати_БП}_i) / \text{витрати_БП}_i$$

Рівень і напрям (знак) ефективності бизнес-процесу дозволяє приймати рішення про необхідність його аутсорсинга. Детальніше методика визначення бизнес-процесу підлягаючого аутсорсингу описана в статті [11].

Висновки за результатами дослідження. Для підприємств апарато- і приладобудування типовими ключовими бізнес-процесами належними аутсорсингу є маркетинг, проектування, моніторинг якості виробництва. Отже, зміна (збільшення) витрат для даних бізнес-процесів позитивно відбивається на збільшенні величини прибутку для наскрізного бізнес-процесу. Бізнес-процеси підготовки виробництва, логістики і реалізації мають низькі значення параметрів моделі, що свідчить про незначний вплив зміни витрат на збільшення величини прибутку.

Слід зазначити, що використані результати дослідження показують типову ситуацію для електротехнічних підприємств України, оскільки величина прибутку, як правило, розраховується на основі планової калькуляції і береться як нормативна величина від собівартості продукції. Отже, зменшення витрат приводить до збільшення прибутку для підприємства в тому випадку, якщо були заключені договори на виробництво продукції за узгодженою ціною, розрахованій на основі планової калькуляції.

Результати моделювання показують можливість передачі на аутсорсинг тих бізнес-процесів, параметри регресії при яких мінімальні або мають негативні значення. Відповідно, передавати на аутсорсинг бізнес-процеси, які збільшують додану вартість продукту (тобто ті, які мають позитивні і значущі параметри регресії) не є раціональним.

Список літератури

1. Горфинкель Е.М. Экономика предприятия: учебник для ВУЗов / В.Я. Горфинкель, Е.М. Купряков, В.П. Прасолова и др.; под ред. проф. В.Я. Горфинкеля, проф. Е.М. Купрякова. – М.: ЮНИТИ, 1999. – 365 с.
2. Лыч Г.М. Минимизация издержек // Финансы, учет, аудит. – 2007. – №7-8. – С. 51-55.
3. Аникин Б.А., Рудая И.Л. Аутсорсинг и аутстаффинг: высокие технологии менеджмента: Учебное пособие. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 320 с.
4. Бравар Ж.-Л., Морган Р. Эффективный аутсорсинг. Понимание, планирование и использование успешных аутсорсинговых отношений. – М.: Баланс Бизнес Букс, 2007. – 475 с.
5. Елиферов В.Г., Репин В.В. Бизнес-процессы: регламентация и управление: учеб. пособие / В.Г. Елиферов, В.В. Репин; Институт экономики и финансов «Синергия». – М.: Инфра-М, 2006. – 318 с.
6. Клементс С. и др. Аутсорсинг бизнес-процессов. Советы финансового директора / Под общ. ред. В. В. Голда. – М.: Вершина, 2006. – 416 с.
7. Пономаренко В.С., Мінухін С.В., Знахур С.В. Теорія та практика моделювання бізнес-процесів : монографія. – Харків: вид. ХНЕУ, 2013. – 244 с.
8. Репин В.В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В.В. Репин, В.Г. Елиферов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
9. Харрингтон Дж. Оптимизация бизнес-процессов: документирование, анализ, управление, оптимизация / Дж. Харрингтон, К.С. Эсселинг, Х. Ван Нимвеген. – СПб.: Азбука; СПб.: БМикро, 2002. – 328 с.
10. Хейвуд Дж. Б. Аутсорсинг: в поисках конкурентных преимуществ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 176 с.
11. Александрова В.А. Формализация выбора ключевых бизнес-процессов для их аутсорсинга на основе использования методов статистического анализа // Экономика і регіон №6 (49) – 2014.

References (transliterated)

1. Gorfinkel' E.M., Kupriakov E.M., Prasolova V.P. i dr. Jekonomika predpriatija: uchebnik dlja VUZov [Business Economics: A Textbook], pod red. prof. V.Ja. Gorfinkela, prof. E.M. Kupriakova. Moscow: JuNITI, 1999. 365 p.
2. Lych G.M. Minimizacija izderzhkek [Minimizing costs]. Finansy, uchët, audit. 2007. No 7-8. Pp. 51-55.
3. Anikin B.A., Rudaja I.L. Outsourcing i autstaffing: vysokie tehnologii menedzhmenta: Uchebnoe posobie. [Outsourcing and outstaffing: high technology management: Textbook] Moscow: INFRA-M, 2009. 320 p.
4. Bravar Zh.-L., Morgan R. Jeffektivnyj outsorsing. Ponimanie, planirovanie i ispol'zovanie uspešnyh outsorsingovyh otnošenij. [Effective outsourcing. Understanding, planning and use of successful outsourcing relationships] Moscow: Balans Biznes Buks, 2007. 475 p.
5. Eliforov V.G., Repin V.V. Biznes-processy: reglamentacija i upravlenie: ucheb. posobie [Business processes: regulation and management: Textbook. benefit]. Institut jekonomiki i finansov «Sinerģija». Moscow: Infra-M, 2006. 318 p.
6. Klements S. i dr. Outsorsing biznes-processov. Sovety finansovogo direktora [Business Process Outsourcing. Tips CFO] Pod obshh. red. V. V. Golda. Moscow: Vershina, 2006. 416 p.
7. Ponomarenko V.S., Minukhin S.V., Znakhur S.V. Teoriya ta praktyka modelyuvannya biznes-protseсів : monohrafiya. [Theory and practice of business process modeling: monograph.] Kharkiv: vyd. KhNEU, 2013. 244 p.
8. Repin V.V., Eliforov V.G. Processnyj podhod k upravleniju. Modelirovanie biznes-processov [Process approach to management. Business process modeling] Moscow: RIA «Standarty i kachestvo», 2004. 408 p.
9. Harrington Dzh., Jesseling K.S., Van Nimvegen H. Optimizacija biznes-processov: dokumentirovanie, analiz, upravlenie, optimizacija [Optimization of business processes: documentation, analysis, management, optimization], SPb.: Azbuka; SPb.: BMikro, 2002. 328 p.
10. Hejvud Dzh. B. Outsorsing: v poiskah konkurentnyh preimushhestv. [Outsourcing: in search of competitive advantage.] Moscow: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2002. 176 p.
11. Aleksandrova V.A. Formalizacija vybora ključevykh biznes-processov dlja ih outsorsinga na osnove ispol'zovanija metodov statističeskogo analiza [The formalization of the selection of key business processes for their outsourcing based on the use of statistical analysis] *Ekonomika i region* No 6 (49), 2014.

Надійшло (received) 23.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Зниження витрат виробництва електричних машин і апаратів при використанні аутсорсинга бізнес-процесів / В.О. Александрова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 12-16. Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-3944.

Снижение затрат производства электрических машин и аппаратов при использовании аутсорсинга бизнес-процессов / В.А. Александрова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 12-16. Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-3944.

Reduction of electrical machines and apparatuses production costs by using business process outsourcing / V. A. Aleksandrova // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 12-16. Bibliography: 11. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Александрова Вікторія Олександрівна – старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, тел.: (067) 720-90-01, e-mail: va_aleksandrova@mail.ru

Александрова Виктория Александровна – старший преподаватель, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, тел.: (67) 720-90-01, e-mail: va_aleksandrova@mail.ru

Aleksandrova Viktorija Aleksandrovna - senior lecturer, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel. : (067) 720-90-01, e-mail: va_aleksandrova@mail.ru

УДК 621.313

Е.И. БАЙДА, А.А. ЧЕПЕЛЮК**ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕГОРАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ВКЛЮЧЕННЫХ В ТРЕХФАЗНУЮ СЕТЬ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА С НЕЙТРАЛЬЮ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТОКА НЕЙТРАЛИ С ПОМОЩЬЮ РЕЛЕ ТОКА**

Пропонується виявлення несправностей, пов'язаних з відгоранням проводів живлення чи перегоранням спіралей трубчатих електронагрівачів однакової потужності, увімкнених у трифазну мережу за схемою зірка з нейтраллю, шляхом контролю струму у нейтральному провіднику за допомогою реле струму. Проведено дослідження впливу допустимих відхилень напруги живлення та її несиметрії, відхилень електричних параметрів нагрівачів на струм нейтрального провідника при справних нагрівачах та у разі несправностей, пов'язаних з відгоранням проводів живлення чи перегоранням їх спіралей. За результатами досліджень розроблено рекомендації щодо налаштування уставок реле струму.

Ключові слова: трубчатий електронагрівач, струм нейтралі, реле струму, уставка реле струму.

Предлагается определение неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей трубчатых электронагревателей одинаковой мощности, включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью, путем контроля тока в нейтральном проводнике с помощью реле тока. Проведены исследования влияния допустимых отклонений напряжения питания и его несимметрии, отклонений электрических параметров электронагревателей на ток нейтрального провода при исправных нагревателях и в случае неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием их спиралей. По результатам исследования разработаны рекомендации по настройке уставок реле тока.

Ключевые слова: трубчатый электронагреватель, ток нейтрального провода, реле тока, уставка реле тока.

Was offered a determination of the failure connected with wires' burnout or burnout of spirals of tubular electric heaters with identical power included in a three-phase network according to the star scheme with a neutral, by the way of control of current in the neutral wire with the help of the current relay. Researches of influence of deviations of supply voltage and its asymmetry, deviations of electrical parameters of electric heaters on neutral wire current in case of the normal functioning heaters and in case of the failures connected with wires' burnout or burnout of their spirals were conducted. By results of a research were developed recommendations about setup of settings of the current relay.

Keywords: tubular electric heaters, neutral current, current relays, the relay current setting.

Введение. Для комплектации промышленных установок, осуществляющих нагрев различных сред путем излучения, конвекции или теплопроводности широко применяются трубчатые электронагреватели (ТЭНы) в которых в качестве нагревательных элементов используются материалы, выполненные из сплавов с высоким удельным сопротивлением. Широкая номенклатура указанных нагревателей: по мощности (от сотен до 25 кВт); номинальному напряжению (от 12 до 380 В); рабочей температуре на поверхности оболочки (от 100 до 600 °С); нагреваемой рабочей среде (вода; растворы кислот, растворы щелочей; спокойная или движущаяся среда воздуха, прочих газов, смесей газов; жиры, масла; щелочи; легкоплавкие металлы; литейные формы, пресс-формы; металлические плиты) и т. д. [1] обусловлена разнообразием современных технологических процессов использующих электронагрев.

Для поддержания необходимой температуры нагрева рабочей среды в электроустановках с электронагревателями используются терморегуляторы (электронные или электромеханические) или термовыключатели с самовозвратом, отключающие нагреватели при достижении заданной температуры нагрева рабочей среды и осуществляющие автоматическое повторное включение нагревателей при снижении температуры рабочей среды на заданный дифференциал температур. Как правило, с помощью контактного или бесконтактного выхода терморегулятора осуществляется коммутация цепи управления силового коммутационного аппарата (контактора, твердотельного реле и др.), осуществляющего подключение электронагревателей к силовой питающей сети.

Для ограничения температуры нагрева нагревателей, неконтролируемый рост которой может привести не только к нарушению технологического процесса вследствие неконтролируемого роста температуры ра-

бочей среды, но и к пожароопасным ситуациям и выходу нагревателей из строя, в цепях управления нагревателями применяются также термовыключатели без самовозврата (термоограничители) или термopредохранители.

Для отключения коротких замыканий в нагревателях, возникающих вследствие пробоя изоляции на корпус, применяют автоматические выключатели или предохранители.

Контроль токов утечки нагревателей может быть реализован с помощью аппаратов разностного тока (дифференциальные реле), отключающих нагреватели в случае достижения токов утечки недопустимого значения.

Помимо указанных выше аварийных режимов, возникающих в нагревателях, распространенным также является отгорание питающих проводников в местах соединения с выводами нагревателя, а также перегорание нагревательных спиралей внутри нагревателей. Указанные аварийные ситуации не всегда сопровождаются короткими замыканиями, поэтому в промышленных установках, использующих несколько нагревателей включенных параллельно или в разные фазы, могут оставаться долгое время незамеченными и обнаруживаются, как правило, с появлением нарушений в технологическом процессе нагрева в виде недостаточного, медленного или (и) неравномерного нагрева рабочих сред, что может приводить к снижению производительности, недовыпуску или браку продукции. В таких случаях, помимо непрерывного контроля температуры рабочей среды, целесообразным также является ведение контроля исправности нагревателей во время их работы.

Цель работы и постановка задач исследования.

Целью данной работы является исследование возможности обнаружения неисправностей, связанных с

отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей трубчатых электронагревателей одинаковой мощности включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью путем контроля тока в нейтральном проводе с помощью реле тока.

Электрическая схема включения таких нагревателей в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью приведена на рис. 1. Как правило, в таких схемах, с целью обеспечения равномерной нагрузки фаз, используют нагреватели одинаковой мощности, одновременное подключение которых к трехфазной сети осуществляется посредством трехполосного коммутационного аппарата.

Контроль исправности нагревателей во время их работы в указанной схеме может быть реализован посредством контроля тока через каждый из нагревателей с помощью токовых реле или датчиков тока, включенных последовательно с нагревателями. Недостатком указанного способа контроля является то, что его практическая реализация требует установки в каждой ветви нагревателей токового реле или датчика, количество которых увеличивается пропорционально количеству ступеней нагрева.

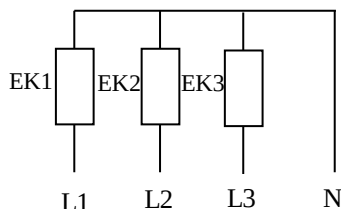


Рис. 1 – Схема включения нагревателей (ЕК1-ЕК3) в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью

Для устранения указанного недостатка предлагается вести контроль исправности нагревателей одинаковой мощности, включенных по схеме звезда с нейтралью, посредством контроля суммарного тока нейтрали с помощью включенного в нейтраль токового реле КА (рис. 2). В случае использования нескольких ступеней нагрева, каждая из ступеней подключается по схеме звезда с нейтралью, а токовое реле включается общую для всех ступеней нейтраль.

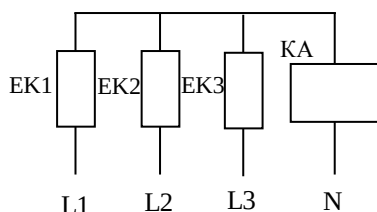


Рис. 2 – Схема включения нагревателей (ЕК1-ЕК3) в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью и реле тока КА

При такой схеме включения предполагается, что при исправных нагревателях, в соответствии с первым законом Кирхгофа, ток нейтрали будет равняться или близким к нулю, так как нагрузка при этом является практически симметричной. В случае прерывания тока в одном из нагревателей из-за его перегорания или обрыва цепи его питания – в нейтрали появится ток, вызванный несимметрией нагрузки.

Для практической реализации таких схем контроля необходимо определить граничные значения

токов нейтрали при исправных электронагревателях и в случае неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей нагревателей с учетом допустимых отклонений напряжения питания и его несимметрии и отклонения электрических параметров электронагревателей вследствие случайного разброса параметров. По указанным значениям может быть определена токовая уставка реле.

Допустимые отклонения напряжений и электрических параметров нагревателей. Нормы отклонения напряжения питания и его несимметрии установлены в [2]. Применительно к четырехпроводным электрическим сетям с глухозаземленной нейтралью (номинальное напряжение 0,38 кВ) нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии равны соответственно $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети; нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям в точках общего присоединения к электрическим сетям равны 2,0 % и 4,0 % соответственно.

В соответствии с [1] отклонение потребляемой мощности ТЭН при номинальном напряжении не должно превышать плюс 5 % и минус 10 % от номинальной потребляемой мощности для ТЭН с активным сопротивлением свыше 10 Ом и $\pm 10\%$ для ТЭН с активным сопротивлением менее 10 Ом. Под номинальной потребляемой мощностью ТЭНа (указывается изготовителем на изделии) понимают мощность, потребляемую ТЭНом при номинальном напряжении в условиях нормальной теплоотдачи при рабочей температуре. Рабочие температуры ТЭНов в зависимости от нагреваемой среды составляют до (100, 320, 450, 600) °С.

Алгоритм определения граничных значений токов нейтрали в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей. Здесь и далее под нормальным режимом работы нагревателей включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью будем понимать работу при исправных нагревателях, а под аварийным режимом работы нагревателей - работу при неисправностях, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей нагревателей. Под напряжениями и токами будем понимать их среднеквадратичные значения.

Из теории трехфазных цепей [3] следует, что ток в нейтральном проводнике определяется как несимметрией напряжений по обратной и нулевой последовательностям [2] (определяется внешними факторами), так и несимметрией нагрузки (нагревателей), которая определяется случайным разбросом номинальных значений мощности нагревателей [1].

Алгоритм определения граничных значений токов нейтрали при этом сводится к следующему.

1. Определить предельно допустимые (максимальные и минимальные) значения фазных напряжений сети при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям.

2. Определить предельно допустимый случайный разброс электрических параметров (мощности) нагре-

вателей.

3. Определить граничные значения токов нейтрали при предельно допустимых значениях фазных напряжений сети и предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям с учетом случайного разброса параметров нагревателей в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей.

4. Определить значение тока уставки реле тока.

Далее предложенный алгоритм будет реализован на примере включения до трех ступеней нагрева, каждая из которых состоит из трех ТЭНов номинальной мощностью 1 кВт, включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью (рис. 1).

Определение предельно допустимых значений фазных напряжений сети при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений.

Для определения предельно допустимых значений напряжений предположим, что фазные напряжения

$$U_i = U + \Delta U_i, \quad (1)$$

где U_i – значения фазных напряжений;

U – номинальные фазные напряжения с учетом сдвига в пространстве;

$i = a, b, c$ – индексы фаз;

ΔU_i – отклонение фазных напряжений от номинального.

Тогда [2, 3]

$$K_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_0}{U_1} = f_0(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c), \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{U_2}{U_1} = f_2(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c),$$

где K_0, K_2 – коэффициенты несимметрии напряжений нулевой и обратной последовательности;

ΔU_i – подлежащие определению отклонения фазных напряжений.

Используя значения предельно допустимых коэффициентов несимметрии напряжений нулевой и обратной последовательности [2], решаем систему (3) относительно $\Delta U_a, \Delta U_b$

$$\begin{aligned} f_0(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c) &= 0,04, \\ f_2(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c) &= 0,04. \end{aligned} \quad (3)$$

В результате получим:

$$\begin{aligned} \Delta U_a &= \varphi(\Delta U_c), \\ \Delta U_b &= \varphi(\Delta U_c). \end{aligned} \quad (4)$$

Неизвестное значение отклонения фазного напряжения ΔU_c в (4), подбиралось согласно условию по предельно допустимым значениям установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии:

$$\begin{aligned} U_{i \max} &= 1,1 \cdot U \\ \text{или} \\ U_{i \min} &= 0,9 \cdot U. \end{aligned} \quad (5)$$

Следовательно, условия [2] по предельно допустимым значениям установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии ($\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети) и предельно допустимых значениях коэффициента несимметрии напряжений по обратной и ну-

левой последовательностям (4 %) выполнены (наихудший вариант работы сети).

В табл. 1 приведены полученные предельно допустимые максимальные и минимальные значения фазных напряжений при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям.

Таблица 1 – Предельно допустимые максимальные и минимальные значения фазных напряжений при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям

U	a	b	c
$U_{\max}, \text{В}$	242	220,4	220,4
$U_{\min}, \text{В}$	217,3	198	198

Определение предельно допустимых отклонений мощности нагревательных элементов и расчет токов нейтрали. Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей можно предположить, что случайные значения мощностей нагревателя подчиняется нормальному закону распределения случайных величин [4].

В соответствии с [1] для ТЭН с активным сопротивлением свыше 10 Ом отклонение потребляемой мощности ТЭНа при номинальном напряжении не должно превышать плюс 5 % и минус 10 % от номинальной потребляемой мощности. Приняв это отклонение за предельно допустимое, можно определить среднее значение мощности одного нагревателя и дисперсию (на основании правила «трех сигм») [4].

Результат расчета для нагревателя номинальной мощностью 1000 Вт:

$$P_s = 975 \text{ Вт}, \sigma = 25 \text{ Вт},$$

где P_s – среднее значение мощности одного нагревателя;

σ – разброс значений.

Вид функции плотности вероятности при нормальном законе распределения случайной величины

$$p = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(P - P_s)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (6)$$

где p – плотность вероятности появления мощности нагревателя со значением P .

График плотности вероятности показан на рис. 3.

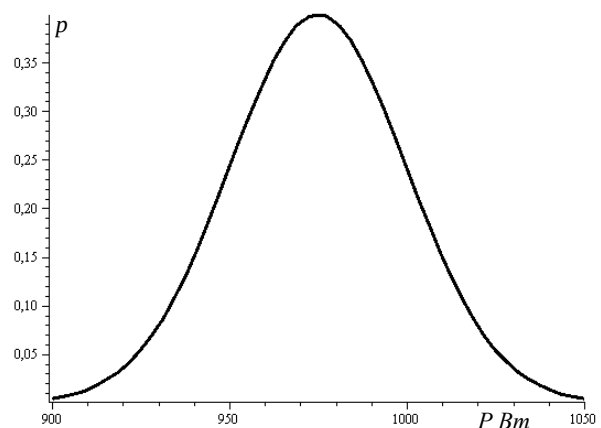


Рис. 3 – Плотность вероятности отклонения мощности одного нагревателя

Вид расчетных уравнений для схемы звезда с нейтралью для определения тока нейтрали:

$$\begin{cases} U_a = I_a \cdot (Z_a + Z_l) + I_0 \cdot Z_0, \\ U_b = I_b \cdot (Z_b + Z_l) + I_0 \cdot Z_0, \\ U_c = I_c \cdot (Z_c + Z_l) + I_0 \cdot Z_0, \\ I_0 = I_a + I_b + I_c. \end{cases} \quad (7)$$

где U_a, U_b, U_c – фазные напряжения;

I_a, I_b, I_c – фазные токи;

I_0 – ток нейтрали;

Z_l – полное сопротивление фазного проводника;

Z_a, Z_b, Z_c – эквивалентное сопротивление нагревателей, включенных в соответствующие фазы;

Z_0 – полное сопротивление нейтрального проводника.

Сопротивление фазных и нейтрального проводника определялось по удельным сопротивлениям питающего кабеля марки АВВГ (3х95+1х50) мм², приведенным в [5], при длине питающего кабеля 100 м.

Эквивалентные сопротивления нагревателей, включенных в соответствующие фазы при включенных трех ступенях нагрева определяются из выражения:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_{1j} + R_{2j} + R_{3j}}. \quad (8)$$

В (8) каждое из R_j – сопротивление отдельного нагревателя 1, 2 и 3-й ступени нагрева, определяемое по формуле:

$$R_j = \frac{P_j}{U^2}, \quad (9)$$

где U – номинальное напряжение соответствующей фазы;

P_j – значение мощности, изменяющейся в соответствии с нормальным законом распределения случайной величины.

Значения случайных величин мощности нагревателей вычислялись по формуле

$$P_j = P_s + \sigma \cdot \xi_i, \quad (10)$$

где ξ_i – генерируемая псевдослучайная величина, распределённая по нормальному закону [6] и изменяющаяся в диапазоне (минус 3...плюс 3).

Графики некоторых значений ξ_i и P_j показаны на рис. 4.

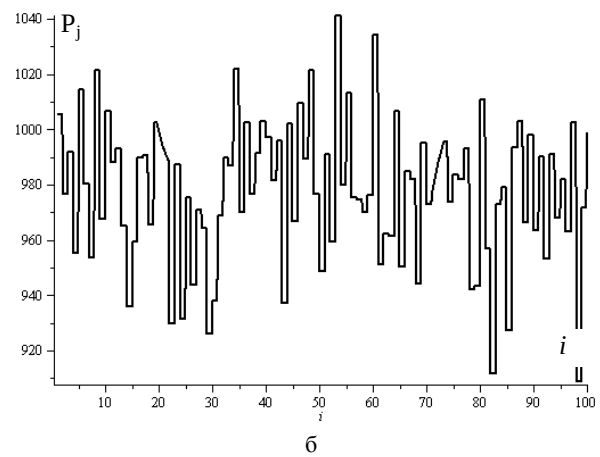
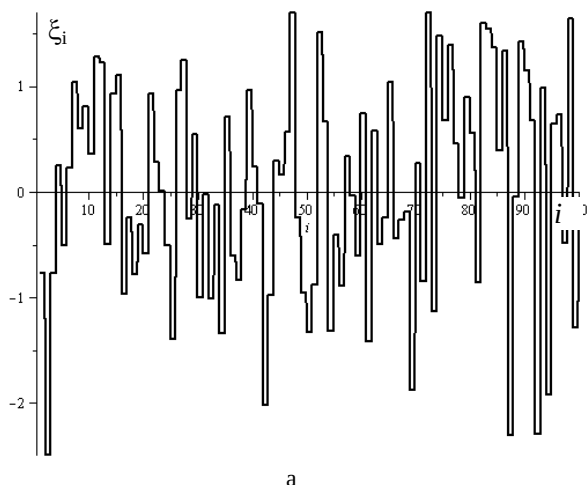


Рис. 4 – Значения случайной величины, распределённой по нормальному закону (а) и мощности (б) в зависимости от числа генераций

Определение граничных значений токов нейтрали. Для получения достоверных значений граничных токов нейтрали при предельно допустимых значениях фазных напряжений сети и предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений с учетом случайного разброса параметров нагревателей в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей число генераций подбиралось расчетным путём и равнялось 5000.

Алгоритм определения граничных значений токов нейтрали при этом состоял из следующих действий.

1. Для каждого испытания генерировалось девять значений случайной величины ξ_i .

2. По (10) определялись случайные значения мощности нагревателей.

3. По (9) рассчитывались случайные значения сопротивлений нагревателей.

4. Из (8) определялись значения эквивалентных сопротивлений нагревателей, включенных в соответствующие фазы.

5. Решалась система уравнений (7).

Среднее значение тока нейтрали и его предельные отклонения рассчитывались по формулам

$$I_{0s} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I_{0i}, \quad \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (I_{0i}^2 - I_{0s}^2), \quad (11)$$

где I_{0s} – среднее значение тока нейтрали;

N – число генераций;

σ^2 – квадрат дисперсии тока нейтрали;

I_{0i} – текущее значение тока нейтрали для каждой генерации.

Граничные значения токов нейтрали определялись по выражениям

$$\begin{aligned} I_{0\min} &= I_{0s} - 3 \cdot \sqrt{\sigma^2}, \\ I_{0\max} &= I_{0s} + 3 \cdot \sqrt{\sigma^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $I_{0\min}$, $I_{0\max}$ – минимальное и максимальное значение тока нейтрали для каждого опыта.

Результаты расчетов токов нейтрали по изложенному выше алгоритму при работе одной, двух и трёх ступеней нагревателей в нормальном и аварийном режимах работы приведены в табл. 2 – табл. 4.

Таблица 2 – Расчетные значения тока нейтрали при работе одной ступени нагревателей

Нормальный режим		
U	I_{0min}, A	I_{0max}, A
U_{max}	0,03	0,88
U_{min}	0,029	0,79
Аварийный режим		
U	I_{0min}, A	I_{0max}, A
U_{max}	4,17	4,65
U_{min}	3,74	4,17

Таблица 3 – Расчетные значения тока нейтрали при работе двух ступеней нагревателей

Нормальный режим		
U	I_{0min}, A	I_{0max}, A
U_{max}	0,26	1,49
U_{min}	0,24	1,32
Аварийный режим		
U	I_{0min}, A	I_{0max}, A
U_{max}	3,43	4,43
U_{min}	3,08	3,98

Таблица 4 – Расчетные значения тока нейтрали при работе трех ступеней нагревателей

Нормальный режим		
U	I_{0min}, A	I_{0max}, A
U_{max}	0,55	2,03
U_{min}	0,49	1,81
Аварийный режим		
U	I_{0min}, A	I_{0max}, A
U_{max}	2,82	4,11
U_{min}	2,53	3,70

В табл. 2 - табл. 4 отмечены максимальные значения токов нейтрали в нормальном режиме работы нагревателей и минимальные значения токов нейтрали в аварийном режиме работы нагревателей. Полученными максимальными значениями токов нейтрали в нормальном режиме работы нагревателей определяется минимальная граница диапазона токов несрабатывания реле тока, а минимальными значениями токов нейтрали в аварийном режиме работы нагревателей – максимальная граница токов срабатывания реле тока.

Анализ данных из указанных таблиц свидетельствует о том, что наибольшее значения максимального тока нейтрали в нормальном режиме работы нагревателей и наименьшее значение минимального тока нейтрали в аварийном режиме работы нагревателей будут протекать в нейтрали при включении трех ступеней нагревателей. Поэтому токовая уставка реле тока при использовании ступенчатого включения нагревателей должна выбираться при включении максимального числа ступеней.

Рекомендации по настройке уставки реле тока.

На электротехническом рынке широко представлены электронные реле тока, которые помимо задания токовой уставки позволяют задавать также и задержку срабатывания реле. Выходными элементами таких реле являются переключающие контакты, которые легко могут быть интегрированы в схемы сигнализации или аварийного отключения.

При использовании таких реле в предложенных схемах благодаря наличию настраиваемой задержки срабатывания можно исключить ложные срабатывания защиты вследствие переходных процессов и неодно-

временности замыкания контактов при включении-отключении отдельных ступеней нагревателей.

Для корректной настройки реле его ток уставки рекомендуется устанавливать на середине диапазона токов - максимально возможного тока нейтрали при исправных нагревателях и минимально возможного тока нейтрали при отгорании питающих проводников или перегорании спиралей нагревателей.

Для трех ступеней нагрева (табл. 4) ток уставки реле, в соответствие с указанными выше рекомендациями, должен быть установлен равным 2,28 А. Данный ток уставки реле обеспечивает обнаружение отгорания питающего проводника или перегорания спирали нагревателей при их мощности 1 кВт.

Значения токов уставки реле тока при других мощностях ТЭНов (с учетом условия, что его сопротивление не меньше 10 Ом) при включенных трех ступенях нагрева, приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Значения граничных токов и тока уставки реле тока в зависимости от мощности ТЭНа при работе трех ступеней нагрева

P_n кВт	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
I_{0max}, A	1,03	2,03	2,98	3,94	4,85	5,72	6,55	7,37
I_{0min}, A	1,29	2,53	3,73	4,9	6,03	7,18	8,25	9,32
I_{0u}, A	1,16	2,28	3,355	4,42	5,44	6,45	7,4	8,345

На рис. 5 приведены графические зависимости граничных токов и тока уставки реле - I_{0u} из табл. 5 от номинальной мощности ТЭНов.

Уравнение для тока уставки в функции номинальной мощности полученное в результате аппроксимации данных из табл. 5 запишется в виде:

$$I_{0u} = 0,134 + 2,053 \cdot P_n, \quad (13)$$

где I_{0u} – ток уставки реле, А;

P_n – номинальная мощность ТЭНа, кВт.

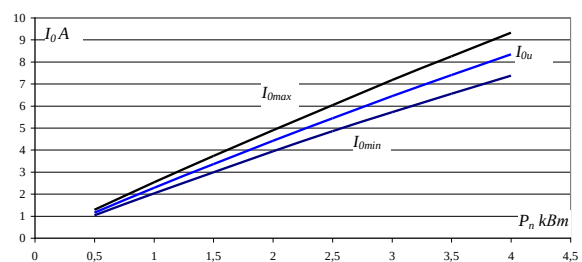


Рис. 5 – Зависимость тока уставки реле от мощности ТЭНов

Формула (13) справедлива в диапазоне номинальных мощностей ($0,5 \leq P_n \leq 4$) кВт.

В заключение, было проведено компьютерное моделирование одного из вариантов работы ТЭНов в системе SimPowerSystem при номинальном напряжении и номинальной мощности, которое иллюстрирует изменение токов в фазных и нейтральном проводниках в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей. Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 6-7.

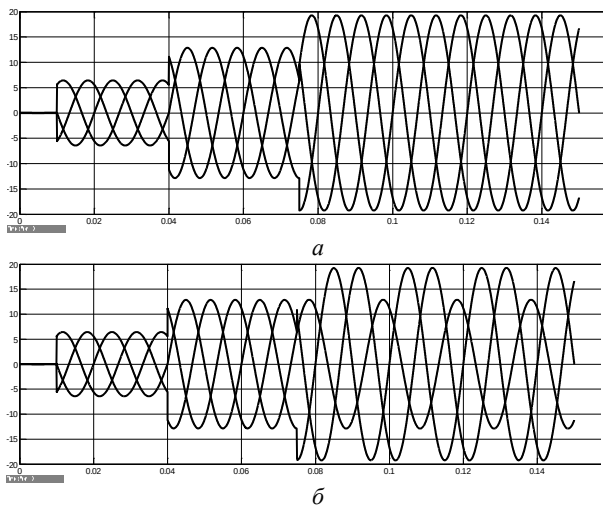


Рис. 6 – Токи в фазах при включении 1, 2 и 3 ступеней нагревателей: *a* - в нормальном режиме работы трех ступеней нагревателей; *б* - в нормальном режиме работы двух ступеней нагревателей и аварийном режиме в третьей ступени

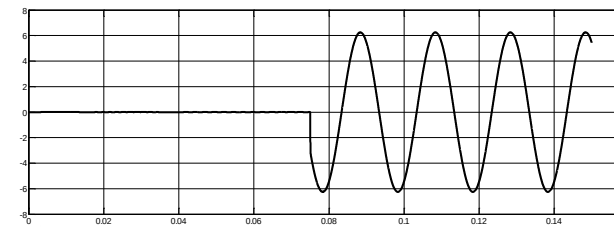


Рис. 7 – Ток нейтрали в аварийном режиме работы третьей ступени нагревателей

Выводы.

1. Предложена методика обнаружения неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей трубчатых электронагревателей включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью путем контроля тока в нейтральном проводе с помощью реле тока.
2. Предложен алгоритм определения граничных токов нейтрали.
3. Предложена методика определения предельно допустимых значений напряжений питания нагревателей при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжения.
4. Определены предельно допустимые отклонения мощности нагревательных элементов (ТЭНов) с учётом случайного характера этой величины.

6. Определены граничные значения токов нейтрали при исправных нагревателях нейтрали и при отгорании питающих проводников или перегорании спиралей нагревателей с учетом допустимых отклонений напряжения питания и его несимметрии, отклонения электрических параметров (мощность, активное сопротивление) электронагревателей.

7. На основании п. 1-6 выводов разработаны рекомендации по настройке уставок реле тока.

8. Получены значения уставок реле тока для ТЭНов мощностью (0,5-4) кВт, что делает предложенную методику универсальной.

Список литературы

1. ГОСТ 13268-88 Электронагреватели трубчатые.
2. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Каплянский А. Е., Лысенко А. П., Полотовский Л. С. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1972. – 447 с.
4. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 64 с.
5. ГОСТ 2849-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
6. Дьяконов В. П. Математическая система Maple. – М.: Солон, 1998. – 399 с.
7. Справочник электрика промышленных предприятий. Под редакцией Л.Б. Геллера – Минск.: Редакция научно-технической литературы, 1963. – 585 с.

References (transliterated)

1. GOST 13268-88 Jelektronagrevateli trubchatye [State Standard 13268-88. Heating elements]. Moscow, Standartinform Publ.
2. GOST 13109-97 Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskix sredstv jelektricheskaja. Normy kachestva jelektricheskogo jenergii v sistemah jelektricheskogo snabženiya obščego naznačeniya [State Standard 13109-97. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems]. Moscow, Standartinform Publ.
3. Kapljanskij A. E., Lysenko A. P., Polotovskij L. S. *Teoreticheskie osnovy jelektricheskogo inženieringa* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow: High school, 1972. 447 p.
4. Sobol' I. M. *Metod Monte-Karlo* [Monte Carlo method]. Moscow: 1978. 64 p.
5. GOST 2849-93. Korotkie zamykaniya v jelektroustanovkah. Metody rasčjota v jelektroustanovkah peremennogo toka naprjazheniem do 1 kV [State Standard 2849-93. Short circuits in electrical installations. calculation methods in AC electrical voltage up to 1 kV].
6. D'jakonov V. P. *Matematicheskaja sistema Maple* [A mathematical system Maple]. Moscow: Solon, 1998. 399 p.
7. Geller L.B. *Spravochnik jelektrika promyšlennyh predpriatij.* Minsk.: Redakcija nauchno-tehnicheskogo literatury, 1963. 585 p.

Поступила (received) 20.06.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Виявлення перегорання трубчатих електронагрівачів увімкнених у трифазну мережу за схемою зірка з нейтраллю за зміною струму в нейтралі за допомогою реле струму / Є. І. Байда, О. О. Чепелюк // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 16-22. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Обнаружение перегорания трубчатых электронагревателей включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью по изменению тока нейтрали с помощью реле тока / Е. И. Байда, А. А. Чепелюк // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 16-22. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Detection of burnout of tubular electric heaters, included in the three-phase network with the star scheme with the neutral on change of current of neutral with the help of current relay / E. I. Baida, O. O. Chepelyuk //

NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 16-22. Bibliography: 7. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Байда Евгений Иванович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических аппаратов; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: baida_kpi@i.ua.

Байда Євген Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: baida_kpi@i.ua.

Baida Evgeniy Ivanovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Electrical Apparatus; tel.: (057) 707-68-64; e-mail: baida_kpi@i.ua.

Чепелюк Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических аппаратов; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: chep1@i.ua.

Чепелюк Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: chep1@i.ua.

Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Electrical Apparatus; tel.: (057) 707-68-64; e-mail: chep1@i.ua.

УДК 681.58: 681.32

Ю. С. ГРИЩУК**ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ**

Розроблені структурні і принципові електричні схеми стендів автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень (АСК ТПД) електричних апаратів на базі мікроконтролерів МК1816BE51 і MSP430 та алгоритм її роботи.

Ключові слова: електричний апарат, автоматизація досліджень, швидкодіючий запобіжник, лабораторний стенд, мікроконтролер.

Разработаны структурные и принципиальные электрические схемы стендов автоматизированной системы управления технологическим процессом исследований (АСУ ТПИ) электрических аппаратов на базе микроконтроллеров МК1816BE51 и MSP430 и алгоритм ее работы.

Ключевые слова: электрический аппарат, автоматизация исследований, быстродействующий предохранитель, лабораторный стенд, микроконтроллер.

The structural and circuit diagrams stands automated process control system studies (ACS TPI) electric devices based on MCUs MK1816VE51 and MSP430 and the algorithm of its work.

Keywords: electrical apparatus, automation research, quick fuse, test machine, microcontroller

Вступ. В електричних апаратах та їх дослідженнях доцільно використовувати однокристалеві мікроконтролери (МК), які отримали широке розповсюдження в системах керування технічним, контрольно-дослідницьким обладнанням, електропобутовою технікою, електричним і електроенергетичним устаткуванням, технологічними процесами виробництва, випробування і дослідження. Невеликі розміри, вага і енергоємність МК дозволяє вбудовувати їх в об'єкт керування та забезпечувати досягнення необхідних користувачу характеристик.

Метою даної роботи являється розробка автоматизованої системи керування комутаційними дослідженнями електричних апаратів на базі мікроконтролерів, яка дозволить скоротити терміни проведення експериментальних досліджень електричних апаратів, підвищити достовірність результатів і економічну ефективність.

Застосування мікроконтролерів МК1816BE51 при автоматизації досліджень швидкодіючих запобіжників. Аналіз вимог, що пред'являються до електричних апаратів захисту (автоматичних вимикачів і швидкодіючих запобіжників і ін.) і методів їх випробувань, указує на вельми широкий перелік параметрів, які повинні перевірятися і досліджуватися при проведенні різних випробувань і досліджень. До таких параметрів відносяться: номінальний струм, струм перевантаження, струм короткого замикання, напруга на дузі, Джоулевій інтеграл, час відключення, температура на виводах, температура в центрі плавкого елемента, температура контактів, швидкість руху дуги в дугогасних решітках і т.ін. [1-4]. Все це указує на необхідність використання вельми широкого спектру відповідних датчиків, що дозволяють з необхідною точністю відстежувати зміну цих параметрів в процесі досліджень.

При проведенні комутаційних досліджень на постійному струмі таких електричних апаратів, як швидкодіючі запобіжники, використовуються експериментальні установки, які включають головне коло і коло керування. Схема однієї із таких установок представлена на рис. 1 [1, 2]. Головне коло установки складають ударний генератор (УГ) ($U_n = 880$ В, $I_{yd} = 70$ кА), регульовані реактори L , регульований опір R_a , захис-

ний вимикач (ЗВ), вмикаючий апарат (ВА), макет апарату (МА). Проведення досліджень здійснюється за допомогою пульта електронного управління (ПЕУ) і електромеханічного або електронного осцилографа (ЕО).

Вимірювання струмів проводиться за допомогою шунта з опором $R_{ш} = 0,7 \cdot 10^{-5}$ Ом. Напруга на дузі вимірюється по схемі дільника напруги. Криві струму і напруги в стандартних експериментах записувалися на світлочутливий папір за допомогою світлопроектового осцилографа. В цьому випадку обробка осцилограм проводиться графічним методом, що вимагає великих трудових і фінансових витрат і часу і знижує точність вимірювань.

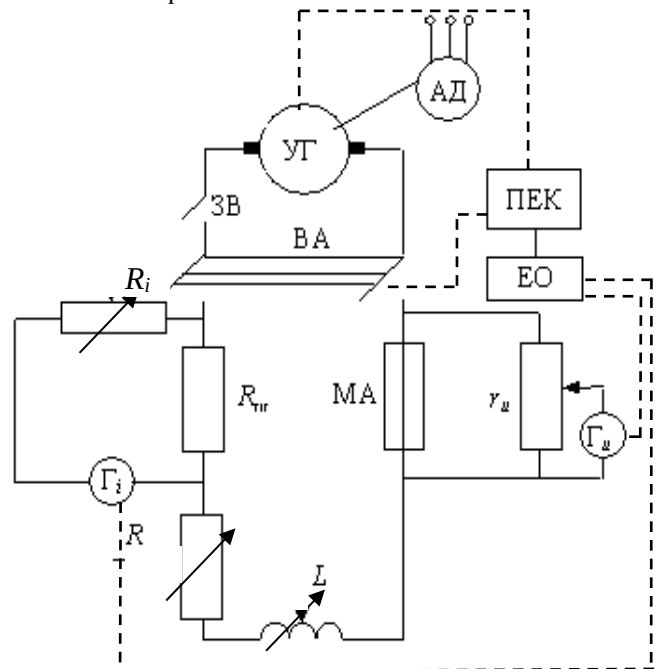


Рис. 1 – Схема експериментального стенду для комутаційних досліджень швидкодіючих запобіжників

При дослідженні маловивчених процесів для того, щоб забезпечити реєстрацію можливих гострих піків перенапруження, для запису кривих струму і напруги необхідно використовувати електронний осцилограф і здійснювати фотографування за допомо-

гою фотоприставки. У випадках, коли потрібна підвищена точність, обробка осцилограми проводиться за допомогою вимірювального мікроскопа. Все це також приводить до додаткових матеріальних, тимчасових і трудових витрат. Скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, понизити їх вартість можна, застосувавши розроблену автоматизовану систему керування технологічним процесом досліджень (АСКТПД) із застосуванням однокристального мікроконтролера.

Структурна схема АСКТПД, представлена на рис. 2. Вона виконана на базі мікроконтролера серії МК1816BE51 і включає:

- датчики контрольованих параметрів (струму, напруги, температури, Джоулевого інтеграла) Д1–Д4 (первинні перетворювачі);
- нормуючі підсилювачі П1–П4;
- чотириканальний комутатор аналогових сигналів типу КР590КИ6;
- аналого-цифровий перетворювач типу К1113ПВ1;
- мікроконтролер, що містить вбудований генератор тактових сигналів, пам'ять команд, ОЗП, вбудовані 3 порти і послідовний канал зв'язку;
- компаратори К1–К4 типу К554 СА3, виходи яких по «АБО» об'єднані з вихідними сигналами мікроконтролера, що управляють;
- пристрої узгодження і обміну ПЗО1–ПЗО4, які включають виконавчі пристрої силової установки, які задають режим випробувань або досліджень.

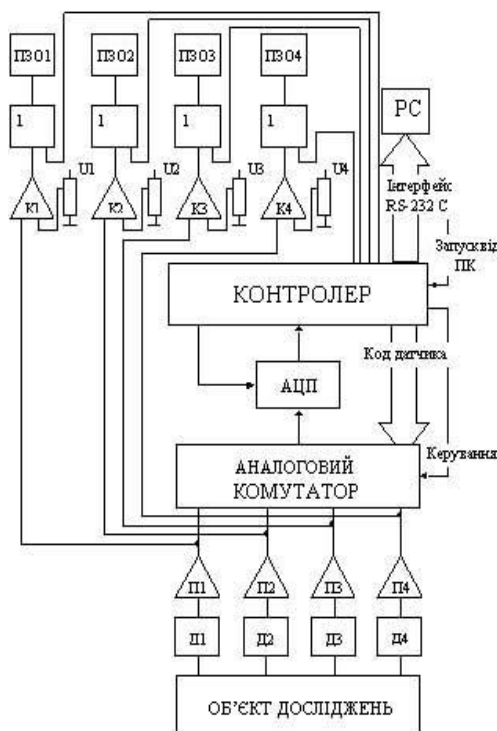


Рис. 2 – Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень швидкодіючих запобіжників

Через послідовний інтерфейс RS232C АСУ ТПД пов'язана з ПЕОМ, яка може змінювати режими випробувань або досліджень, а також приймати, запам'ятовувати, відображати і документувати резуль-

тати випробувань або досліджень.

До об'єкту дослідження підключені відповідні датчики. Датчики контрольованих параметрів Д1–Д4 є первинними перетворювачами струму, напруги, температури, Джоулевого інтеграла в напругу. Нормуючі підсилювачі погоджують вихідну напругу датчиків з необхідним вхідним сигналом АЦП 0–10 В і забезпечують низький вихідний опір.

Комутатор аналогових сигналів перемикає один з входів на вихід залежно від керуючого коду, що поступив від мікроконтролера. Аналоговий сигнал з виходу комутатора поступає на АЦП який забезпечує перетворення його в цифровий код. Таке перетворення реалізовано найбільш швидкодіючим апаратним способом на основі ВІС АЦП, що підключається до порту МК. Вибраний АЦП є швидкодіючим десятирозрядним перетворювачем вхідної напруги в паралельний двійковий код. Запуск перетворювача проводиться за сигналом, який виробляється мікроконтролером, закінчення перетворення викликає сигнал готовності, який є командою для зчитування даних.

Мікроконтролер як мікропроцесорний пристрій, відповідно до записаної в пам'ять програми, управляє процесом досліджень або випробувань шляхом опиту із заданою періодичністю датчиків Д1–Д4 відповідно до алгоритму управління. Вихідні сигнали датчиків унаслідок їх різної фізичної природи можуть потребувати посилення і проміжного перетворення на АЦП або на схемах формувачів сигналів (ФС), які найчастіше виконують функції гальванічної розв'язки і формування рівнів двійкових сигналів стандарту ТТЛ. Мікроконтролер з необхідною періодичністю оновлює слова, що управляють, на своїх вихідних портах. Деяка частина слова, що управляє, може інтерпретуватися як сукупність прямих двійкових сигналів управління (СУ), які через схеми формувачів сигналів, (підсилювачі потужності, реле, оптрони і т.ін.) або пристрої зв'язку з об'єктом (ПЗО1–ПЗО4) поступають на виконавчі механізми (ВМ). Компаратори К1–К4 є паралельним апаратним контуром для захисту від аварійних режимів. ПЗО1–ПЗО4 є підсилювачами потужності, які управляють виконавчими пристроями ВМ силової установки.

Мікропроцесор для описаної вище системи вибирається виходячи з характеру досліджуваних процесів і умов досліджень:

- швидкості протікання процесів;
- кількості досліджуваних параметрів і частоти опиту датчиків;
- завдань по переробці інформації;
- умов експлуатації і вимог по надійності.

Аналіз вихідних даних цього завдання показує, що його рішення може бути здійснено на базі мікроконтролера серії МК51.

Система на базі цього мікроконтролера здатна опитувати датчики з частотою 100 мкс, тобто за час відключення запобіжника $t_{відк} \leq 10$ мкс система встигне опитати датчики 100 разів, чого цілком достатньо для зняття і побудови характеристик запобіжника з необхідною точністю.

Найбільш прийнятним для дослідження характеристик швидкодіючих запобіжників і автоматичних вимикачів є мікроконтролер типу МК1816BE51, що

має наступні технічні показники: тип – паралельний; розрядність паралельно оброблюваної інформації – 8 розрядів; форма представлення чисел – двійковий додатковий код; методи адресації – регістрова, пряма, непряма-регістрова безпосередня; одиниця, що адресується, – байт; кількість команд – 111, включаючи команди арифметичних і логічних операцій, стекових операцій, складання слів двійкової довжини, операції управління; формат команд – однобайтна, двобайтова, трибайтна; час виконання команд – 1-4 мкс; 32 РОН і набір регістрів спеціальних функцій; 128 визначуваних користувачем програмно-керованих прапорів; послідовний інтерфейс; чотири 8-розрядні програмовані канали вводу-виводу; два 16-бітові багаторежимні таймери/лічильники; система переривання з п'ятьма векторами і двома рівнями з програмною установкою пріоритету; місткість внутрішнього ОЗП – 128 байтів, ПЗП – 4 кбайта.

Діалог з МК здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу RS-232C через ПЕОМ або пульт управління.

Важливою особливістю арифметико-логічного пристрою (АЛП) мікроконтролера сімейства МК51 є його здатність оперувати не тільки байтами, але і бітами. Окремі програмно-доступні біти можуть бути встановлені, скинуті, інвертовані, передані, перевірені і використані в логічних операціях. Це дозволяє при керуванні об'єктами часто застосовувати алгоритми, що містять операції над вхідними і вихідними булевими змінними. АЛП являє собою паралельний 8-розрядний пристрій, що забезпечує виконання арифметичних і логічних операцій, а також операцій зсуву, обнуління тощо. АЛП може оперувати чотирма типами інформаційних об'єктів: булевими (біт), цифровими (4 біта), байтними (8 біт) і адресними (16 біт). У АЛП виконується 51 різна операція пересилки або перетворення цих даних. Оскільки використовується 11 режимів адресації (7 для даних і 4 для адрес), то шляхом комбінування «операція/режим адресація» базове число команд 111 розширюється до 255. В АЛП реалізується механізм каскадового виконання простих операцій для реалізації складних команд, наприклад таких як команда умовної передачі управління за результатами порівняння.

В ряді випадків, коли фізичні процеси при відключенні аварійних струмів вельми короткочасні і мають тривалість від 0,01 до 10 мс, а кількість контрольованих параметрів (датчиків) більше 6 з кількістю опитувань не менше тисячі за період, запропонована вище схема не забезпечує ефективне вирішення цих задач. Вирішити такі завдання і скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, знизити їх вартість дозволяє розроблений на базі МК MSP430 F16 мікроконтролерний лабораторний стенд, що розглянутий нижче.

Розробка схем лабораторних стендів на базі мікроконтролера MSP430. Аналіз вихідних даних цього завдання показує що його розв'язання може бути здійснене на базі високопродуктивного з наднизькою енергоспоживаністю мікроконтролера MSP430. Найбільш прийнятним для дослідження характеристик ЕА і електромеханічних систем є мікроконтролер типу MSP430 F16. На базі цього мікроконтролера до-

цільно розробити програмно-налагоджувальний стенд, призначений для моделювання і відладки мікропроцесорних пристроїв.

Для того щоб скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, понизити їх вартість пропонується при розробці автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень (АСК ТПД) електричних апаратів (ЕА) і електромеханічних систем застосувати програмно-налагоджувальний стенд, виконаний на базі однокристального мікроконтролера MSP430 F16.

Для цього пропонується застосувати зображену на рис. 3 вдосконалену принципову схему для комутаційних досліджень граничної комутаційної здатності електричних апаратів на постійному струмі із застосуванням вимірювального блока HCPL788J і стенда «MSP430».

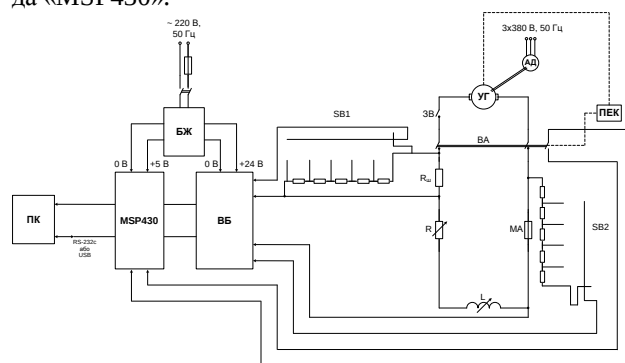


Рис. 3 – Принципова схема установки для комутаційних досліджень на постійному струмі із застосуванням стенду «MSP430»

Головне коло установки складає ударний генератор (УГ) ($U_n = 880$ В, $I_{уд} = 70$ кА), регульовані реактори L, регульований опір R, захисний вимикач (ЗВ), вмикаючий апарат (ВА), макет апарата (МА). Проведення досліджень здійснюється за допомогою пульта електронного керування (ПЕК), мікроконтролера та вимірювального блока, куди з перемикачів SB1 і SB2 подаються сигнали масштабованих струму та напруги.

Необхідні параметри з вимірювального блока подаються в мікроконтролер, а потім, через RS-232C надходять до комп'ютера.

Напруга до лабораторного стенду та вимірювального блока (рис. 5) подається з блока живлення (БЖ), який є гальванічно розв'язаним і видає вимірювальному блоку напругу 24 В, а лабораторному стенду 12 В і 5 В.

На рис. 4 наведено вдосконалену принципову схему для комутаційних досліджень граничної комутаційної здатності електричних апаратів (ЕА) на змінному струмі із застосуванням мікроконтролера MSP430 та вимірювального блока HCPL788J.

Сигнали з силової схеми надходять до вимірювального блока, а з нього необхідні параметри подаються в мікроконтролер, а потім, через RS-232C надходять до комп'ютера.

Цей варіант стенду має цілий ряд переваг над своїм попередником. Він повинен скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, знизити їх вартість. Зниження ва-

рності досягається завдяки заміні вимірювальних трансформаторів струму та напруги на сучасний вимірювальний блок на базі мікросхеми HCPL788J та програмно – налагоджувального стенду «MSP430».

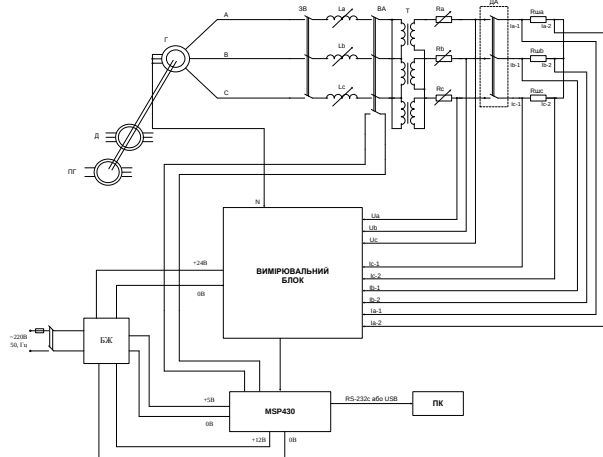


Рис. 4 – Принципова електрична схема установки для комутаційних досліджень на змінному струмі із застосуванням стенду «MSP430»

Схема вимірювального блока HCPL788J зображена на рис. 5. Він має 3 входи по напрузі і дозволяє вимірювати напругу в діапазоні від +750 В до -750 В і 3 входи для вимірювання струму як змінного так і постійного за допомогою безіндуктивних шунтів. Рекомендований діапазон напруги яка знімається з шунтів при вимірюванні струму знаходиться від +200 мВ до -200 мВ. Максимальне значення діапазону напруги з урахуванням нелінійності коефіцієнта передачі

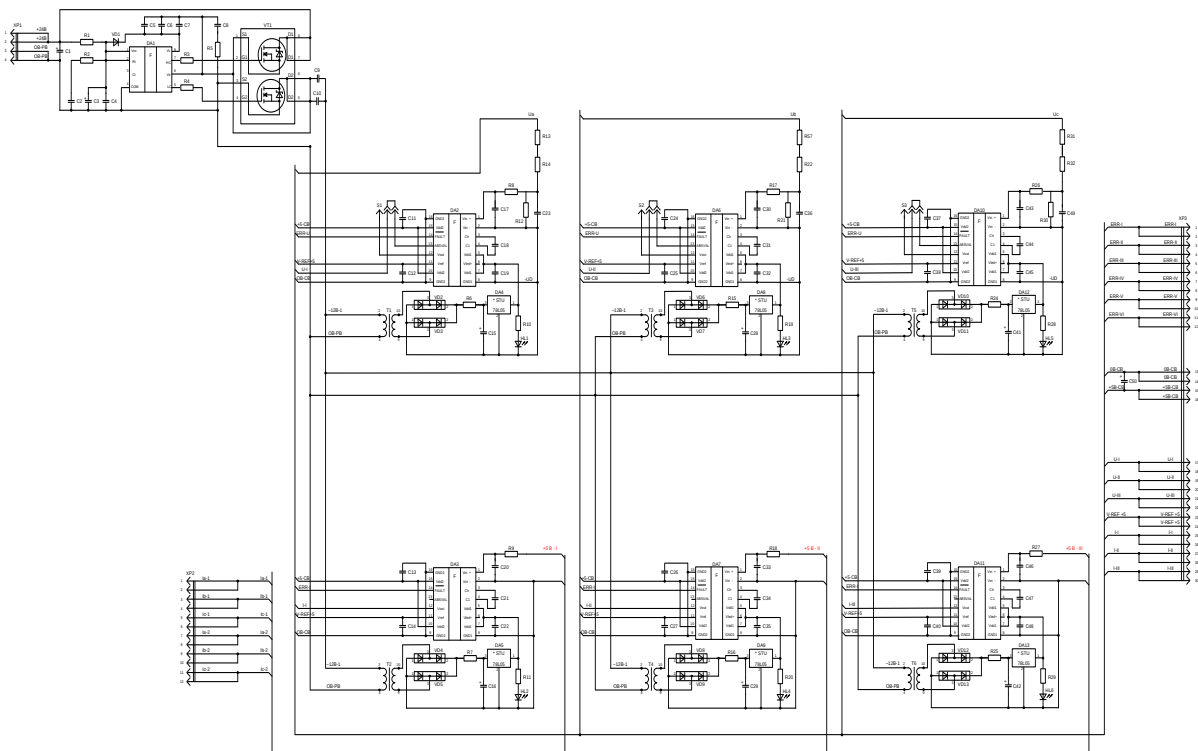


Рис. 5 – Принципова електрична схема вимірювального блоку на базі мікросхеми HCPL788J

Мікроконтролери сімейства MSP430 містять 16-розрядне RISC CPU, периферійні модулі й гнучку систему тактування, з'єднані через фон-нейманівську загальну адресну шину (MAB) пам'яті й шину пам'яті

HCPL788J може досягати від +250 мВ до -250 мВ. Вимірювальний блок HCPL788J має операційні підсилювачі і гальванічну розв'язку. Аналоговий сигнал з шунта або з дільника напруги поступає на АЦП з послідовним кодом, який перетворює його в його послідовний двійковий код і передає через оптрони, що забезпечують гальванічну розв'язку, на ЦАП, який перетворює двійковий код в аналоговий сигнал (напругу).

В подальшому цей сигнал поступає на мікроконтролер MSP430 і після обробки за заданим алгоритмом і програмою передається через послідовний порт RS-232C до комп'ютера. У випадку, коли при обробці результатів мікроконтролером виявиться, що струм або напруга набули аварійних величин, мікроконтролер видає сигнал на відключення дослідної установки.

Вибір мікроконтролера. Обґрунтування вибору мікроконтролера для АСКТПД для комутаційних досліджень запобіжників проводиться з урахуванням характеру досліджуваних процесів і умов досліджень: швидкості протікання процесів; кількості досліджуваних параметрів і частоти опитування датчиків; завдань по переробці інформації; умов експлуатації і вимог по надійності та енергоспоживанню. Аналіз вихідних даних цього завдання показує що його розв'язання може бути здійснене на базі мікроконтролера фірми Texas Instruments. Найбільш прийнятним для дослідження характеристик апаратів захисту є мікроконтролер типу MSP430 F16, архітектура якого зображена на рис. 6 [3].

даних (MDB). Поєднуючи сучасне CPU з відображуваними в пам'яті аналоговими й цифровими периферійними пристроями, сімейство MSP430 пропонує рішення для додатків зі змішаними сигналами.

Сімейство MSP430 має наступні ключові особливості:

Архітектура з ультранизьким споживанням, що збільшує час роботи при живленні від батарей:

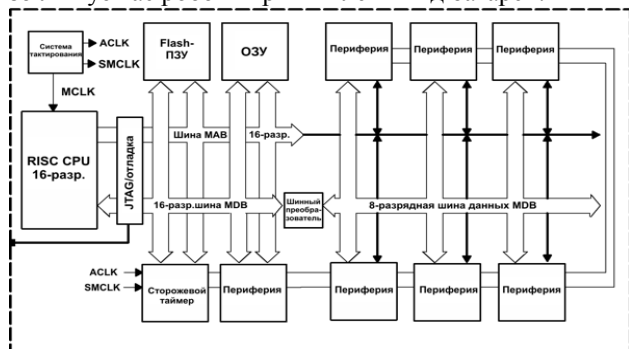


Рис. 6 – Архітектура MSP430

– для збереження вмісту ОЗП необхідний струм не більше 0,1 мкА;

– модуль тактування реального часу споживає 0,8 мкА;

– струм споживання при максимальній продуктивності становить 250 мкА.

Високоякісна аналогова периферія для виконання точних вимірів:

– убудовані модулі 12-розрядною або 10-розрядною АЦП швидкістю 200 ksp/s;

– температурний датчик і джерело опорної напруги VRef; здвоєний 12-розрядний ЦАП; таймери, керовані компаратором для виміру резистивних елементів; схема спостереження (супервізор) за напругою живлення;

16-розрядне RISC CPU, що допускає нові додатки до фрагментів коду:

– великий регістровий файл знімає проблему «вузького файлового горлечка»;

– компактне ядро має знижене енергоспоживання й вартість;

– оптимізовано для сучасного високорівневого програмування;

– набір команд складається з 27 інструкцій, підтримується сім режимів адресації; має розширені можливості векторних переривань.

Можливість внутрішнього схемного програмування Flash-пам'яті дозволяє гнучко змінювати й оновлювати програмний код, робити реєстрацію даних. Більш детально архітектура і система команд викладені в [3].

Розробка алгоритмів роботи. Робота схеми здійснюється по алгоритму і програмі у відповідності до технологічного процесу проведення досліджень швидкодіючих запобіжників.

Алгоритм роботи схеми лабораторного стенду наведений на рис. 7. Він забезпечує опитування датчиків і передачу інформації в РС. На початку алгоритму виробляється установка вихідного стану всіх керуючих сигналів. У головному циклі алгоритму (2-16) виробляється програмування портів, включення аналогового комутатора, встановлюється лічильник параметрів. У внутрішньому циклі відбувається запуск АЦП і зчитування коду (8-13), з наступним обчисленням параметра (14). Потім відбувається налаштування зв'язку з РС (17), і передача масиву отриманих даних

у РС. У випадку, коли $P > P_{\text{доп}}$, контролер видає сигнали на логічні елементи «АБО», пов'язані з ПЗО1–ПЗО3, які забезпечують керування об'єктом досліджень. Крім того, при виникненні аварійної ситуації ($P > P_{\text{доп}}$), сигнал іде з підсилювачів на компаратори і після порівняння з $U1$ – $U3$ подається на елементи «АБО», які видають на ПЗО імпульси для відключення всієї установки.

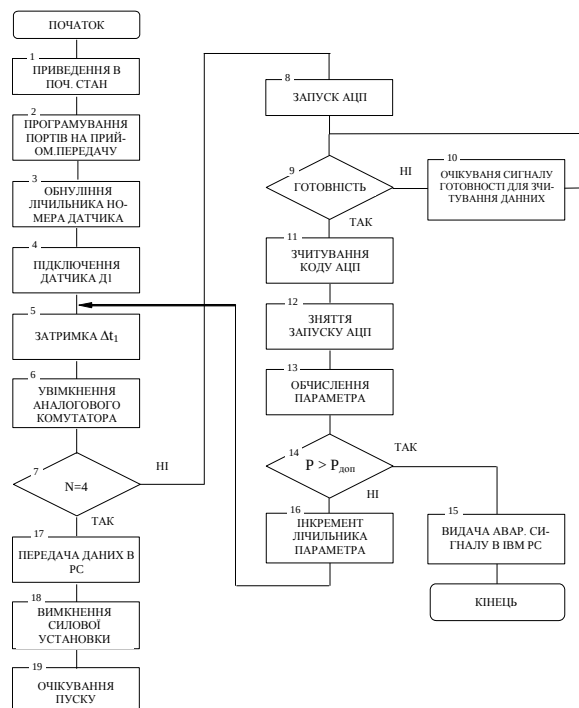


Рис. 7 – Алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування технологічним процесом дослідження швидкодіючих запобіжників

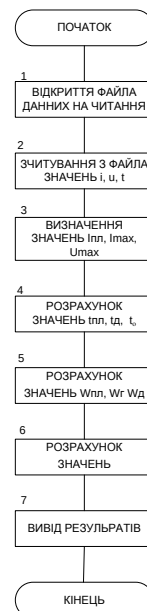


Рис. 8 – Алгоритм програми обробки даних, отриманих у результаті досліджень швидкодіючих запобіжників

Роль компараторів виконує блок цифро – аналогового перетворення. Установка опорних напруг $U1$ – $U3$ здійснюється резисторами $R1$ – $R3$. При цьому використовується внутрішнє джерело опорної напруги UREF мікросхеми МК Atmega16. При аварії МК пере-

ходить у режим переривання, виконання основної програми припиняється й МК видає повідомлення про аварійну ситуацію в РС (15).

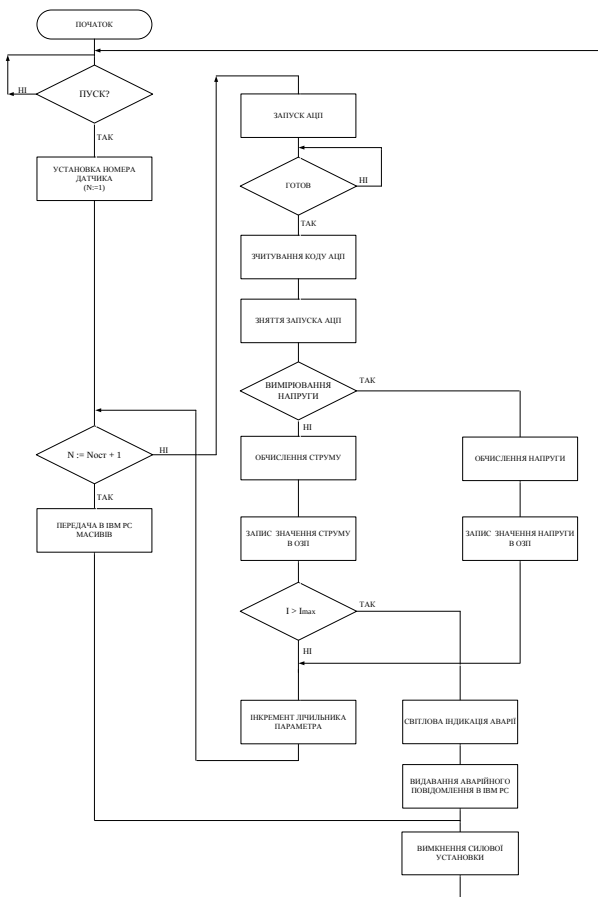


Рис. 9 – Алгоритм роботи лабораторного стенду на змінному струмі для комутаційних досліджень електричних апаратів

Після передачі даних у комп'ютер (17), вони обробляються відповідно до алгоритму, який приведений на рис. 7. Отримані значення даних, при дослідженні, зчитуються з файлу даних (1-2 (рис. 8)). Після чого, за методикою наведеною в [1] розраховуються струм плавлення, максимальні значення струму к.з. і напруги, часи плавлення перешийка, горіння

дуги й відключення струму к.з., інтеграли плавлення, горіння й Джоулев інтеграл, а також значення енергії дуги й середньоінтегральної напруги на дузі (3-6). Результати розрахунків виводяться на екран (7) (рис. 8).

Алгоритм роботи лабораторного стенду на змінному струмі для комутаційних досліджень електричних апаратів захисту представлений на рис. 9.

Висновки. Проведено розробку структурної та принципів електричних схем стендів для досліджень захисних електричних апаратів на постійному та змінному струмів із застосуванням вимірювального блоку на базі *HCPL788J* та мікроконтролерного лабораторного стенду «MSP430».

Розроблено алгоритми роботи схем на постійному та змінному струмах та обробки отриманих результатів.

Розроблені структурні та принципові електричні схеми АСКТПД та алгоритми їх роботи на постійному та змінному струмі дозволяють автоматизувати процес досліджень і випробувань захисних та інших електричних апаратів і електромеханічних систем, скоротити терміни проведення досліджень, фінансові затрати на їх проведення та підвищити достовірність результатів і економічну ефективність.

Список літератури

1. Гришук Ю. С. Основи наукових досліджень: навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 232 с.
2. Гришук Ю. С. Микропроцесорні пристрої: навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 348 с.
3. Семейство микроконтроллеров MSP430x1xx. Руководство пользователя. ЗАО "Компел", 2004. – 368 с.
4. Петин О. В., Щербakov Е. Ф. Испытания электрических аппаратов. – М.: Высш. шк., 1985. – 215 с.

References (transliterated)

1. Hryshchuk Yu. S. *Osnovy naukovykh doslidzhen'* [Basics of the scientific research]. Kharkov: NTU «KhPI», 2008. 232 p.
2. Hryshchuk Yu. S. *Mykroprotsesorni prystroyi* [Microprocessor devices]. Kharkov: NTU «KhPI», 2008. 348 p.
3. *Semeystvo mykrokontrollerov MSP430x1xx*. ZAO "Kompel", 2004. 368 p.
4. Petinov O. V., Shherbakov E. F. *Ispytaniya jelektricheskikh apparatov* [Trials of electric apparatus]. Moscow: Vyssh. shk., 1985. 215 p.

Надійшла (received) 25.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Застосування мікроконтролерів при дослідженнях електричних апаратів / Ю. С. Гришук // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 23-28. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

Применение микроконтроллеров при исследованиях электрических аппаратов / Ю. С. Гришук // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 23-28. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

The use of microcontrollers in studies of electric vehicles / Yu. S. Grischuk // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 23-28. Bibliography: 4. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гришук Юрій Степанович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апаратів, м. Харків; тел.: (057) 707-68-64.

Гришук Юрий Степанович – кандидат технических наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры электрические аппараты, г. Харьков; тел.: (057) 707-68-64.

Grischuk Yuri Stepanovich – Candidate of Engineering Science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of Department of Electrical Apparatus, Kharkiv; tel.: (057) 707-64-27.

УДК 621.318

М. А. ЛЕЛЮК

СТРУКТУРА ТА КІНЕМАТИЧНІ СХЕМИ ВАКУУМНИХ КОНТАКТОРІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

Рассмотрена структура и кинематические схемы вакуумных контакторов. Проведен обзор конструкций и рассмотрен принцип действия вакуумных контакторов средних напряжений иностранных производителей.

Ключевые слова: вакуумный контактор, электромагнит, вакуумный прерыватель.

Розглянута структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів. Проведено огляд конструкцій та розглянутий принцип дії вакуумних контакторів середніх напруг іноземних виробників.

Ключові слова: вакуумний контактор, електромагніт, вакуумний переривник.

The structure and kinematic schemes of vacuum contactors are considered. The review of design is presented and the operation principle of medium voltage vacuum contactors by foreign manufacturers is considered.

Keywords: vacuum contactor solenoid, vacuum interrupter.

Вступ. Для частих комутацій навантаж середніх напруг використовуються вакуумні контактори. За рахунок високої надійності та простоти експлуатації вони зайняли домінуючі позиції серед комутаційних апаратів середніх напруг [1]. Ринок вакуумних контакторів середніх напруг, загалом, представлений іноземними виробниками, що стосується України, то виробництво тут відсутнє і відбувається тільки їх продаж.

Мета роботи – провести огляд існуючих конструкцій та кінематичних схем роботи вакуумних контакторів середніх напруг.

Існуючі моделі вакуумних контакторів світових виробників мають ряд відмінностей, які стосуються як конструкції головних елементів так і вузлів. Для розуміння цих відмінностей пропонується їх класифікувати за ознаками, які приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація вакуумних контакторів

Спосіб встановлення	Стационарний або викатний	
Тип електромагніту	Неполяризований	Поляризований
Вид приводного механізму	Моностабільний	Моностабільний
		Бістабільний
Спосіб керування електромагнітом	Форсований електромеханічний	Мікропроцесорний
Спосіб фіксації у включеному положенні	Механічний	Магнітний

Вакуумні контактори складаються з комутаційного та привідного модулів. Якщо узагальнити структуру вакуумних контакторів, то її можна представити у вигляді, що показаний на рис. 1.

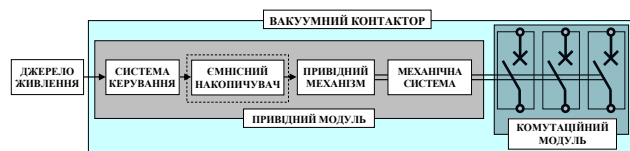


Рис. 1 – Узагальнена структура вакуумних контакторів

Комутаційний модуль складається з трьох полюсів з вакуумними переривниками, а привідний – з привідного механізму, системи керування ним та механічної системи, це найбільш розповсюджений тип контакторів з неполяризованими електромагнітами. Пунктирною лінією позначений елемент, який використовується в контакторах з поляризованими елект-

ромагнітами. Світову монополію на випуск контакторів даного типу утримують за собою Німеччина (ABB, Siemens), Франція (Schneider Electric), Корея (Hyundai, LG, LS). Кінематичні схеми вакуумних контакторів показані на рис. 2.

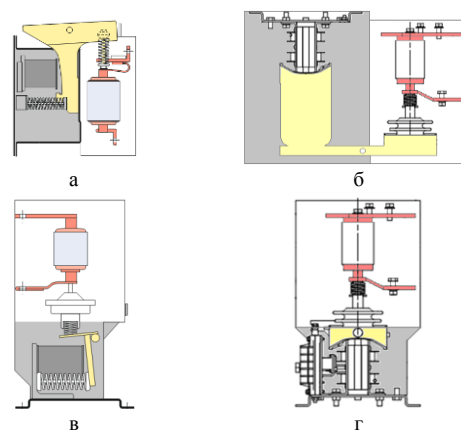


Рис. 2 – Кінематичні схеми вакуумних контакторів

В залежності від того, як розташований привідний модуль, на рис. 2 він позначений сірим кольором, відносно комутаційного, існує кілька типів конструкцій вакуумних контакторів: з розташуванням привідного модуля за комутаційним модулем (рис. 2 а,б) та з розташуванням привідного модуля під комутаційним модулем (рис. 2 в,г), відносно місць фіксації корпусу контактора та положення вакуумних переривників у просторі.

В якості приводу на рис. 2 а,в використовуються поворотні неполяризовані моностабільні електромагніти з поворотною пружиною, а на рис. 2 б,г – прямеходові поляризовані бістабільні електромагніти.

Вакуумні контактори з поворотними неполяризованими моностабільними електромагнітами. Серед виробників даного типу контакторів найбільшим попитом користуються фірми ABB, Siemens, Schneider Electric, Hyundai, LG, LS [2-4]. На рис. 3 показані вакуумні контактори з розташуванням привідного модуля за комутаційним модулем.



Рис. 3 – Вакуумні контактори з розташуванням привідного модуля за комутаційним модулем

Контактори мають однакові конструктивні вузли та елементи. Розглянемо їх на прикладі вакуумного контактора фірми ABB V7 (рис. 4) [2]. На рис. 4 показано: 1 – ізоляційний корпус у вигляді моноблока; 2 – вакуумні переривники; 3 – термінали головних ланцюгів; 4 – поворотний вал; 5 – система керування; 6 – лічильник комутаційних циклів; 7 – контактні пружини; 8 – котушки електромагніту; 9 – допоміжні блок-контакти; 10 – поворотна пружина; 11 – механізм фіксації у включеному положенні (механічна защіпка); 12 – роз'єм ланцюга керування.

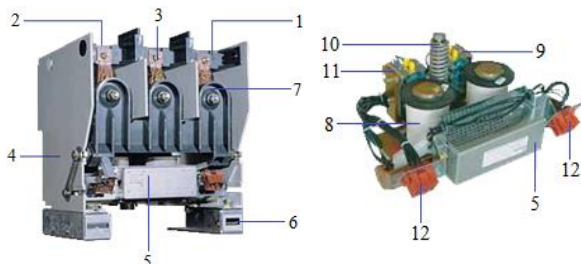


Рис. 4 – Основні вузли та елементи вакуумного контактора фірми ABB V7

На рис. 5 показані вакуумні контактори з розташуванням привідного модуля під комутаційним [3-6].

На прикладі вакуумного контактора Hyundai HCA розглянемо основні вузли та елементи (рис. 6) [5].

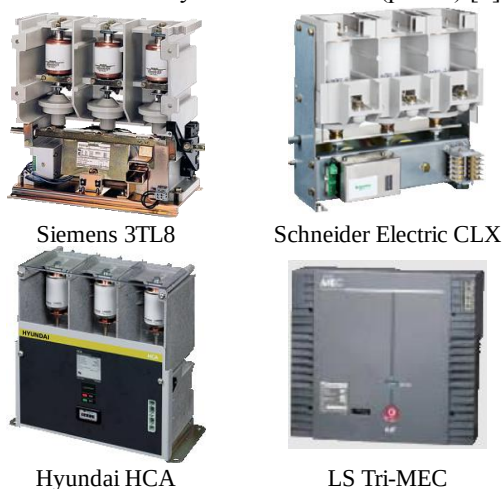


Рис. 5 – Вакуумні контактори з розташуванням привідного модуля під комутаційним

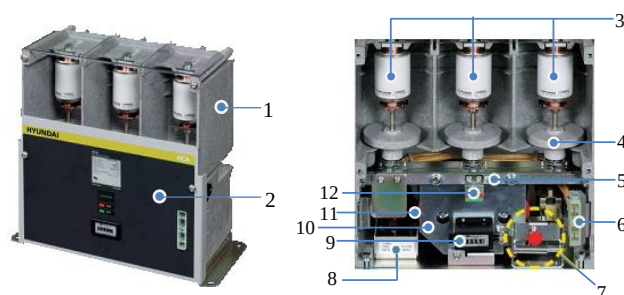


Рис. 6 – Основні вузли та елементи вакуумного контактора Hyundai HCA

На рис. 6 показано: 1 – ізоляційний корпус; 2 – передня панель, що знімається; 3 – вакуумні переривники; 4 – ізолятори; 5 – отвір для ручного включення; 6 – роз'єм ланцюга керування; 7 – механізм фіксації у включеному положенні (жовтою пунктирною лінією позначена кнопка аварійного відключення для контакторів з механічною защіпкою); 8 – система керування; 9 – лічильник комутаційних циклів; 10 – ярмі електромагніту; 11 – котушки електромагніту; 12 – індикатор стану контактів.

Принцип дії контакторів полягає в наступному: при подачі напруги на котушки електромагніту ярмі починає притягуватися до сердечника стискаючи при цьому поворотну пружину та замикаючи головні контакти вакуумних переривників. Для підтримки контактів в замкненому положенні необхідно, щоб котушки електромагніту постійно знаходилися під напругою. При знеструмленні електромагніту, за рахунок поворотної пружини, ярмі починає рухатися у зворотному напрямку розмикаючи головні контакти. В даному випадку використовується неполяризований моностабільний електромагніт. Наявність механічної защіпки дає можливість утримувати механізм у включеному стані при знеструмленні котушки електромагніту, в цьому випадку електромагніт стає бістабільним.

Недоліками даних конструкцій є те, що для підтримання контактора у включеному стані необхідне постійне живлення котушок електромагніту, а використання механічної защіпки ускладнює конструкцію контактора.

Вакуумні контактори з прямоходовими поляризованими електромагнітами. Даний тип контакторів випускаються фірмою ABB [7]. Конструкції контакторів існує дві: з розташуванням привідного модуля за комутаційним модулем VSC 3 (рис. 7, а) та з розташуванням привідного модуля під комутаційним (рис. 7, б). На рис. 7 показано: 1 – місце розташування терміналів головних кіл; 2 – місце розташування вакуумних переривників; 3 – ізоляційний корпус у вигляді штампованого моноблока; 4 – поляризований бістабільний електромагніт; 5 – мікропроцесорний пристрій керування електромагнітним приводом; 6 – привідний ричаг; 7 – ємнісний накопичувач енергії; 8 – блок допоміжних контактів; 9 – індикатор положення головних контактів; 10 – вал ручного аварійного розмикання головних контактів.

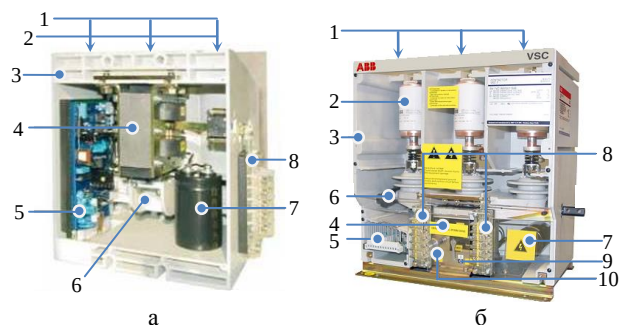


Рис. 7 – Основні вузли та елементи вакуумних контакторів ABB VSC 3 (а) VSC 7 (б)

Принцип дії контакторів полягає в наступному: при подачі напруги з емісного накопичувача енергії на котушку включення ярів переміщується в верхнє положення замикаючі головні контакти вакуумних переривників. За рахунок використання постійних магнітів ярів утримується в цьому положенні, причому котушки електромагніту знеструмлені. Для переведення контактора у відключене положення необхідно подати напругу на котушку відключення, при цьому яр починає рухатися вниз, розмикаючи головні контакти. В цьому положенні яр так само утримується постійними магнітами при знеструмленні котушок. Електромагніт має два положення спокою та називається бістабільним. Керування ним здійснюється мікропроцесорною системою.

Недоліками даних конструкцій контакторів є використання поляризованого бістабільного електромагнітного приводу з двома котушками (вмикання та вимикання) які розташовані одна над одною, що збільшує габарити приводу та контактора в цілому.

Висновки. Розглянута структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів. Проведено огляд конструкцій та розглянутий принцип дії вакуумних контакторів середніх напруг іноземних виробників. В якості електромагнітного приводу в цих контакторах використовуються неполяризовані моностабільні та поляризовані бістабільні електромагніти. Виявлено ряд

недоліків, які стосуються конструкцій цих електромагнітів.

Серед розглянутих конструкцій вакуумних контакторів відсутні контактори з поляризованими моностабільними електромагнітами та поворотними пружинами, які б змогли усунути ці недоліки.

Список литературы

1. Лелюк М.А. Современный стан рынка вакуумных контакторов среднего напряжения / Лелюк М.А. // Информационные технологии: наука, техника, технология, освіта, здоров'я: XXIV міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2016), 18-20 травня: тези доп./ Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – С. 103.
2. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
3. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
4. Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and withdrawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-electric.com.
5. U-Series Вакуумный контактор среднего напряжения. www.hyundai-elec.com.
6. Tri-MEC LS Вакуумные контакторы среднего напряжения. Электрооборудование. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
7. Medium voltage products V-Contact VSC. Вакуумные контакторы среднего напряжения. Technical catalogue 2015. www.abb.com.

Bibliography (transliterated)

1. Leliuk M.A. Suchasnyy stan rynku vakuumnykh kontaktoriv seredn'oyi napruhy. Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: KhKhIV mizhn. nauk.-praktynchna konf. (microCAD-2016), 18-20 travnya: tezy dop. Kharkiv: NTU «KhPI». 2016. P. 103.
2. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
3. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
4. Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and withdrawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-electric.com.
5. U-Series Вакуумный контактор среднего напряжения. www.hyundai-elec.com.
6. Tri-MEC LS Вакуумные контакторы среднего напряжения. Электрооборудование. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
7. Medium voltage products V-Contact VSC. Вакуумные контакторы среднего напряжения. Technical catalogue 2015. www.abb.com.

Надійшло (received) 23.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів середньої напруги / М. А. Лелюк // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 29-31. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Структура и кинематические схемы вакуумных контакторов среднего напряжения / Н. А. Лелюк // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 29-31. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Structure and kinematic scheme of medium voltage vacuum contactors / M. A. Leliuk // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 29-31. Bibliography: 7. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лелюк Микола Анатолійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач навчальної лабораторії кафедри «Електричні апарати», м. Харків, тел.: (067) 968-76-90; e-mail: Lelyuk.nik@gmail.com.

Лелюк Николай Анатольевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий учебной лабораторией кафедры «Электрические аппараты», г. Харьков, тел.: (067) 968-76-90; e-mail: Lelyuk.nik@gmail.com.

Leliuk Mykola Anatoliyovych – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Head of educational laboratory at the Department of Electrical Apparatus, Kharkov, tel. (067) 968-76-90; e-mail: Lelyuk.nik@gmail.com.

УДК 621.3

М. Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю. В. ГУРЕНЦОВ

СКІНЧЕНЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ІНДУКЦІЙНОЇ КУХОННОЇ ПЛИТИ

З використанням пакета програм EleFAnT2D, розробленого в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія, виконано комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів в побутових індукційних плитах різних конструкцій. Розрахунок електромагнітного поля виконується у двовимірній постановці методом скінчених елементів з використанням векторного магнітного потенціалу. Досліджено вплив ряду факторів (геометрія індукторної системи, частота струму в індукторі) на розподіл електромагнітного поля та вихрових струмів у конструктивних елементах плит і посуді, що нагрівається. Уточнені результати інженерного розрахунку індукторів плит різних конструкцій за методикою, запропонованою раніше.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, електромагнітне поле, комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів.

С использованием пакета программ EleFAnT2D, разработанного в Институте основ и теории электротехники Технического университета г. Грац, Австрия, выполнено компьютерное моделирование электромагнитных процессов в бытовых индукционных плитах различных конструкций. Расчет электромагнитного поля выполняется в двухмерной постановке методом конечных элементов с использованием векторного магнитного потенциала. Исследование влияния ряда факторов (геометрия индукторной системы, частота тока в индукторе) на распределение электромагнитного поля и вихревых токов в конструктивных элементах плит и нагреваемой посуде. Уточнены результаты инженерного расчета индукторов плит различных конструкций по предложенной ранее методике.

Ключевые слова: индукционная кухонная плита, электромагнитное поле, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Using EleFAnT2D code developed at the Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria computer modeling of electromagnetic processes in various designs of induction cookers is carried out. Electromagnetic field calculation is carried out in 2D formulation by the Finite Element Method using a magnetic vector potential. Influence of a number of factors (geometry of the inductor system, frequency of current in the inductor) on the electromagnetic field and eddy current distributions in the induction cookers' structural parts and dishes is investigated. Results of engineering calculation of various induction cookers' inductors by the technique proposed earlier are corrected.

Key words: induction cooker, electromagnetic field, computer simulation, the Finite Element Method.

Вступ. В роботі [1] авторами розроблено та апробовано інженерну методику розрахунку та проектування основного конструктивного елементу індукційної кухонної плити – індуктору (плоскої одновиткової або багатовиткової котушки, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке індуктує в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається). Основні результати розрахунку індуктора (геометрія, електричні та енергетичні величини, кількість витків) повинні бути перевірені та уточнені шляхом комп'ютерного моделювання розподілу електромагнітного поля індукційної плити в процесі її роботи. Авторами запропонована математична модель та методика чисельного аналізу електромагнітних процесів в індукційних плитах методом скінчених елементів [2]. Чисельні дослідження розподілу електромагнітного поля індукційних кухонних плит розпочато під час переддипломної практики студентів кафедри "Електричні апарати" Електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ" в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія з використанням пакета програм EleFAnT2D [3], розробленого у зазначеному Інституті. Виконання розрахунків продовжується на кафедрі "Електричні апарати" Національного технічного університету "ХПІ" за допомогою вказаного програмного забезпечення, люб'язно наданого розробниками. В даній роботі описано та проаналізовано отримані попередні результати комп'ютерного моделювання, що демонструють область використання та можливості розробленої методики.

Мета роботи – апробація розробленої методики комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів в індукційних кухонних плитах методом скінчених елементів, попередній аналіз отриманих чисель-

них результатів, уточнення результатів інженерного розрахунку індукторів плит різних конструкцій.

Математична модель електромагнітних процесів в індукційних плитах детально описана в [2]. Чисельний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити виконується у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів) у декартовій системі координат. Розрахунок електромагнітного поля доцільно виконувати з використанням векторного магнітного потенціалу A , який має лише одну просторову компоненту $A(x,y,t) = A_z(x,y,t)$. При цьому робиться припущення, що вектор щільності струмів провідності J також має лише одну відповідну компоненту, тобто електричний струм у конструкції протікає у напрямку, перпендикулярному перетину конструкції, що розглядається. Оскільки при математичному моделюванні електромагнітного поля в індукційних кухонних плитах розглядається сталий режим роботи плити (струм та електромагнітне поле змінюються у часі за гармонійним законом), розв'язується наступне рівняння у часткових похідних у комплексній формі [2, 4]:

$$j\omega\gamma\dot{A} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial\dot{A}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial\dot{A}}{\partial y}\right) + J_0, \quad (1)$$

де μ – магнітна проникність матеріалу;

γ – питома електрична провідність матеріалу,

j – уявна одиниця;

$\omega=2\pi f$ – кругова частота;

f – частота струму в індукторі індукційної плити,

J_0 – щільність струму стороннього джерела.

Рівняння (1) розв'язується з метою розрахунку просторового розподілу електромагнітного поля у так званій індукторній системі індукційної кухонної плити.

ти, яка схематично зображена на рис. 1 та за аналогією з промисловими індукційними нагрівачами складається з наступних конструктивних елементів [2]:

- одновитковий або багатовитковий плоский індуктор 1 (на рис. 1 в якості приклада зображено одновитковий індуктор);
- посуд, що нагрівається, 2;
- магнітопровід 3;
- діелектрик (повітря) 4;
- штучна віддалена границя 5 у діелектрику (повітрі), на якій задано нульові граничні умови для векторного магнітного потенціалу.

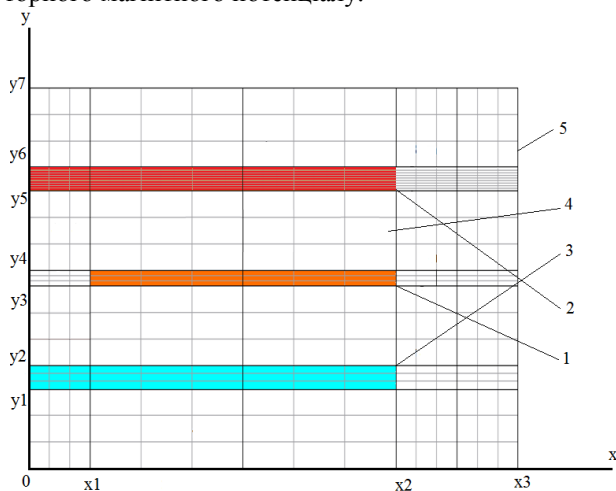


Рис. 1 – Спрощена розрахункова модель індукторної системи побутової індукційної плити

Спрощена розрахункова область, зображена на рис. 1, побудована з урахуванням наявної геометричної симетрії конструкції, а також симетричного розподілу електромагнітного поля в ній: віссю симетрії є вертикальна вісь ординат Oy , отже розрахунок виконується лише для половини індукторної системи, що дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати, необхідні для комп'ютерного розв'язання задачі.

Рівняння у часткових похідних (1) розв'язується з відповідними граничними умовами, детально описаними в [2]. Для виконання розрахунків у вихідних даних задається наступна інформація:

1) геометричні розміри половини конструкції індукторної системи індукційної кухонної плити x_1 , x_2 та y_1 – y_6 (див. рис. 1).

2) величини питомої електричної провідності у провідникових матеріалів, з яких виготовлено індуктор 1, посуд 2 та магнітопровід 3 (див. рис. 1)

3) магнітні властивості феромагнітних матеріалів, з яких виготовляють посуд 2 та магнітопровід 3

4) величина амплітуди щільності струму та частота струму в індукторі 1.

Розрахунки виконуються за допомогою програмного комплексу EleFAnT2D [3], розробленого в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія. Можливо також використання інших програмних продуктів, призначених для розрахунку електромагнітних полів у двовимірній постановці (наприклад, [5]).

Результати розрахунків і їх попередній аналіз. Комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів в індукційних кухонних плитах розпочато з розг-

ляду традиційної конструкції індукторної системи, розрахункова модель якої зображена на рис. 2. Розрахункова область, що розглядається, включає в себе:

- одновитковий або багатовитковий плоский індуктор (на рис. 2 в якості приклада зображено двовитковий індуктор), виготовлений з міді
- посуд, що нагрівається (сковорода з феромагнітної магнітом'якої сталі)
- феритовий магнітопровід
- діелектричні підобласті
- штучна віддалена границя у діелектрику (повітрі), на якій задано нульові граничні умови для векторного магнітного потенціалу.

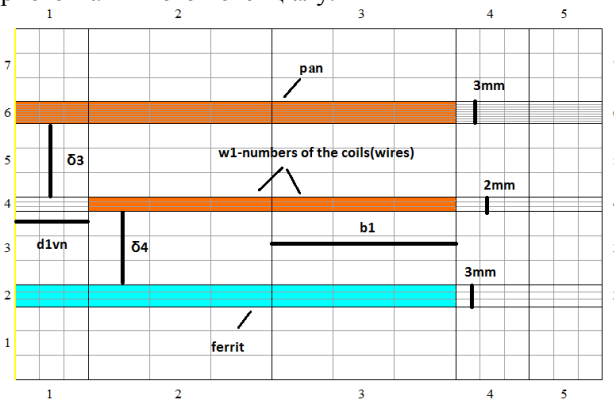


Рис. 2 – Розрахункова модель традиційної індукторної системи побутової індукційної плити

Метою комп'ютерного моделювання є перевірка та уточнення результатів, отриманих з використанням інженерної методики розрахунку та проектування індукторів індукційних кухонних плит, розробленої раніше [1]. Вихідні дані для виконання досліджень наведені в табл. 1 [1]. Розрахунки виконуються стосовно до сковорід великого і малого діаметра (24 см і 12 см, відповідно) для мінімальної (20 кГц) і максимальної (100 кГц) частот електромагнітного поля, що використовується в сучасних індукційних кухонних плитах [1]. Відповідно до технічних характеристик індукційних плит, варіюється також потужність, що виділяється в посуді (2,0 кВт і 3,3 кВт), а також температура нагріву посуду (100°C і 280°C). Таким чином, виконується розрахунок двох індукторів (великого і малого діаметру для нагріву відповідного посуду) для застосування або у відповідних одноконфорочних індукційних плитах, або в одній двохконфорочній плиті з конфорками різного діаметру.

Таблиця 1 – Вихідні дані для виконання розрахунків

Номер варіанту	1	2
Діаметр днища посуду d_2 , м	0,12	0,24
Товщина стінки посуду δ_2 , м	0,003	0,004
Питомий електричний опір сталі посуду при 20 °C ρ , Ом·м	$18,9 \cdot 10^{-8}$	$18,9 \cdot 10^{-8}$
Температура нагріву посуду t_2 , °C	100	280
Питомий електричний опір сталі посуду при заданій температурі нагріву посуду ρ_2 , Ом·м	$23,8 \cdot 10^{-8}$	$38,16 \cdot 10^{-8}$
Частота електромагнітного поля f , кГц	100	20
Напруга на індукторі U_1 , В	220	220
Потужність, яка виділяється в посуді P_2 , кВт	2,0	3,3

Виконано багатоваріантні розрахунки розподілу

електромагнітного поля в індукторній системі, що зображена на рис. 2. При цьому варіювались такі параметри, як сила струму в індукторі, його частота, товщина індуктора, сковороди та магнітопровода, кількість витків індуктора w_1 , внутрішній діаметр індуктора $d_{1\text{вн}}$, ширина вітка індуктора b_1 , зазор між індуктором та посудом δ_3 , зазор між індуктором та феритовим магнітопроводом δ_4 (див. рис. 2). Результати комп'ютерного моделювання представлені у вигляді просторового розподілу модулю амплітудного значення індукції магнітного поля B у розрахунковій області, що розглядається (див. рис. 2), а також просторового розподілу вихрових струмів у посуді, що нагрівається, та феритовому магнітопроводі. Приклади розподілів, отриманих в якості чисельних результатів, наведені на рис. 3, 4.

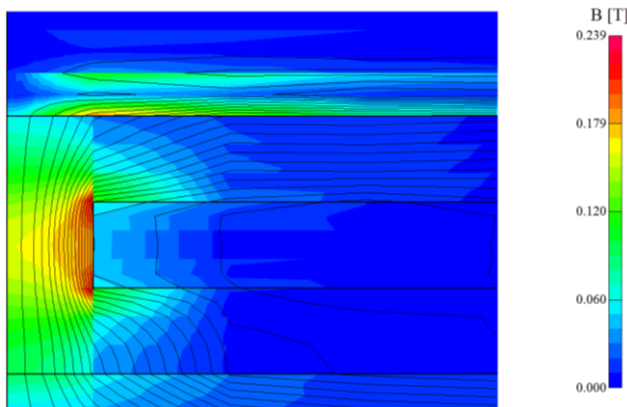


Рис. 3 – Просторовий розподіл індукції магнітного поля для випадку $w_1=3$, $d_{1\text{вн}}=2$ мм, $b_1=19$ мм, $\delta_3=2$ мм, $\delta_4=2$ мм

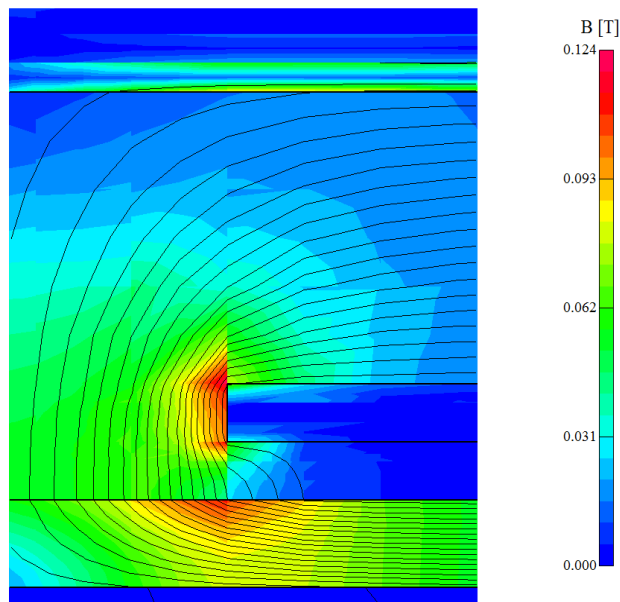


Рис. 4 – Просторовий розподіл індукції магнітного поля для випадку $w_1=3$, $d_{1\text{вн}}=10$ мм, $b_1=16$ мм, $\delta_3=10$ мм, $\delta_4=2$ мм

Аналіз отриманих чисельних результатів дозволив знайти та виправити помилку у величинах сили струму в індукторі та деяких енергетичних величин, розрахованих з використанням інженерної методики розрахунку, запропонованої в [1]. Уточнені результати розрахунку та проектування індукторів індукцій-

них кухонних плит для обох варіантів вихідних даних (див. вище) наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Уточнені результати розрахунків за інженерною методикою

Номер варіанту	1	2
Зовнішній діаметр індуктора $d_{1\text{н}}$, м	0,12	0,24
Внутрішній діаметр індуктора $d_{1\text{вн}}$, м	0,04	0,04
Зазор між індуктором та посудом δ_3 , м	0,01	0,01
Товщина індуктора δ_1 , м	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Питома поверхнева потужність в посуді p_{02} , кВт/м ²	199	75,1
Напруженість магнітного поля на поверхні посуду H_{02} , А/м	$1,55 \cdot 10^4$	$0,99 \cdot 10^4$
Коефіцієнт зв'язку $k_{\text{св}}$	0,235	0,253
Активна потужність в індукторі P_1 , кВт	2,058	1,49
Реактивна потужність в індукторі P_{Q1} , кВАр	2,058	1,49
Реактивна потужність в посуді P_{Q2} , кВАр	1,2	1,98
Реактивна потужність в зазорі P_{Q3} , кВАр	1,968	0,553
Активна потужність системи "індуктор-посуд" P_{Σ} , кВт	0,041	0,048
Реактивна потужність системи "індуктор-посуд" $P_{Q\Sigma}$, кВАр	2,0	0,588
Повна потужність системи "індуктор-посуд" $P_{S\Sigma}$, кВА	2,0	0,59
Електричний ККД η_{Σ}	0,493	0,688
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	0,02	0,08
Струм індуктора I_1 , А	9,09	2,68
Число витків індуктора w_1	2	12
Ширина витка з ізоляцією b_1 , м	0,02	0,0095

На рис. 5 наведено вдосконалену індукторну систему індукційної кухонної плити, що розглядається у подальших чисельних дослідженнях. Розглядаються сучасні сковороди, призначені саме для індукційних кухонних плит, – алюмінієві сковороди, що мають зі сторони індуктору феромагнітний шар, який потрібен для отримання відповідного розподілу електромагнітного поля та вихрових струмів у дніщі сковороди.

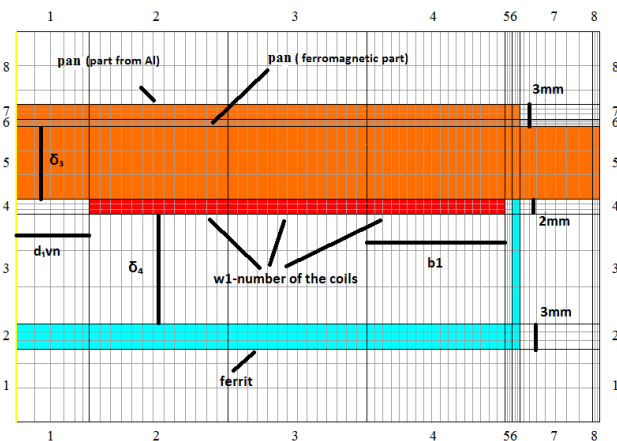


Рис. 5 – Модифікована розрахункова модель індукторної системи побутової індукційної плити

Крім того, феритовий магнітопровід має конструкцію, що дозволяє значно підвищити його екрануючу здат-

ність, отже знизити розсіяння електромагнітного поля індуктора в оточуючий простір з метою підвищення коефіцієнта корисної дії індукційної плити.

Розрахункова область включає в себе (див. рис. 5):

- одновитковий або багатовитковий плоский індуктор (на рис. 5 в якості приклада зображено тривитковий індуктор), виготовлений з міді
- посуд, що нагрівається (алюмінієва сковорода з феромагнітним шаром, див. вище)
- феритовий магнітопровід покращеної конструкції (див. вище)
- діелектричні підобласті
- штучна віддалена границя у діелектрику (повітрі), на якій задано нульові граничні умови для векторного магнітного потенціалу

Досліджувався вплив частоти струму в індукторі на електромагнітні процеси в індукційній плиті та посуді, що нагрівається. Розглядалась індукторна система (див. рис. 5) з параметрами $w_1=3$, $d_{1m}=2$ мм, $b_1=16$ мм, $\delta_3=2$ мм, $\delta_4=2$ мм. Отримані результати розрахунків у вигляді просторового розподілу модулю амплітудного значення індукції магнітного поля B , а також просторового розподілу модулю амплітудної величини щільності вихрових струмів у правій частині сковороди наведено на рис. 6-11.

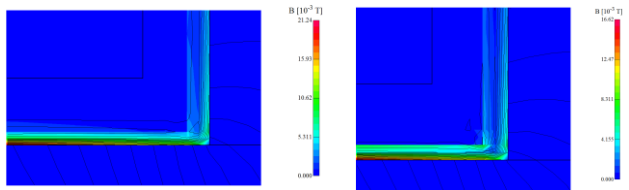


Рис. 6 – Розподіл індукції магнітного поля (частота 20 кГц)

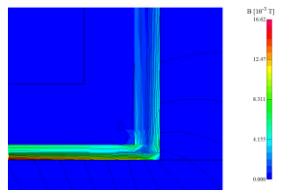


Рис. 7 – Розподіл індукції магнітного поля (частота 50 кГц)

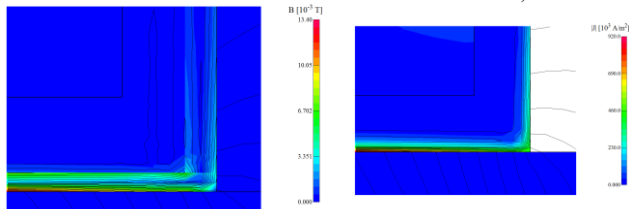


Рис. 8 – Розподіл індукції магнітного поля (частота 100 кГц)

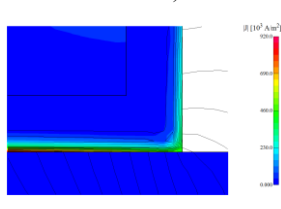


Рис. 9 – Розподіл щільності вихрових струмів (частота 20 кГц)

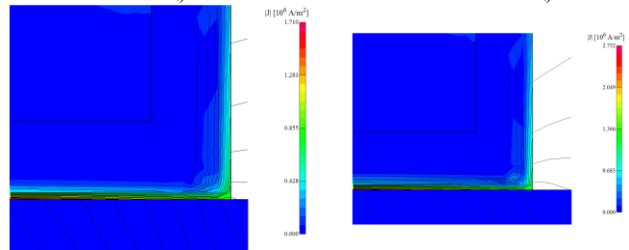


Рис. 10 – Розподіл щільності вихрових струмів (частота 50 кГц)

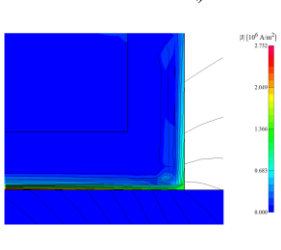


Рис. 11 – Розподіл щільності вихрових струмів (частота 100 кГц)

Аналіз отриманих результатів показує суттєвий прояв явища поверхневого ефекту (скін-ефекту) в процесі нагріву посуду, у відповідності до якого електромагнітне поле та індуквані ним вихрові струми концентруються у тонкому шарі під поверхнею сковороди. З підвищенням частоти електромагнітних

коливань товщина цього шару зменшується і зростає максимальна величина щільності вихрових струмів у посуді. Подальші висновки щодо впливу частоти струму в індукторі на процес нагріву посуду можуть бути зроблені за результатами комп'ютерного моделювання зв'язаних електромагнітних та теплових процесів у індукційних кухонних плитах за розробленою методикою [6, 7].

Висновки. З використанням розробленої раніше методики виконано комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів у двох конструкціях побутових індукційних кухонних плит. Це дозволило уточнити результати інженерного розрахунку індукторів плит різних конструкцій за методикою, запропонованою раніше. Досліджено вплив ряду факторів (геометрія індукторної системи, частота струму в індукторі) на розподіл електромагнітного поля та вихрових струмів у конструктивних елементах плит і посуді, що нагрівається. Детальний аналіз отриманих чисельних результатів буде виконаний у наступних роботах.

Список літератури

1. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В., Трофімов А.В. Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24.
2. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В. Методика комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24.
3. <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.
4. Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с.
5. Pantelyat M.G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals // The European Physical Journal Applied Physics. – 2002. – v. 17. – P. 29-33.
6. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика скінченоеlementного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44.
7. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика мультифізичного аналізу зв'язаних електромагнітних і теплових процесів в індукційній кухонній плиті та посуді, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 42 (1151). – С. 3-7.

Referenses (transliterated)

1. Pantelyat M.H., Hurentsov Yu.V., Trofimov A.V. Metodyka rozrakhunku induktoriv induktsiynykh kukhonnykh plyt. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2014. No 20 (1063). P. 13-24.
2. Pantelyat M.H., Hurentsov Yu.V. Metodyka komp'yuternoho modelyuvannya metodom skinchennykh elementiv rozpodilu elektromagnitnoho polya induktsiynoyi kukhonnoyi plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2014. No 41 (1084). P. 16-24.
3. <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.
4. Demirchyan K.S. Modelyrovanye mahnytnykh poley. L.: Enerhiya, 1974. 288 p.
5. Pantelyat M.G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals. The European Physical Journal Applied Physics. – 2002. – v. 17. – P. 29-33.
6. Pantelyat M.H., Trofimov A.V. Metodyka skinchenoelement-noho analizu teplovoho stanu induktsiynoyi kukhonnoyi plyty ta posudu, shcho nahrivayet'sya. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy

udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2015. No 13 (1122). P. 36-44.

7. *Pantelyat M.H., Trofimov A.V.* Metodyka mul'tyfizychnoho analizu zv'yazanykh elektromahnitnykh i teplovykh protsesiv v induktsiyniy kukhonniy plyti ta posudi, shcho nahrivayet'sya. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennya

elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2015. No 42 (1151). P. 3-7.

Надійшла (received) 01.09.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Скінченоеlementний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити / М. Г. Пантел'ят, Ю. В. Гуренцов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 32-36. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Конечноэлементный анализ распределения электромагнитного поля индукционной кухонной плиты / М. Г. Пантел'ят, Ю. В. Гуренцов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 32-36. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Finite Element analysis of the induction cooker electromagnetic field distribution / M.G. Pantelyat, Ju.V. Gurentsov // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 32-36. Bibliography: 7. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пантел'ят Михайло Гаррійович – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; e-mail: m150462@yahoo.com.

Пантел'ят Михаил Гарриевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры электрические аппараты, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", м. Харьков; e-mail: m150462@yahoo.com.

Pantelyat Michael Garrievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer in electrical equipment, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; e-mail: m150462@yahoo.com.

Гуренцов Юрій Володимирович – студент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків.

Гуренцов Юрий Владимирович – студент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков.

Gurentsov Yury Vladimirovich – student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov;.

Ю. В. РОЙ, В. Ф. РОЙ, М. Г. БУРМА

ГІБРИДНИЙ АПАРАТ ДЛЯ РОЗРЯДНИХ ЛАМП ВИСОКОГО ТИСКУ

З метою підвищення енергоекономічності освітлювальних установок пропонується впровадження малопотужних натрієвих ламп високого тиску, які мають найвищу світлову віддачу серед сучасних розрядних джерел світла і незначний спад світлового потоку при тривалому строку служби. Для забезпечення стабільної роботи ламп тину ДНАТ пропонується схема комбінованого пускорегулювального пристрою, що забезпечує надійне запалення розряду і оптимізацію режимів роботи лампи на протязі усього регламентного строку експлуатації.

Ключові слова: розрядна лампа високого тиску, освітлювальна установка, комбінований пускорегулювальний апарат, генератор імпульсів, стабілізація струму лампи, строк служби.

С целью повышения энергоэкономичности осветительных установок предлагается использование разрядных ламп высокого давления типа ДНАТ мощностью 35-100 Вт, которые являются наиболее эффективными преобразователями электрической энергии в световую. Для обеспечения стабильной работы таких источников света разработана электрическая схема комбинированного пускорегулирующего аппарата, обеспечивающего: надёжное зажигание разряда в лампе, полное отсутствие акустического резонанса и несимметричного разряда, не наблюдается чрезмерного распыления эмиссионного покрытия электродов на колбу лампы, регулирование тока лампы обеспечивает стабильность режима её работу на протяжении всего срока службы.

Ключевые слова: разрядная лампа высокого давления, осветительная установка, комбинированный пускорегулирующий аппарат, генератор импульсов, стабилизация тока лампы, срок службы.

The authors suggest using high pressure high pressure discharge lamps (DNaT-type, high-pressure sodium lamps, 35-100W) in different illumination equipment in order to increase its efficiency and optimize power consumption. Known problem of this solution is low reliability of the lighting and limited lifetime. It is addressed by using brand new combined starting and current control device, which reliably starts the discharge process in the lamp, ensures absence of acoustic resonance and non-symmetric discharge, provides stable illumination, and protects electrodes surface from the extra emission by controlling current. Illumination equipment produced by suggested schedule must be very efficient and reliable devices with long lifetime.

Keywords: high pressure discharge lamp, illumination equipment, combined starting and control device, impulse generator, current amperage stabilization, lifetime extension.

Вступ. Енергоекономічність споживачів електроенергії є нагальною вимогою сьогодення, оскільки це обумовлене не тільки необхідністю всебічної економії електроенергії, але також і з проблемами екології, оскільки зростання споживання електроенергії супроводжується збільшенням спалення копалинних ресурсів і відповідно, шкідливих викидів в навколишнє середовище. Безпосереднє це стосується також і світлотехнічної галузі, яка споживає біля 20% електроенергії, що виробляється в Україні і ця частка має чітку тенденцію до подальшого зростання. Освітлювальні установки (ОУ), окрім вирішення проблеми забезпечення об'єктів ЖКГ і промисловості нормованими рівнями освітлення, широко використовуються також в різних галузях народного господарства в якості елементів технологічного обладнання. Найбільш дієвим засобом підвищення енергоефективності та розширення функціональних можливостей освітлювальних установок є використання енергоекономічних джерел світла (ДС) - розрядних ламп високого тиску в комплекті зі спеціальними пускорегулювальними електричними апаратами (ПРА), що забезпечують надійне запалення розряду та стабілізацію режиму роботи таких ламп. Розрядні лампи типу ДНАТ потужністю 250 ÷ 400 Вт, які мають високу світлову віддачу при тривалому строку служби і характеризуються високою стабільністю світлового потоку на протязі усього строку служби (спад світлового потоку не перевищує 20% за 10000 годин горіння) є найбільш ефективними перетворювачами електричної енергії в світлову і широко використовуються в ОУ зовнішнього освітлення. Вони мають підвищену габаритну яскравість розрядної колби, (світлова віддача таких ламп, досягає 150 лм/Вт), а висхідні при повільній зміні струму вольт-амперні характеристики свідчать, що такі ДС є одними з найбільш перспективних джерел

випромінювання, використання яких дозволить більш ефективно використовувати електроенергію як для освітлення, так і в різноманітних технологічних установках [1]. Тому розширення сфери використання таких джерел випромінювання, зокрема використання РЛ типу ДНАТ потужністю (35 ÷ 150) Вт, що також мають високі світлотехнічні показники і досить широку сферу застосування – від систем загального освітлення, до спеціальних технологічних установок, є актуальним завданням. Для ефективного впровадження таких ДС необхідно вирішити ряд технічних проблем, пов'язаних з особливостями режиму їх роботи і специфікою електродинамічних характеристик, обумовлених дуже малою інерційністю розряду, що на порядок менша, ніж, наприклад, у РЛ низького тиску. Вирішення проблеми застосування малопотужних РЛВТ розглядалось в ряді опублікованих робіт і, незважаючи на деякий прогрес в цьому напрямку, залишається ряд питань, що потребують пошуку відповідних технічних рішень.

Важливою проблемою використання малопотужних РЛВТ, є високий коефіцієнт імпульсу таких ламп, що вимагає спеціального технічного рішення щодо параметрів і режимів роботи пускорегулюючих апаратів. Існуючі електромагнітні ПРА для РЛВТ, що використовуються в комплекті з лампами середньої та високої потужності, містять генератор запалювальних імпульсів амплітудою 1,5-4,5 кВ, який, при погасанні лампи (наприклад, внаслідок зниження напруги живлення) тривалий час (понад 5-7 хвилин) не здатний завдяки насиченню магнітопроводу імпульсного трансформатора перезапалити лампу, доки в ній не відбудеться повна деіонізація розрядного проміжку. Процес запалення розряду в лампи супроводжується суттєвим (в декілька разів) зростанням струму в ланцюгу живлення лампи, що призводить до посиленого

розпилення емісійного покриття електродів і значним (~ до 20%) зменшенням її строку служби. Це супроводжується суттєвим перевантаженням всієї схеми в цілому, що потребує збільшення запасу електричної міцності усіх її елементів. Причиною виникнення такого аномального режиму лампи є наявність розкиду емісійних характеристик електродів, пов'язаних з недосконалістю технології їх виготовлення, що призводить до виникнення несиметричного розряду завдяки перегріву одного з електродів, коли в лампі одночасно існують дуговий та тліючий розряди. Проблемою, що також потребує відповідних технічних рішень є те, що при різких коливаннях напруги живлення навіть у невеликих межах (~5 В/с), напруга згасання лампи зростає до $0,9U_{ном}$, що є неприйнятним з точки зору ефективної роботи сучасних ОУ.

Строк служби РЛВТ пов'язаний з поступовим зростанням напруги на лампі, обумовлений інтенсивністю протікання фізико-хімічних процесів в об'ємі розрядної колби, зменшенням натрію в процесі горіння розряду внаслідок дифузії його через керамічну стінку пальника, та взаємодії з емісійним покриттям електродів. Внаслідок процесу запилення приелектродних ділянок розрядної колби в процесі роботи лампи відбувається зростання температури електродів і всієї оболонки за рахунок зниження її світлопропускання, тому термін роботи таких ламп складає в середньому ≈ 20 тис. годин. Оскільки ці лампи працюють при низьких співвідношеннях $U_L / U_M \approx 0,45 \div 5$, (U_L – напруга на лампі; U_M – напруга живлячої мережі), то вони мають відносно низький коефіцієнт потужності ($\cos \phi$) і великі струми, що, в свою чергу, потребує значних габаритів пускорегулювальних апаратів і використання спеціальних запалюючих пристроїв [2]. У малопотужних РЛВТ, які мають малий діаметр розрядної колби і, відповідно, в них інтенсивніше відбувається явище амбіполярної дифузії, – це призводить до викривлення вольт-амперних характеристик (ВАХ), спотворення форми напруги, збільшення піку перезапалення і зниження ефективності роботи ламп і освітлювальних установок в цілому.

Спостерігається також сильна залежність електричних і світлотехнічних характеристик від напруги мережі, а також значні (до 70 %) пульсації світлового потоку. Це пов'язано з можливістю виникнення так званого "діодного ефекту" при запаленні такої лампи, внаслідок чого пусковий струм може зрости до 5 разів понад номінального, що призведе до інтенсивного розпилення електродів і скорочення її строку служби. Від цього залежить також коефіцієнт імпульсу (відношення піка перезапалення $U_{пз}$ до U_L), який згідно [3, 4] досягає 1,8с2,2, що значно більше, ніж у розрядних ламп типу ДРЛ.

Мета статті і постановка задачі. Кінцевою метою даної роботи було підвищення ефективності та енергоекономічності широкого класу ОУ за рахунок використання енергоефективних джерел світла – малопотужних натрієвих ламп високого тиску. Важливою умовою забезпечення ефективної роботи НЛВТ типа ДНаТ 35-150 Вт є підтримання оптимальних електричних параметрів (напруги живлення, потужності, струму, амплітуди запалюючого імпульсу) лампи на протязі її строку служби у відповідності до Єв-

ропейського стандарту EN 12464-1. Ці вимоги можуть бути забезпечені відповідними параметрами електричної схеми пускорегулювального апарату і її сумісності з параметрами живлячої мережі. Критеріальним фактором, що визначає реальний строк служби НЛВТ, є перехід її в циклічний режим "запалення-погасання" внаслідок зростання напруги на лампі (2-5 В на 1000 годин горіння) до деякої критичної величини – напруги погасання [5]. При цьому, величина напруги перезапалення безпосередньо визначається електродинамічними властивостями позитивного стовпа розряду в лампі, зокрема, ступенем деіонізаційних процесів і температурного режиму електродів. Для надійної роботи лампи і виключення можливості виникнення діодного ефекту необхідно в кожний напівперіод змінної напруги живлення прикладати до електродів напругу $U_{пз}$, достатньою для її перезапалення.

Важливою проблемою є також необхідність стабілізації струму лампи на протязі всього терміну експлуатації, що безпосередньо визначає її строк служби. Одним з напрямком забезпечення найбільш ефективної роботи розрядних ламп високого тиску, є робота їх в комплекті з електронним ПРА, який дозволяє знизити втрати електроенергії і реалізувати ряд додаткових важливих функцій, що підвищують енергоекономічність освітлювальної установки в цілому. Електронні ПРА мають перед електромагнітним суттєві переваги – це, насамперед, стабілізація потужності і світлового потоку, що забезпечує підвищений строк служби лампи; зменшення споживаної електроенергії до 20 %; виключення стробоскопічного ефекту за рахунок відсутності низькочастотних пульсацій світлового потоку, наявність захисту у разі виникнення аварійних режимів (короткого замикання на виході або перегорання лампи); можливість регулювання рівня освітленості робочих приміщень; підвищене коефіцієнта потужності; електромагнітну сумісність з живлячою мережею [6].

Використання пускорегулювальних електронних апаратів, не зважаючи на такі їх переваги перед електромагнітними ПРА, не знайшло широкого застосування завдяки ряду притаманних їм суттєвих недоліків. Зокрема, електронні ПРА мають менший строк служби і надійність, що обумовлено великою кількістю комплектуючих компонентів і меншою стійкістю до перевантажень, особливо до дії підвищеної температури, що не дозволяє розмішувати їх безпосередньо в корпусі світильника. Оскільки електронні ПРА використовують підвищені частоти, виникає проблема "акустичного резонансу" в разі, якщо частота інвертора ПРА співпадає з особистою акустичною резонансною частотою лампи або її конструктивних елементів. При цьому можливе утворення стоячих хвиль в колбі і генерування лампою звука з рівнем гучності до 130 Дб, а також імовірним відривом розрядної колби від комутаційних траверс і руйнуванням колби лампи [7]. Можливо також виникнення явища несиметричного розряду в процесі запалення лампи, обумовлене електричною розбіжністю параметрів електродів, що призводить до аномально високих струмів, які скорочують строк служби лампи завдяки інтенсивному розпиленню емісійного покриття електродів на стінки колби лампи. Це супроводжується підвищенням тем-

пературі прикатодної зони пальника і зниженням світлового потоку лампи внаслідок прискореного запилення колби. Спостерігається також збільшення теплових втрат електроенергії на силових комутаційних елементах інвертора електронного ПРА на підвищених частотах [8].

Вартість електронних ПРА значно перевищує електромагнітні і внаслідок більшої складності, потребує більш високої кваліфікації при монтажі і обслуговуванні. Ефективності застосування електронних і електромагнітних ПРА при роботі з розрядними лампами потужністю більшою за 150 Вт практично не відрізняються. Отже, переваги електронних ПРА значною мірою нівелюються суттєвими проблемами, вирішення яких потребує ще більшого ускладнення функціональної схеми апарату. Оптимальним варіантом забезпечення ефективної роботи комплексу НЛВТ-ПРА є створення комбінованого (гібридного) ПРА, який базується на основі електромагнітного з додатковим електронним блоком, що поєднує простоту і надійність першого з функціональними перевагами електронного.

Матеріали та результати дослідження. Визначальним фактором, який найбільше впливає на строк служби лампи, є підвищення напруги живлячої мережі U_m , що призводить до різкого зростання напруги на лампі U_L [9]. Підвищення U_m значно збільшує теплове навантаження на елементи конструкції лампи, при цьому прискорюється процес втрати натрію в пальнику і зростає градієнт напруги на електродах.

При дослідженні режимів малопотужних ДНаТ використовувалась як стандартна методика при частоті живлення 50 Гц, так і методика заснована на вимірюванні миттєвих величин напруги і струму з подальшим розрахунком діючих значень цих параметрів згідно відомим співвідношенням при живленні напругою підвищеної частоти [10].

$$U_L = \left[\frac{1}{m} \sum_{x=0}^{m-1} u^2(t) \right]^{1/2}; \quad (1)$$

$$I_L = \left[\frac{1}{m} \sum_{x=0}^{m-1} i^2(t) \right]^{1/2}; \quad (2)$$

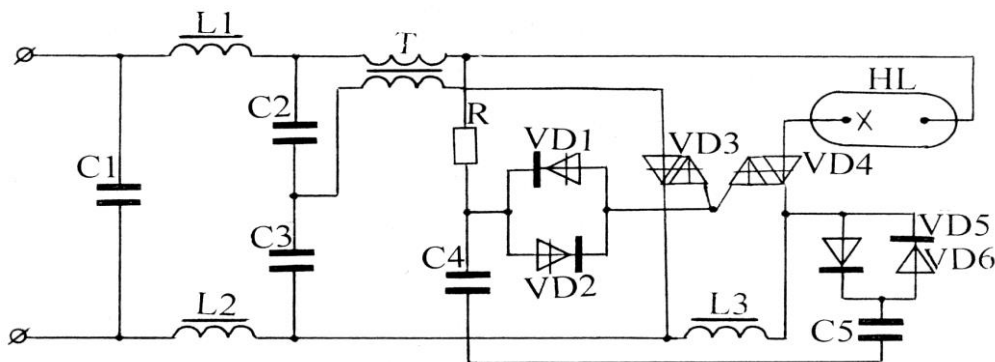


Рис. 1 – Схема комбінованого (гібридного) ПРА для РЛВТ

Принципова електрична схема розробленого нами пускорегулювального апарату для малопотужних РЛВТ містить магнітопровід дроселя (Т) одна з обмоток якого використовується в ланцюгу стабілізації

$$P_L = \sum_{x=0}^{m-1} u(t), i(t), \quad (3)$$

де U_L , I_L , P_L – діючі величини напруги, струму та потужності;

$u(t)$, $i(t)$ – миттєві значення напруги і струму;

m – кількість вимірювань за період.

Вимірювання режимів лампи здійснювалося двохканальним цифровим осцилографом, об'єднаним з робочим комп'ютером, який проводив обробку отриманих даних щодо параметрів U_L , I_L , P_L по заданій програмі, а частоту і амплітуду U_{xx} визначали по осцилограмам. Вплив співвідношення U_{i3}/U_T на граничну величину робочої напруги на лампі визначали із відомого співвідношення [11]:

$$U_L / U_m \leq \sqrt{\frac{2}{\frac{\pi^2}{4} + \left(\frac{U_{i3}}{U_T}\right)^2}}, \quad (4)$$

де U_T – напруга горіння розряду без пауз струму;

U_{i3} – амплітуда імпульсу запалення.

Забезпечення ефективної роботи РЛ типу ДНаТ може бути досягнуто за рахунок розробки схеми комбінованого (гібридного) ПРА, яка об'єднує переваги електронних апаратів та простоту і надійність електромагнітних, що відповідає сучасними вимогами щодо енергоекономічності, а також міжнародним стандартам. Розроблена нами схема комбінованого (гібридного) ПРА для малопотужних РЛВТ (рис. 1) дає змогу забезпечити надійне запалення та перезапалення лампи завдяки примусовому ініціюванню розряду двічі за період синусоїдальної живлячої напруги, що дозволяє усунути виникнення небезпечного аномального режиму, пов'язаного з виникненням "діодного ефекту". Ця проблема вирішується завдяки розташуванню на магнітопроводі стандартного струмостабілізуючого дроселя додаткової маловіткової обмотки, яка є елементом контуру генератора високовольтних запалюючих імпульсів.

струму лампи, а інша – в ланцюгу генератора запалюючих імпульсів, чим досягається підвищена потужність генерованих імпульсів і подача двічі за період напруги живлення запалюючих імпульсів як в пози-

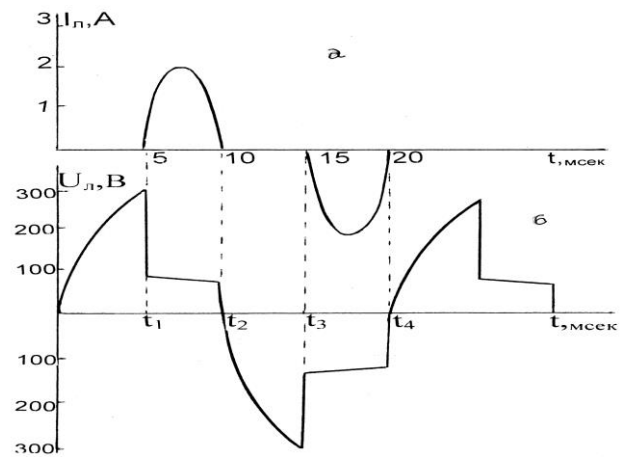
тивний, так і в негативний напівперіод. Генератор високовольтних імпульсів складається з сімистора VD3, в коло навантаження якого ввімкнена первинна обмотка дроселя Т, вторинна обмотка якого виконує роль струмостабілізуючого елементу розрядної лампи HL. Ємнісний дільник C2, C3 обмежує потужність імпульсного генератора до нормованої величини і одночасно, зі вторинною обмоткою дроселя Т, виконує роль мережевого фільтра імпульсних сигналів. Початок роботи генератора високовольтних імпульсів визначається величиною робочої напруги диністорів VD1-VD2. Фільтр C1, L1, L2 – виконує роль другої ступені задавлення імпульсних сигналів в мережі, а елементи R1, C4 забезпечують роботу імпульсного генератора в режим однократного за напівперіод напруги живильної мережі генерування запалюючого імпульсу. В момент ввімкнення напруги живлення на електроди лампи HL з вторинної обмотки дроселя Т подається напруга мережі одночасно з високовольтним запалюючим імпульсом, амплітуда якого

$$U_m = \frac{C2}{C2 + C3} \frac{W2}{W1} \text{ знаходиться в межах } 1,5 \div 4,5 \text{ кВ в}$$

залежності від стану лампи (тут W1, W2 – число витків первинної та вторинної обмоток дроселя). Імпульс запалення на фоні напруги живлення 50 Гц являє собою швидко затухаючі ударно збуджені коливання, частота яких визначається індуктивністю розсіювання та розподіленою ємністю дроселя Т і складає величину ~ 5 кГц. Після запалення розряду в лампі відбувається шунтування її розрядним проміжком ланцюгу генератора імпульсів і він вимикається. У випадку погасання лампи генератор автоматично вмикається і лампа за час порядку ~ 5 с. перезапалюється. Час повторного запалення НЛВТ після 5-ти секундного відключення від мережі живлення складає порядку 10-15 секунд, – тобто фактично відбувається "горяче" перезапалення лампи, що також є особливістю роботи даної схеми, оскільки у існуючих стандартних запалюючих пристроях типу УЗУ процес повторного запалення після погасання лампи триває на протязі 5 ÷ 7 хвилин.

Типові осцилограми сигналів на лампі типу ДНаТ в момент її запалювання і після виходу на робочий режим наведені на рис. 2. Високовольтний імпульс переходу в робочий режим відображає її динамічну вольт-амперну характеристику і визначається значною (порядку 200 В) напругою перезапалення.

Струм лампи після запалення розряду досягає номінального для даного типу НЛВТ величини і на індуктивному елементі L3, який є датчиком струму лампи, з'являється напруга яка пропорційна струму лампи. Стабілізації струму лампи і обмеження її потужності здійснюється за рахунок "падаючий" ВАХ лампи, що призводить до часткової стабілізації напруги на лампі за рахунок регулювання її кута запалення. Експериментальні зразки запропонованого комбінованого ПРА досліджувались разом з НЛВТ типу ДНаТ потужністю 35-150 Вт виробництва Полтавського заводу розрядних ламп. Для НЛВТ потужністю 35 – 50 Вт стійка робота при нормованому рівні світлового потоку спостерігалась у 90 % дослідних ламп; для НЛВТ потужністю 75 – 150 Вт – у 100 % ламп.



а – у момент запалення; б – у робочому режимі; t_1, t_3 – моменти запалення лампи, t_2, t_4 – моменти згасання
Рис. 2 – Форма струму та напруги на лампі типу ДНаТ-150

Схема двохступеневої фільтрації імпульсних сигналів дозволяє знизити інтенсивність імпульсних радіоперешкод в мережі змінного струму до рівня 60 дБ від величини спожитої потужності, що відповідає нормам міжнародного стандарту ІЕС EN 61000-3-2, який регламентує граничні значення складових спожитого комплектом НЛВТ-ПРА мережевого струму.

Висновки. Проведені дослідження експериментальних зразків комбінованого ПРА для РЛВТ свідчать, що вони забезпечують надійну і ефективну роботу РЛ малої потужності 35-150 Вт, що дозволяє суттєво розширити сферу їх застосування в енергоекономічних ОУ різноманітного призначення.

При цьому, зокрема, досягається надійне запалення розряду і стабільна робота ламп типу ДНаТ на протязі всього регламентного строку служби; відсутній акустичний резонанс і несиметричний розряд; не спостерігається надмірного розпилення емісійного покриття електродів на колбу лампи і, відповідно, її перегрів; автоматичне регулювання струму лампи забезпечує стабільність режиму її роботи і збільшення строку експлуатації до 30 %.

Запропонований комбінований ПРА для малопотужних розрядних ламп типу ДНаТ вирішує важливі проблеми забезпечення ефективної роботи НЛВТ малої потужності в сучасних освітлювальних установках різноманітного призначення.

Список літератури

1. Погребной Ю.В. Современные натриевые лампы высокого давления. Новости светотехники. / ред. Ю.Б Айзенберг. – М.: Дом света. – 1998. – Вып.7. – 16 с.
2. Белокоп Л.А. Зажигающие устройства для разрядных ламп высокого давления. / Л. А. Белокоп, Н. Л. Белокоп // Світло Люкс. – 2005. – № 6. – С. 42-44.
3. Ward P.C. Analysis of high pressure sodium lamp voltage rise / P. C. Ward // JIES. 1982. – V.11. – No 2. – С. 94-97.
4. Ward P.C. Netimation of high pressure sodium lamp voltage rise as a function of ballast characteristic curve parameters/ P.C. Ward // JIES: 1983. – V.13. – No.1. – С.157-161.
5. Хайнц Р. Характер работы разрядных ламп высокого давления / Р. Хайнц // Светотехника. – 2005. – № 4. – С.16-20.
6. Обжерин Е.А. Особенности анализа и расчёт современных систем питания ламп высокой интенсивности / Е.А. Обжерин, В. Д. Поляков, В. А. Пузанов //Светотехника. – 2006. – № 6. – С. 49-54.

7. Фишбайн О. Электронный пускорегулирующий аппарат для разрядных ламп высокого давления. Преимущества и недостатки / О. Фишбайн // Светотехника. – 2006. – №5. – С. 54-56.
8. Белокоп Л.А. Энергосберегающие электронные балласты для разрядных ламп высокого давления / Л. А. Белокоп, Н. Л. Белокоп // Світло Люкс. – 2006. – № 5. – С. 34-38.
9. Иванов В.М. Напряжение сети и срок службы маломощных натриевых ламп высокого давления / В.М. Иванов, Г.М. Кожушко., О.Г. Корягин // Светотехника. – 1992. – № 7. – С. 2-3.
10. ГОСТ 17616-82. Лампы разрядные. Методы измерения электрических и световых параметров. – М.: 1982. – 15 с.
11. Фугенфиров М.И. Электрические схемы с газоразрядными лампами / М.И. Фугенфиров // М.: Энергия. – 1974. – 368 с.
4. Ward P.C. Estimation of high pressure sodium lamp voltage rise as a function of ballast characteristic curve parameters / P.C. Ward // JIES: 1983. – Vol. 13. – No. 1. – p. 157-161.
5. Heintz R. High pressure discharge lamps work characteristics / Heintz R. // Lighting Engineering. – 2005. – No 4. – p. 16-20.
6. Obzherin E.A. Analysis and modeling for modern power systems of high intensity lamps / E.A. Obzherin, V.D. Polyakov, V.A. Puzanov // Lighting Engineering. – 2006. – No 6. – p. 49-54.
7. Fishbain O. Electornic starting and control device for high pressure discharge lamps. Strengths and weaknesses / O. Fishbain // Lighting Engineering. – 2006. – No 5. – p. 54-56.
8. Belokon L.A. Energy saving electronic ballasts for high pressure discharge lamps / L.A. Belokon, N.L. Belokon // Light Lux. – 2006. – No 5. – p. 34-38.
9. Ivanov V.M. Voltage and lifetime dependencies for low-power high pressure discharge lamps / V.M. Ivanov, G.M. Kozhushko, O.G. Koryagin // Lighting Engineering. – 1992. – No 7. – p. 2-3.
10. GOST 17616-82. Discharge Lamps. Methodology of measuring electrical and lighting characteristics // Moscow: 1982. – 15 p.
11. Fugenfirov M.I. Electrical schemes with discharge lamps / M.I. Fugenfirov // Moscow: Energy. – 1974. – 368 p.

References (transliterated)

1. Pogrebnoy Y.V. Modern high-pressure sodium lamps. Lighting engineering news / ed. Y.B. Aizenberg – M.: Light House. – 1998. – V.7. – 16 p.
2. Belokon L.A. Starting device for high-pressure discharge lamps / L.A. Belokon, N.L. Belokon // Light Lux. – 2005. – No 6. – p. 42-44.
3. Ward P.C. Analytic of high pressure sodium lamp voltage rise / P. C. Ward // JIES. 1982. – Vol. 11. – No 2. – p. 94-97.

Надійшла (received) 05.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Гібридний пускорегулювальний апарат для розрядних ламп високого тиску / Ю. В. Рой, В. Ф. Рой, Бурма М.Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 37-41. Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-3944.

Гибридный пускорегулирующий аппарат для разрядных ламп высокого давления / Ю. В. Рой, В. Ф. Рой, М.Г. Бурма // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 37-41. Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-3944.

Staging and control device for high pressure discharge lamps / Roy Y.V., Roy V.F., Burma N.G. // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 37-41. Bibliography: 11. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рой Юрій Вікторович – пошукач, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова; м. Харків; тел.: (057) 707-33-16; e-mail: office@kname.edu.ua.

Рой Юрий Викторович – соискатель, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова; г. Харьков; тел.: (057) 707-33-16; e-mail: office@kname.edu.ua.

Roy Yuriy Viktorovich – Researcher, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv; Kharkov; tel.: (057) 707-33-16; e-mail: office@kname.edu.ua.

Рой Юрій Вікторович – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова; м. Харків; тел.: (057) 707-33-16; e-mail: office@kname.edu.ua.

Рой Виктор Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова; г. Харьков; тел.: (057) 707-33-16; e-mail: office@kname.edu.ua.

Roy Viktor Fedorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor at the Department of Electricity cities, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv; Kharkov; tel.: (057) 707-33-16; e-mail: office@kname.edu.ua.

Бурма Микола Гаврилович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України; Харків; тел.: (057) 340-50-11; e-mail: burma@ilt.kharkov.ua.

Бурма Николай Гаврилович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина Национальной академии наук Украины, Харьков; тел.: (057) 707-33-16; e-mail: burma@ilt.kharkov.ua.

Burma Nikolay Gavrilovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, B.Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kharkov; tel.: (057) 707-33-16; e-mail: burma@ilt.kharkov.ua.

УДК 621.314

О. О. ШАВЬОЛКІН, С. М. КОЖЕМЯКІН**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕРЕЖЕВОГО ІНВЕРТОРА КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ПОНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

Розглянуто однофазний мостовий інвертор напруги в режимі джерела струму. Для однополярного формування напруги запропоновано рішення з дворівневим і тривірневим релейним регулятором струму при зниженні кількості і обмеженні частоти перемикачів транзисторів. В автономному режимі завдання струму формується пропорційно-інтегральним регулятором напруги. При роботі на мережу інвертор підключається через реактор, в автономному режимі паралельно навантаженню підключається конденсатор. Виконано моделювання роботи з мережею і нелінійним навантаженням.

Ключові слова: Комбінована система електропостачання, поновлювані джерела енергії, інвертор напруги в режимі джерела струму, релейний регулятор струму, тривірневий релейний регулятор, регулятор напруги, автономний режим, моделювання.

Рассмотрен однофазный мостовой инвертор напряжения в режиме источника тока. Для однополярного формирования напряжения предложено решение с двухуровневым и трехуровневым релейным регулятором тока при снижении количества и ограничении частоты переключения транзисторов. В автономном режиме задание тока формирует пропорционально-интегральный регулятор напряжения. К сети инвертор подключается через реактор, в автономном режиме параллельно нагрузке подключается конденсатор. Выполнено моделирование работы с сетью и нелинейной нагрузкой.

Ключевые слова: Комбинированная система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, инвертор напряжения в режиме источника тока, релейный регулятор тока, трехуровневый релейный регулятор, регулятор напряжения, автономный режим, моделирование.

Considered a single-phase current controlled voltage source bridge inverter for the converter unit with renewable energy sources. In parallel work with AC network the inverter is provides a power factor equal to one, regardless of the type of load and the direction of energy transfer. In autonomous mode, when the AC network is disconnected, inverter provides the energy transfer to the load. Proposed solutions with using a two-level and three-level hysteresis current controller with adjustable setting trigger of controller. This allows for the formation of a unipolar voltage inverter and to reduce the number of switching of transistors with limiting the frequency switching. When operating on AC power inverter current reference is formed in accordance with the load current and the power that is generated from renewable sources. In the autonomous mode, the instantaneous value of the load voltage is formed by a proportional-integral voltage controller that generates a reference to the hysteresis current controller. The current regulator is provides to limit the inverter current for transient regimes. The inverter is connected to AC power and load through the reactor. In the autonomous mode, the capacitor is connected parallel to the load. The inverter control system, which implements the proposed solutions have been developed. Simulation has executed for a system which includes a source AC with active and inductive impedance of power line, inverter with its control system and combined load. The load is an active-inductive, and includes a rectifier with an output capacitor filter. The simulation results confirm the effectiveness of solutions that are offered.

Keywords: The combined system of power supply, renewable energy, current controlled voltage source inverter, hysteresis current controller, a three-level hysteresis controller, voltage controller, autonomous mode, modeling.

Вступ. Широке впровадження поновлюваних джерел електроенергії (ПДЕ) у локальних системах електрозабезпечення (сонячних батарей, вітрогенераторів) створює можливості для їх паралельної роботи з централізованою мережею (ЦМ). Особливо це актуально в умовах дії "зелених" тарифів [1], коли споживач стає, в певній мірі, учасником регіонального енергоринку: надлишок електроенергії, який генерується ПД, віддається у ЦМ, підвищуючи цим самим ефективність функціонування таких систем. Інтегровані у єдину мікроенергетичну систему джерела електроенергії (насамперед, поновлювані) з можливістю паралельної роботи з ЦМ утворюють комбіновану систему електроживлення (КСЕ) [2]. Енергетичний зв'язок між джерелами і узгодження їх режимів роботи забезпечує напівпровідниковий перетворювальний агрегат (ПА), основним елементом якого є мережевий автономний інвертор напруги (МАІН), що забезпечує передачу енергії від ПДЕ.

Автономні системи електроживлення (АСЕ) з ПДЕ, а також КСЕ випускаються значною кількістю виробників у завершеному вигляді, також виготовляються і окремі елементи систем [3, 4]. Стосовно МАІН звичайно розглядається формування "чистої синусоїди" напруги, що цілком виправдано для АСЕ, але не є однозначним для КСЕ. З метою зменшення вихідних фільтрів МАІН працює з високою частотою модуляції і має найбільші втрати енергії у силових колах ПА.

Навантаження сучасної будівлі споживає

реактивну потужність, є нелінійним і спотворює струм, що споживається з ЦМ. Щодо гармонійного складу струму споживання існують стандарти МЕК [5]. В КСЕ присутні два джерела електроенергії – одне (з боку АІН) є стабілізованим за напругою, інше – ЦМ, яка у більшості локальних об'єктів, що віддалені від розподільчих пунктів в умовах їхньої перевантаженості, має коливання напруги, що можуть перевищувати припустимі значення. Отже, виникають питання забезпечення сумісності їх роботи і забезпечення коефіцієнту потужності близького до 1. Для вирішення цього в роботі [6] показана доцільність суміщення функцій МАІН з функцією силового активного фільтру (САФ). За цього пропонується використовувати МАІН у режимі джерела струму. Тенденція використання МАІН у режимі джерела струму проглядає і у роботах інших дослідників [7, 8].

Топологія МАІН залежно от потужності, структури КСЕ може бути різною. Щодо дворівневого трифазного мостового АІН питання реалізації режиму джерела струму в цілому вирішено. Недостатньо вивчено питання стосовно режиму джерела струму для однофазної мостової схеми МАІН, де можливі різні варіанти реалізації з постійною і змінною частотою модуляції, що використовують біполярне формування напруги. Покращення показників МАІН зараз пов'язують з багаторівневими топологіями схем [9], проте питання стосовно використання каскадних схем інверторів де базовим елементом є однофазний мостовий МАІН у режимі джерела струму, теж

вивчено недостатньо. Певні можливості зменшення кількості перемикачів ключів забезпечує однополярна модуляція напруги однофазного мостового АІН, питання її реалізації в режимі джерела струму потребує додаткових досліджень. В існуючих рішеннях МАІН працює або паралельно з ЦМ або у автономному режимі в якості джерела синусоїдальної напруги. Питання використання МАІН, як джерела струму в автономному режимі роботи на навантаження потребує додаткового вивчення.

Мета. Удосконалення принципів керування однофазним мостовим МАІН в режимі джерела струму із забезпеченням роботи КСЕ разом із ЦМ і в автономному режимі роботи.

Завдання, що підлягають вирішенню:

- дослідити можливості зменшення кількості перемикачів ключів АІН і втрат енергії на їхнє перемикання, обґрунтувати принцип реалізації відповідного рішення і структуру системи керування;
- розробити структуру системи керування мережевого АІН в режимі джерела струму для

автономного режиму роботи КСЕ;

– розробити математичну модель мережевого АІН з системою керування;

– здійснити імітаційне моделювання щодо перевірки працездатності одержаних рішень.

Викладення основного матеріалу.

Запропонована структура силових кіл КСЕ з МАІН (рис. 1) містить: ЦМ (джерело змінного струму G , лінію електропередавання (ЛЕП) з опором $Z_{ЛЕП}$), однофазний мостовий МАІН на чотирьох ключах $K_1 \div K_4$ (IGBT зі зворотним діодом), автоматичний вимикач QF на вході локального об'єкту, високочастотний фільтр (R_Φ, C_Φ), контактор $K1$ для підключення МАІН до ЦМ, контактор $K2$ для підключення конденсатора фільтра $C1$ у автономному режимі, навантаження об'єкту Z_H , реактор L , конденсатор у колі постійного струму МАІН $C2$, датчики напруги у точці підключення u_1 , на вході МАІН u_d , датчики струму навантаження – i_2 , вихідного струму МАІН – i_{in} , вхідного струму МАІН i_d .

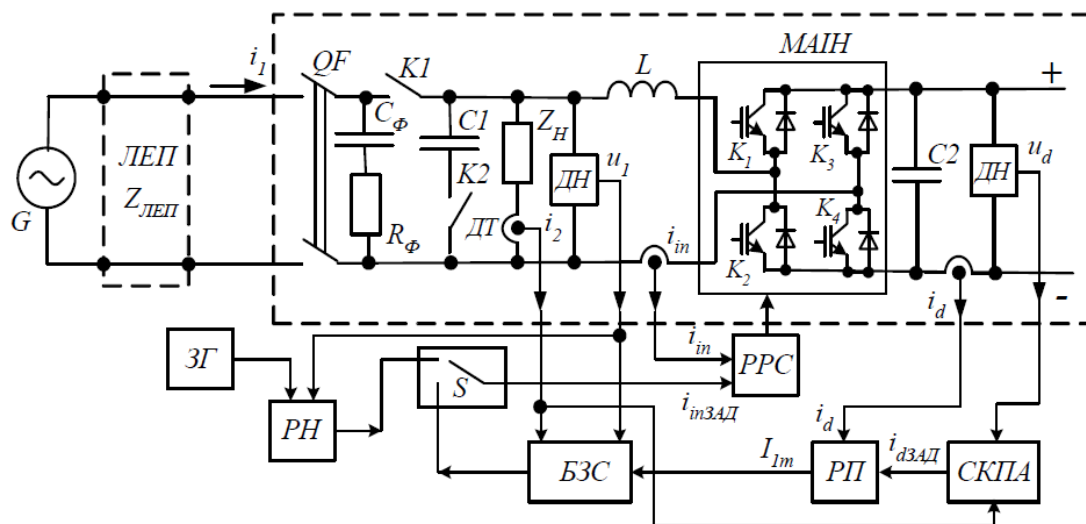


Рис. 1 – Структура силових кіл і системи керування МАІН

Система керування МАІН містить релейний регулятор струму (РРС), блок завдання струму (БЗС) для режиму роботи з ЦМ, регулятор напруги (РН), генератор синусоїдальної напруги (ЗГ), що задає напругу у автономному режимі, перемикач сигналу завдання струму (i_{in}) S , регулятор потужності (РП), систему керування перетворювальним агрегатом СКПА (у даній роботі не розглядається).

Робота МАІН паралельно мережі. Для зменшення впливу високочастотних складових в точці підключення МАІН встановлено RC фільтр. Оскільки постановлено завдання забезпечення відносно ЦМ коефіцієнту потужності, що дорівнює 1, використання у вхідних колах МАІН конденсатору у разі роботи з ЦМ є недоречним. Це приводить до додаткового навантаження МАІН за струмом (компенсація ємнісного струму $C1$ за активного опору навантаження або його відсутності), адже напруга ЦМ є синусоїдальною (у всякому разі наближена до синусоїдальної). До того ж наявність ємності у колі з індуктивністю може спричинити резонанс.

Отже розглянемо роботу МАІН на джерело

синусоїдальної напруги. За цього формування синусоїдального струму здійснюється у замкненій за струмом системі відповідно миттєвому значенню завдання $i_{3АД}$ і фактичному значенню струму на виході АІН (сигнал зворотного зв'язку за струмом) згідно похибки $\Delta i = i_{3АД} - i_\Phi$. Можливі різні варіанти реалізації з постійно і змінною частотою модуляції [7, 8].

Зазвичай формування струму здійснюється з похибкою за умови, що середнє за період перемикачів ключів АІН значення похибки близьке до нуля. Аналіз показує, що найбільш ефективним є використання релейного (гістерезисного) регулятора струму з обмеженням Δi заданим відхиленням $\delta > 0$ відносно значення $i_{3АД}$. Недоліком є змінна на періоді вихідного струму частота перемикачів ключів МАІН, проте спектр струму є рівномірним і амплітуди вищих гармонік не перевищують 1 %, тобто потреба у додаткових фільтрах відсутня. Вадою є й те, що пульсації постійної напруги u_d на вході МАІН з подвійною до частоти мережі частотою, враховуються РРС у тривалості вмикання транзисторів. Це зменшує вимоги до фільтру ($C2$).

За використання однополярного формування напруга $u_{\text{МАІН}}$, приймає три значення $+U_d$, 0 , $-U_d$. Варто зазначити, що за синусоїдальної форми струму значення di/dt змінюється від нуля до максимального значення. Очевидно, що за використанням РРС швидкість змінювання струму у реакторі L визначається прикладеною напругою з боку ЦМ та МАІН і повинна перевищувати $di_{\text{ЗАД}}/dt$ (струм коливається в межах $(i_{\text{ЗАД}} - \delta) < i_n < (i_{\text{ЗАД}} + \delta)$). Однак, за значного перевищення $|di/dt| > |di_{\text{ЗАД}}/dt|$ струм за спрацьовуванням РРС швидко зростає і убуває, що збільшує кількість перемикачів ключів АІН, які забезпечують відповідні значення вихідної напруги $+U_d$ та $-U_d$. Це має місце за використанням звичайного дворівневого РРС, що спрацьовує (перемикається) за рівнями $(i_{\text{ЗАД}} - \delta)$ та $(i_{\text{ЗАД}} + \delta)$.

Кількість перемикачів ключів можна суттєво зменшити якщо di/dt а $di_{\text{ЗАД}}/dt$ близькі за значенням. Розглянемо формування позитивної напівхвилі струму. Так, під час зростання $i_{\text{ЗАД}}$ ($di_{\text{ЗАД}}/dt > 0$) змінення струму i_n від рівня $(i_{\text{ЗАД}} - \delta)$ до $(i_{\text{ЗАД}} + \delta)$ досягається за $u_{\text{МАІН}} = U_d$, що забезпечує $di/dt > di_{\text{ЗАД}}/dt$. Якщо для подальшого зменшення i_n встановити $u_{\text{МАІН}} = 0$ швидкість убування струму зменшується (відносно випадку,

коли $u_{\text{МАІН}} = -U_d$) – тривалість інтервалу часу досягнення значення $(i_{\text{ЗАД}} - \delta)$ збільшується. На ділянці з $di_{\text{ЗАД}}/dt < 0$ на інтервалі змінювання струму $(i_{\text{ЗАД}} - \delta) < i_n < (i_{\text{ЗАД}} + \delta)$ можна використати наступні варіанти: $u_{\text{МАІН}} = U_d$ ($di/dt > 0$) або $u_{\text{МАІН}} = -U_d$ ($di/dt < 0$), якщо $|di_{\text{ЗАД}}/dt| \geq |di/dt|$ – струм навантаження зменшується повільніше ніж завдання. На наступному інтервалі зменшення i_n до рівня $(i_{\text{ЗАД}} - \delta)$ теж можливі два варіанти: $u_{\text{МАІН}} = 0$ ($di/dt < 0$), якщо $|di/dt| \geq |di_{\text{ЗАД}}/dt|$ або $u_{\text{МАІН}} = -U_d$ ($di/dt > |di_{\text{ЗАД}}/dt|$).

Отже, якщо змінювати стани схеми залежно від значення $di_{\text{ЗАД}}/dt$ можна значно зменшити кількість перемикачів ключів АІН тобто перейти до однополярного формування напруги навантаження.

Можливими є наступні варіанти реалізації.

Згідно полярності струму i_1 та напруги u_1 . В загальному випадку з формуванням струму i_1 , що зсунутий відносно напруги u_1 на кут φ можливі наступні режими роботи схеми: випрямний при співпадинні напрямків u_1 та i_1 і інвертування при протилежних напрямках u_1 та i_1 . Розглянемо стани для цих режимів:

1. Випрямний за $u_1 > 0$ та $i_1 > 0$. Можливі два рівноцінних стани:

а) з використанням ключа K_2 – при вмиканні ключа отримуємо коло джерело G , L , K_2 , $VD4$, G – струм i_1 зростає; за вимкненням K_2 вмикається $VD1$ – енергія, що накопичена у реакторі віддається у навантаження – струм зменшується;

б) з використанням ключа K_3 – при вмиканні ключа отримуємо коло джерело G , L , $VD1$, K_3 , G – струм i_1 зростає; за вимкненням K_3 вмикається $VD4$ – енергія, що накопичена у реакторі віддається у навантаження – струм i_1 зменшується;

2. Випрямний за $u_1 < 0$ та $i_1 < 0$. Можливі два рівноцінних стани з використанням ключів K_4 і K_1 ;

3. Інвертування за $u_1 > 0$ та $i_1 < 0$. Можливі три стани:

а) за вмиканням ключів K_1 і K_4 утворюється коло G , L , K_1 , навантаження, K_4 , G . Напруга U_d є зустрічною відносно u_1 – під її дією i_1 зростає;

б) за вимиканням K_1 і K_4 струм підхоплюють діоди $VD2$ в $VD3$ – струм зменшується, енергія віддається у навантаження;

в) за вимиканням ключа K_1 , ключ K_4 залишається в роботі, струм підхоплює $VD2$. Утворюється коло G , L , $VD2$, K_4 , G – під дією u_1 струм i_1 зменшується.

4. Інвертування за $u_1 < 0$ та $i_1 > 0$. Можливі стани, що аналогічні п. 3 за участю ключів K_2 і K_3 та $VD1$, $VD4$.

Що стосується станів б) та в) за режимами 3 та 4 дія однакова – струм зменшується, проте у першому випадку $|u_B| = U_d$, а у другому $u_B = 0$, отже для стану б) темп зменшення струму більше – зростає частота перемикачів ключів.

Отже, для функціонування схеми треба визначати полярність струму i_1 та напруги u_1 , згідно цьому імпульси з виходу РРС подаються на відповідні ключі.

Більш універсальним є використання трирівневого РРС, який має додатковий релейний елемент (РЕ) з рівнем спрацьовування $\delta_1 = (1,2 \div 1,5)\delta$. Так, для позитивної напівхвилі струму спрацьовуванню РРС за рівнями $(i_{\text{ЗАД}} \pm \delta)$ відповідають значення напруги навантаження $u_{\text{МАІН}} = U$ і $u_{\text{МАІН}} = 0$. На певній ділянці формування струму виникає ситуація, коли після досягнення $i_1 \geq (i_{\text{ЗАД}} + \delta)$ і перемикачів у стан $u_{\text{МАІН}} = 0$ швидкість змінювання струму не забезпечує спадання струму і струм продовжує зростати. За досягненням значення $i_1 \geq (i_{\text{ЗАД}} + \delta_1)$ спрацьовує РЕ, який перемикає стан схеми $u_{\text{МАІН}} = -U$ для гарантованого зменшення струму. У подальшому використовуються стани $u_{\text{МАІН}} = 0$ і $u_{\text{МАІН}} = -U$. Аналогічна робота РРС для негативної напівхвилі, коли використовуються стани $u_{\text{МАІН}} = -U$ і $u_{\text{МАІН}} = 0$, за спрацьовуванням РЕ $u_{\text{МАІН}} = 0$ і $u_{\text{МАІН}} = -U$.

Отже на виході РРС маємо сигнал u_g , що відповідає рівням 1 , 0 , -1 . Відповідно змінюється і алгоритм керування ключами приймають значення: якщо $u_g \geq 0$ $g_1 = 1$, якщо $0 \geq u_g$ $g_3 = 1$, $g_2 = \bar{g}_1$, $g_4 = \bar{g}_3$.

Значення індуктивності реактору L (з урахуванням індуктивності джерела (мережі) змінного струму) визначає швидкість змінювання струму реактору i_1 і, відповідно, амплітуду його пульсацій. Для відпрацьовування струму заданої амплітуди швидкість змінювання струму реактора повинна перевищувати швидкість змінювання завдання струму. Максимальна швидкість синусоїдального струму має місце при переході

струму нуль і дорівнює $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{МАХ}} = \omega I_{1m}$. Швидкість

змінювання струму реактору при вмиканні транзистору визначається напругою джерела u_1 , що прикладена до реактору і, яка є малою в зоні переходу струму через нуль. Вважаємо, що напівхвиля струму починає формуватися з вмикання транзистору (стан 1, а, що розглянуто вище). Нехай тривалість вмикання становить $10^\circ = \pi/18$. Середнє значення напруги за цей час становить

$$U_{CP} = \int_0^{\pi/18} U_{1m} \sin \omega t d\omega t = U_{1m} (1 - \cos(\pi/18)) = 0,015 U_{1m}.$$

Тоді середнє значення швидкості змінювання струму становить $\frac{di}{dt} = \frac{U_{CP}}{L} = \frac{0,015 U_{1m}}{L}$ і повинна виконуватися умова $\frac{U_{CP}}{L} > \left(\frac{di}{dt}\right)_{MAX} = \omega I_{1mMAX}.$

Зменшення діапазону змінювання частоти перемикачів ключів у процесі формування струму можна досягнути регулюванням значення δ згідно напруги навантаження і амплітуди струму.

Автономний режим роботи МАІН. Умови і механізм перемикачів МАІН у автономний режим роботи залежить від різних факторів – наявності інших генерувальних установ, інших навантажень, просадок напруги внаслідок зварювальних робіт і тощо, що є предметом окремого розгляду. Тому питання розглянуто дещо спрощено. Тобто у разі зникнення напруги з боку ЦМ контактор К1 відключається. Зворотнє вмикання К1 за відновленням живлення ЦМ здійснюється згідно за сигналом від системи керування КСЕ.

Для забезпечення синусоїдальної форми напруги навантаження в схему додається конденсатор С1, що вмикається контактором К2. Отже у даному разі МАІН працює з LC фільтром. Ємність конденсатору С1 достатньо мати мінімальною за умови придушення високочастотних пульсацій напруги. В разі активно-індуктивного навантаження для розвантаження МАІН за реактивним струмом ємність С1 може бути обрана за умови певної компенсації реактивної потужності навантаження.

Можливі наступні варіанти керування МАІН у автономному режимі:

- переведення МАІН у режим джерела напруги з синусоїдальною ШІМ;
- робота у режимі джерела струму з визначенням завдання струму згідно потужності навантаження.

У разі використання релейного регулятора струму, що забезпечує високу швидкість відпрацювання струму, можливим і доцільним виглядає комбінований варіант з формуванням миттєвого значення напруги МАІН з підпорядкованим контуром регулювання струму. Це забезпечує двоконтурна система з зовнішнім пропорційно-інтегральним регулятором напруги і внутрішнім контуром регулювання струму. Завдання напруги формується генератором (ЗГ) синусоїдальної напруги з частотою 50 Гц. Така побудова системи регулювання дозволяє виключити викривлення форми напруги у разі нелінійного навантаження, здійснити обмеження вихідного струму МАІН, що потрібно для виключення пошкодження ключів у перехідних режимах роботи.

Результати моделювання. Моделювання здійснювалось для системи, що відповідає рис. 1, і містить у собі ЦМ з активним і індуктивним опорами,

МАІН і навантаження. Розглядалась робота МАІН на активноіндуктивне і нелінійне навантаження. В якості нелінійного навантаження використано некерований випрямляч з вихідним ємнісним фільтром.

На рис. 2 для автономного режиму роботи МАІН наведені осцилограми напруги (навантаження u_1 , МАІН $u_{МАІН}$) і струмів (МАІН i_{in} , навантаження i_H , конденсатору i_{C1}) за дещо завищеним значенням відхилення δ для РРС. За цього напруга $U_1=220$ В, індуктивність реактору $L=3$ мГн, постійна напруга на вході МАІН $U_d=350$ В, $C_1=100$ мкФ. Можна побачити, що здебільшого здійснюється однополярна модуляція (імпульси напруги мають одну полярність) і лише на певних інтервалах, що відповідають максимальній швидкості змінювання струму має місце біполярна модуляція (чергуються імпульси позитивної і негативної полярності). На цих інтервалах збільшується частота перемикачів ключів. На інших інтервалах суттєвого змінювання частоти перемикачів ключів немає. Напруга і струм навантаження не мають високочастотних пульсацій, щодо струму високочастотні складові струму МАІН замикаюся через конденсатор.

На рис. 3 наведені осцилограми напруги (навантаження u_1 , МАІН $u_{МАІН}$) і струмів (мережі i_1 , МАІН i_{in} , навантаження i_H) у разі перемикачів систем у автономний режим роботи. До перемикачів поряд з живленням навантаження здійснювалось генерування енергії у ЦМ. За наявності конденсатору у вихідних колах МАІН виникає перехідний процес, проте струм інвертору обмежується припустимим значенням. На рис. 3 показано найгірший випадок, коли початок роботи у автономному режимі співпадає з максимумом напруги.

Висновки за результатами дослідження. Запропоновані принципи керування однофазним мостовим АІН у режимі джерела струму дозволяють забезпечити роботу КСЕ по відношенню до ЦМ з коефіцієнтом потужності близьким до 1, як за лінійним, так і нелінійним навантаженням з одночасною генерацією електроенергії у ЦМ. За цього здійснюється однополярне формування напруги і практично у два рази зменшується кількість перемикачів ключів АІН і обмежується їх частота. Виключення ємності у вихідних колах у разі роботи з ЦМ зменшує завантаження ключів за струмом.

Використання у автономному режимі роботи двоконтурної системи регулювання з зовнішнім регулятором напруги і внутрішнім релейним регулятором струму поряд із забезпеченням синусоїдальної форми напруги навантаження дозволяє обмежити струм АІН у перехідних режимах.

Подальшим розвитком роботи є удосконалення принципів реалізації режиму джерела струму для каскадних схем з послідовним з'єднанням декількох АІН і удосконалення системи регулювання потужності КСЕ у разі відсутності акумуляторної батареї або за її мінімальної ємності.

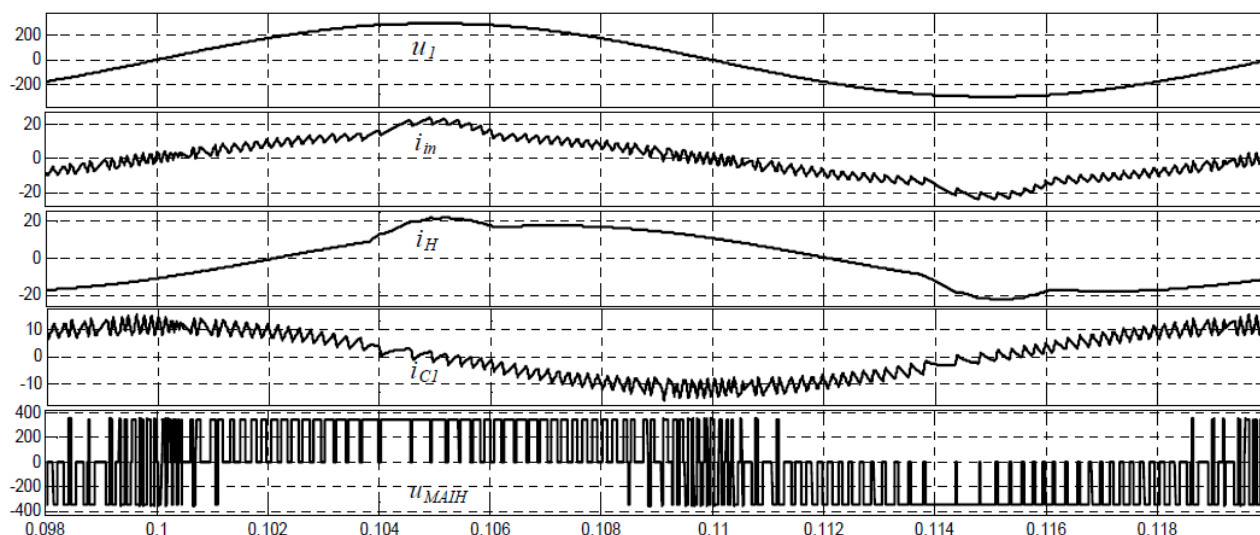


Рис. 2 – Осцилограми напруги і струмів у автономному режимі роботи МАІН

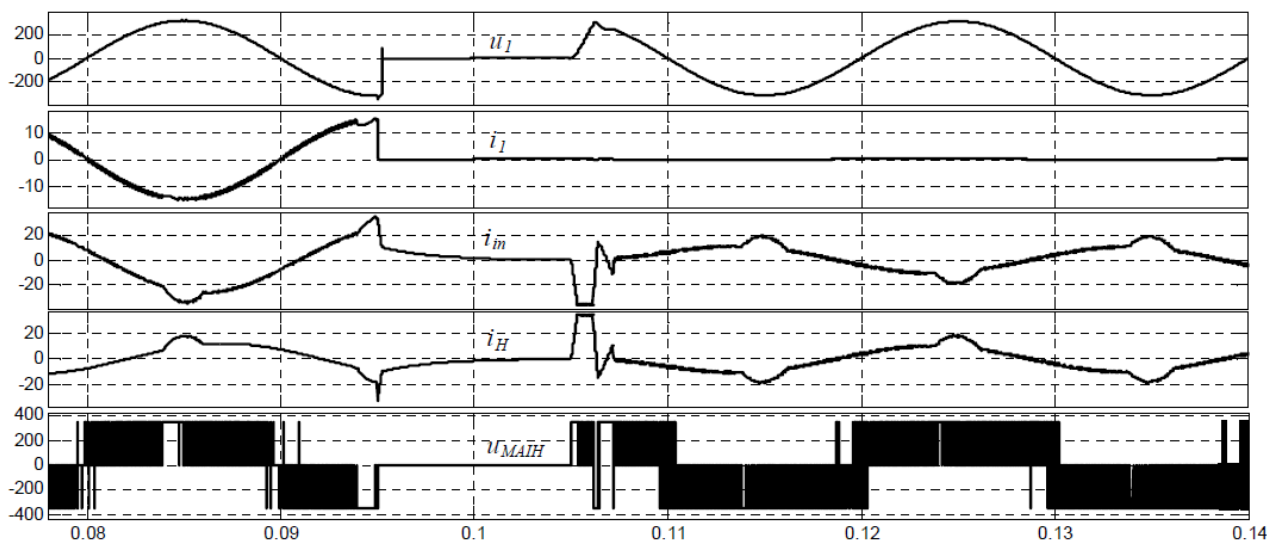


Рис. 3 – Осцилограми напруги і струмів під час перемикання МАІН у автономний режим роботи

Список літератури

1. Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств [Текст] / Постанова НКРЕКП № 2046 від 20.07.2015 р.
2. Каплун В.В. Комбіновані системи електроживлення з поновлюваними джерелами енергії [Текст] / В.В. Каплун, В.В. Козирський, А.В. Петренко – К.: ЦПТ "Аграр Медіа Груп", 2011. – 330 с.
3. Солнечная электростанция для дома. [Electronic resours]. <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/>.
4. BEKAR. Ветро-солнечная система. [Electronic resource]. – <http://www.ra-energo.ru/vetro/>.
5. IEEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Jun. 1992.
6. Каплун В. В. Удосконалення перетворювального агрегату комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами енергії / В.В. Каплун, О.О. Шавьолкін // "Електротехнічні та комп'ютерні системи" № 22 (98), Наука і техніка, 2016. – С. 165-169,
7. Tsao-Tsung Ma. Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2012 Vol II, IMECS 2012, March 14 - 16, 2012, Hong Kong. – pp. 996-1001.
8. Sung-Hun Ko. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct

Coupled Power Quality Control / Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar // IEEE Transactions, 2006. –pp. 5203-5208.

9. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник [Текст] / О. О. Шавьолкін; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с.

References (transliterated)

1. Pro vstanovlennia – zelenyh taryfiv na elektrychnu energiu dla pryvatnyh hospodarstv. Postanova NKREKP 2046 vid 20.07.2015 [About establishment of "green" tariffs on electric energy for private house. Resolution NKRE № 2046 from 20.07.2015]. Available at: <http://www.zakon3.rada.gov.ua/aws/show/z0942-5>.
2. Kaplun V.V., Kozirskij V.V., Petrenko A.V. Kombinovani sistemi elektrozhyvleniya z ponovlyuvanimi dzherelami energii [Combined power systems with renewable energy]. Kiev: CTI "Agrar Media Grup", 2011. 330 p.
3. Solnechnye batarei dlja doma. [Solar battery for house] [Electronic resource]. <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/>.
4. BEKAR. Vetro-solnechnaja sistema [BEKAR. Wind-solar system]. [Electronic resource]. <http://www.ra-energo.ru/vetro/>
5. IEEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Jun. 1992. (In English).
6. Kaplun V.V., Shav`olkin O.O. Udokonalennya peretvoryval`nogo

- agregatu kombinovanoyi systemy elektrozhyvleniya zponovlyuvalnyimi dzherelamy energiyi [Improvement of converting unit of combined power system with renewable energy sources] "Elektrotekhnichni ta komp'yuterni systemy" № 22 (98), Nauka i tekhnika, 2016. P. 165-169.
7. Tsao-Tsung Ma. Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2012 Vol II, IMECS 2012, March 14 - 16, 2012, Hong Kong. pp. 996-1001.
 8. Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control. IEEE Transactions, 2006. pp. 5203-5208.
 9. Shav'olkin O. O. Silovi napivprovodnikoviy peretvorjuvachi energii : navch. posibnik [Power semiconductor converters of energy : teach. manual]. Harkiv. nac. un-t. mis'k. gosp-va im. O.M. Beketova. Kharkov : HNUMG im. O. M. Beketova, 2015. 403 p.

Поступила (received) 28.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Удосконалення мережевого інвертора комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами енергії / О. О. Шав'юлкін, С. М. Кожемякін // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 42-47. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

Совершенствование сетевого инвертора комбинированной системы электропитания с возобновляемыми источниками энергии / А. А. Шавёлкин, С. М. Кожемякин // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 42-47. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

Improvement of main inverter of combined power system with renewable energy sources / A. A. Shavelkin, S. M. Kozhemyakin // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 42-47. Bibliography: 9. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шав'юлкін Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроніки та електротехніки, Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ; тел.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.

Шавёлкин Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроники и электротехники, Киевский национальный университет технологий и дизайна, г. Киев; тел.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.

Shavelkin Alexander Alexeevych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, professor at the Department of Electronics and Electrical Engineering, Kiev National University of Technologies and Design, Kiev; tel.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.

Кожемякін Сергій Михайлович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри "Загальна електротехніка"; м. Харків; тел.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.

Кожемякин Сергей Михайлович – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", старший преподаватель кафедры "Общая электротехника"; г. Харьков; тел.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.

Kozhemyakin Sergei Mikhailovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of General electrical engineering; Kharkov; tel.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.

УДК 621.313

К. М. ВАСИЛІВ

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ БЕЗКОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ
ЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА ЗА СХЕМОЮ У ДВІ ЗІРКИ НА БАЗІ
ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНОГО МОДУЛЯТОРА НАПРУГИ**

Встановлено закономірності перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються у безконтактній системі збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги на предмет можливості збільшення двозонного ковзання генератора. Запропоновано спосіб корегування параметрів роторів машин модулятора, який дає змогу стабілізувати роботу комутатора для практично необхідних значень ковзання. Досягнуто значного розширення діапазону ковзання – до двох десятків із забезпеченням роботопридатності асинхронізованого генератора

Ключові слова: асинхронізований генератор, модулятор напруги, комутатор, безконтактна система збудження, ковзання.

Установлено закономерности электромагнитных процессов, протекающих в бесконтактной системе возбуждения асинхронизированного генератора на базе трехфазно-трехфазного модулятора напряжения на предмет возможности увеличения двухзонного скольжения генератора. Доказано, что величина параметров обмоток роторов машин модулятора напряжения непосредственно влияет на стабильность работы вентильного коммутатора и системы возбуждения в целом. Достигнуто расширение диапазона двухзонного скольжения – до двух десятых с обеспечением работоспособности асинхронизированного генератора.

Ключевые слова: асинхронизированный генератор, модулятор напряжения, коммутатор, бесконтактная система возбуждения, скольжение.

By means of mathematical modeling there have been studied regularities of electromagnetic processes taking place in the contactless excitation system of an asynchronous generator based on cascade, three-phase-three-phase voltage modulator. There have been found the regularities of these processes with the aim to examine the impact of changes in slip resistance of the generator on the stability of the switch operation and, as a result, on the stability of the excitation system and the generator as a whole. There is offered a method of adjusting parameters of the modulator rotor machine that allows stabilizing the switch and excitation system operation to get the sliding values sufficient for the generator to work in practice. The sliding range has been greatly expanded, up to two tenths, ensuring operation suitability of the asynchronous generator in this range

Key words: asynchronous generator, voltage modulator, switch, contactless excitation system, slide.

Вступ. Частота електричної напруги є одним з основних параметрів якості електроенергії. Це стосується як автономних систем електроживлення, характерною особливістю яких є нестабільність обертання рушія, що за умов використання як генераторів машин змінного струму створює складну проблему – нестабільність частоти. Ця проблема є актуальною і для електростанцій, які слугують основою стаціонарної енергосистеми. Зокрема, на теплових електростанціях використовується велика кількість механізмів власних потреб (живильні помпи, димотяги, дуттєві агрегати і т. ін.), які приводяться в рух асинхронними двигунами (АД). Механічний момент опору таких агрегатів має нелінійну характеристику і описується функційною залежністю вищих порядків (4-го і навіть 5-го ступеня) від частоти обертання. Це означає, що продуктивність таких АД, а значить і відповідних механізмів, нелінійно залежить від частоти напруги, якою живляться ці двигуни. Не достатня продуктивність відповідальних механізмів власних потреб енергоблоків призводить до зниження крутильного моменту турбогенератора і, як наслідок, до зниження частоти напруги. Такі явища спричиняють порушення стійкості роботи як окремих енергоблоків, так і електростанцій і навіть енергосистем загалом.

Аналіз наукових літературних джерел та наявних технічних рішень дає підставу стверджувати, що до одного з перспективних способів стабілізування частоти напруги за умови змінної частоти обертання валу генератора можна віднести асинхронізований генератор з безконтактним збуджувачем на базі каскадного модулятора напруги. У наукових літературних джерелах він увійшов ще під назвою генератора стабільної частоти (ГСЧ) [6]. Схема силового електричного кола такого генератора зображена на рис. 1. Її

структурними елементами є: трифазно-трифазний модулятор, який складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розщеплені на три гілки та з'єднані між собою послідовно перехресними зв'язками, а на вході сполучені в один спільний вузол. Статорні обмотки машин модулятора АМ1 та АМ2 живляться від двох джерел живлення Е1 та Е2, які мають взаємно протилежну послідовність фаз. До решти структурних елементів схеми рис. 1 належать: ТК – тиристорний комутатор циклоконверторного типу, яким слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ), АГ – асинхронізований генератор (далі АСГ), яким слугує асинхронна машина, кожна з фаз обмотки ротора якого розщеплена на дві гілки та з'єднані у дві окремі зірки.

Всі решта позначення на схемі рис. 1 є загальноприйнятими – літерами Е, ф, і позначені електрорушійні сили джерел напруги, електричні потенціали у вузлах та струми електричних гілок схеми. Літерами F, G у нижніх індексах позначено належність координат (струмів, напруг і т. ін.) до машин модулятора та АСГ відповідно, а літерами S, R у нижніх індексах позначено належність відповідних координат до статора і ротора електричних машин. Тиристиори БТПЧ пронумеровані числами. Числами 1 та 2 в дужках у верхніх індексах позначено належність до першої Е1 та другої Е2 електричних мереж відповідно.

На рис. 1 зображена лише одна із схем ГСЧ. Загалом тут можливими є 8 різних схем, які відрізняються між собою сполученням розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора та сполученням розщеплених фазних гілок ротора генератора (або наявність лише однієї з них). Окремі схеми отримуються шляхом комбінації з'єднань фазних гілок роторів машин модулятора і АСГ.

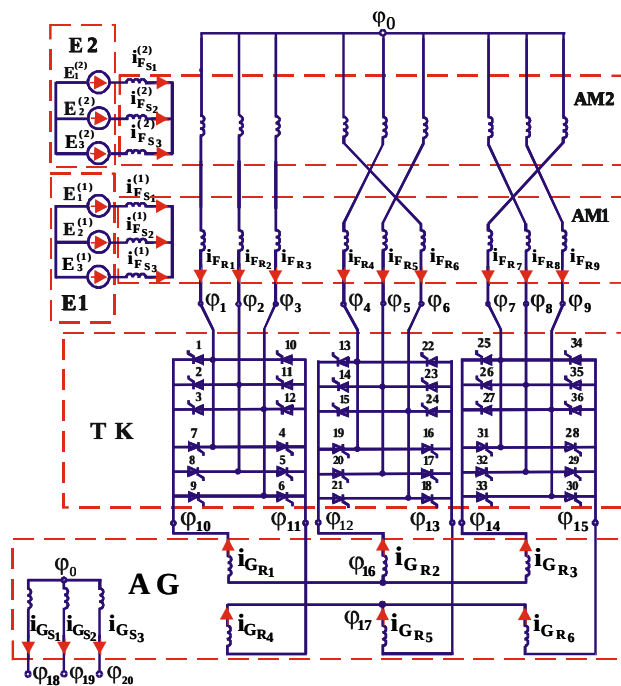


Рис. 1 – Схема силового електричного кола асинхронізованого генератора.

З погляду викладу матеріалу логічною є потреба нагадати, що принцип функціонування ГСЧ ґрунтується на тому, що модулятор напруги формує модульовану напругу, частота заповнення якої пропорційна частоті обертання роторів машин модулятора і кількості їх пар полюсів (ротори АМ1 та АМ2 розміщені на одному валі з АСГ), а частота модуляції визначається частотою двозонного ковзання. Комутатор декодує модульовану напругу, внаслідок чого на його виході (на обмотці ротора генератора) утворюється система фазних напруг частоти ковзання. Це забезпечує стабільну частоту обертання магнітного поля генератора стосовно його обмотки статора, що, своєю чергою, формує частоту напруги генератора, яка дорівнює частоті мереж живлення Е1 та Е2. Отже, гіпотетично частота напруги АСГ дорівнює частоті мереж живлення Е1 та Е2 асинхронних машин модулятора АМ1 та АМ2 і не залежить від частоти обертання ротора АСГ.

Аналіз останніх досліджень. Складність схеми рис. 1 з погляду наявності багатьох різнотипових елементів – асинхронних машин та БТПЧ, а також необхідність у системі керування комутатором та системі автоматичного керування окремими координатами, зокрема напругою, спричинює складність електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в ГСЧ. Ці обставини зумовили потребу у всебічному дослідженні як самого ГСЧ, так і автономних систем електроживлення на базі таких генераторів.

Дослідження проводилися методом математичного моделювання. Для цього були розроблені математичні методи і моделі, а також на їх підставі алгоритми і відповідні програмні комплекси, які дають змогу за допомогою персональних комп'ютерів моделювати електромагнітні і електромеханічні процеси, що відбуваються в таких системах з метою встановлення закономірностей їх перебігу на предмет роботопридатності таких систем електроживлення.

Так у [1] розроблено математичну модель АСГ з безконтактним збуджувачем на базі трифазно-трифазного модулятора, а у [2] виконано математичне моделювання динамічних процесів неробочого ходу АСГ з безконтактним збуджувачем на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора. У [3] розроблено математичну модель для дослідження динамічних процесів автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним збуджувачем на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора. Математична модель і відповідний програмний комплекс дає змогу вивчати електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються у автономній системі живлення під час роботи АСГ на типові навантаження, яким слугують асинхронні двигуни, статичне навантаження та активно-індуктивно-ємнісне навантаження.

Враховуючи можливість створення безконтактної системи збудження АСГ на базі двофазно-трифазного модулятора, з одного боку, та особливості електромагнітних процесів, які відбуваються в таких системах, з другого боку, в [4] розроблено математичну модель для дослідження динамічних процесів автономної системи електроживлення на базі АСГ з безконтактним збуджувачем на базі каскадного двофазно-трифазного модулятора. Ця математична модель як і [3] дає змогу вивчати електромагнітні процеси і для самого АСГ, коли він працює в режимі неробочого ходу, і для режимів роботи генератора на визначений клас типових навантажень (АД, R-L та R-L-C навантаження).

Великий обсяг всебічних досліджень та отримані результати і з погляду типу схем силового електричного кола, і з погляду типу навантажень та режимів роботи ГСЧ переконливо вказує на те, що загалом ГСЧ є роботопридатним. Дуже важливим є питання діапазону ковзання. За результатами досліджень ГСЧ є роботопридатним у діапазоні ковзання $\pm 0,06$. Вважалося, що машини модулятора напруги мають класичну будову і відповідні параметри.

Задачі дослідження. Отриманий результат досліджень, з одного боку, сприймався позитивним, а, з другого, – ставив питання про необхідність вивчення можливості збільшення діапазону двозонного ковзання з метою розширення області практичного застосування ГСЧ. Отже завданням дослідження є встановлення закономірностей перебігу електромагнітних процесів АСГ з безконтактною системою збудження на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги на предмет можливості розширення робочого діапазону двозонного ковзання.

Викладення основного матеріалу. Ретельний аналіз електромагнітних процесів, які відбуваються у системі збудження показує, що із зростанням ковзання збільшується індуктивний опір роторних обмоток машин модулятора, що спричинює витиснення вентильних груп БТПЧ, а це, своєю чергою, унеможливає формування системи фазних напруг частоти ковзання. Безконтактна система збудження, а разом з нею і сам ГСЧ не працює.

З метою створення сприятливих умов роботи комутатора на підставі аналізу електромагнітних процесів, які відбуваються у безконтактній системі збуд-

ження, пропонується зменшити індуктивні опори роторних обмоток машин модулятора. В математичному моделюванні це досягається збільшенням співвідношення кількості витків обмоток статора і ротора машин модулятора (тобто, збільшенням коефіцієнта трансформації). Перевірку впливу зміни коефіцієнта трансформації на роботопридатність генератора виконаємо аналізом функційних залежностей основних електромагнітних координат, отриманих за допомогою математичного моделювання. Для цього розглянемо розрахункові залежності напруг і струмів машин каскадного модулятора і генератора, отриманих для коефіцієнта трансформації машин модулятора $K_i=20$. В описаних вище дослідженнях його значення дорівнювало 5 ($K_i=5$).

На рис. 2 зображені розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок роторів машин модулятора. Зокрема, рис. 2, а ілюструє напруги перших трьох розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора $u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$ (див. рис. 1). Кожна з цих кривих формується сумою електрорушійних сил послідовно з'єднаних розщеплених фазних гілок першої групи роторів машин модулятора АМ1 та АМ2. А ці електрорушійні сили, своєю чергою, індукуються окремо для кожної з машин АМ1 та АМ2 струмами обмоток їх статорів. Аналогічно рис. 2, б ілюструє напруги $u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ других трьох, а рис. 2, в – напруги $u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ третіх трьох розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора (див. рис. 1).

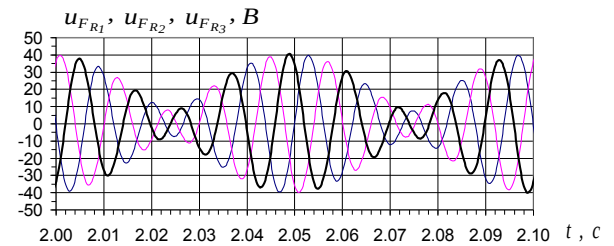
З рис. 2 видно, що напруги послідовно з'єднаних фазних гілок роторів машин каскадного модулятора мають модульовану форму з частотою ковзання (тут для піддослідного режиму ковзання $S=0,2$), яка відповідає періоду $T=0,1$ с. При цьому кожна з трьох систем напруг, зображених на рис. 2, а, б, в зсунуті за фазою на кут $2\pi/3$, що досягається перехресним з'єднанням розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора (див. рис. 1). Модульована форма напруг з частотою ковзання дає підстави очікувати формування системи фазних напруг частоти ковзання у роторній обмотці генератора. Факт зсуву напруг всіх трьох груп фазних гілок за частотою ковзання на $2\pi/3$ забезпечує відповідний зсув фазних напруг і струмів обмотки ротора генератора.

Проаналізуємо основні координати генератора. На рис. 3 зображено розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок ротора генератора. Фазні напруги першої зірки обмотки ротора асинхронізованого генератора $u_{GR1}, u_{GR2}, u_{GR3}$ зображені на рис. 3, а, а фазні напруги другої зірки обмотки ротора генератора $u_{GR4}, u_{GR5}, u_{GR6}$ зображені на рис. 3, б.

З рис. 3 видно (як і передбачалося на підставі кривих рис. 2), що напруги фазних гілок ротора генератора зсунуті за фазою між собою на кут $2\pi/3$ і мають синусоїдну за основною гармонікою форму з частотою ковзання, що, своєю чергою, дає підстави очікувати отримання задовільної форми струмів фазних гілок ротора генератора і як наслідок – синусоїдну форму напруг обмотки статора стабільної частоти і прийнятної з погляду якості електроенергії

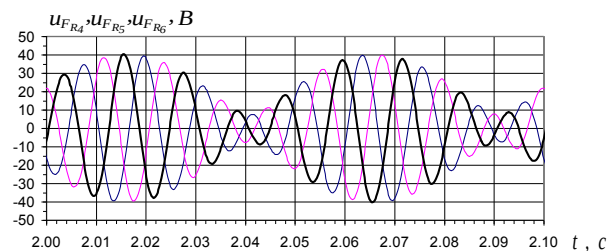
гармонічного спектру.

З метою отримання достовірної інформації стосовно форми струмів фазних гілок ротора генератора їх криві зображені на рис. 4.



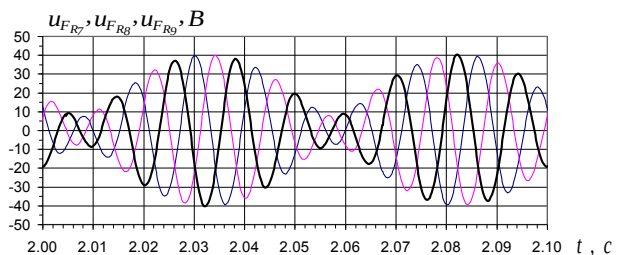
а

$u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$ – напруги 1-3 фазних гілок роторів АМ;



б

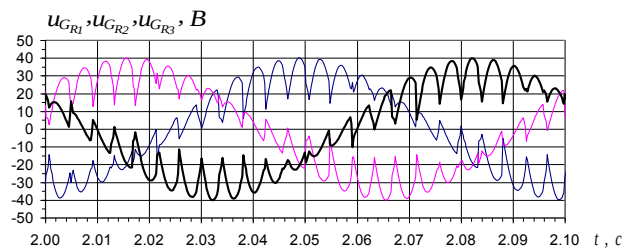
$u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ – напруги 4-6 фазних гілок роторів АМ;



в

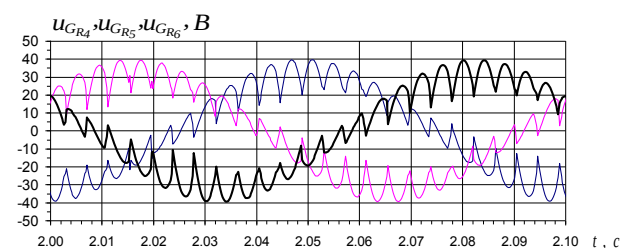
$u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ – напруги 7-9 фазних гілок роторів АМ;

Рис. 2 – Розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок роторів машин модулятора.



а

$u_{GR1}, u_{GR2}, u_{GR3}$ – напруги фаз I-ї зірки ротора АСГ;



б

$u_{GR4}, u_{GR5}, u_{GR6}$ – напруги фаз II-ї зірки ротора АСГ;

Рис. 3 – Розрахункові залежності напруг фазних гілок першої та другої зірок ротора асинхронізованого генератора

На рис. 4 а зображені фазні струми $i_{G_{R1}}, i_{G_{R2}}, i_{G_{R3}}$ першої зірки обмотки ротора генератора, а на рис. 4 б зображені фазні струми $i_{G_{R4}}, i_{G_{R5}}, i_{G_{R6}}$ другої зірки обмотки ротора генератора.

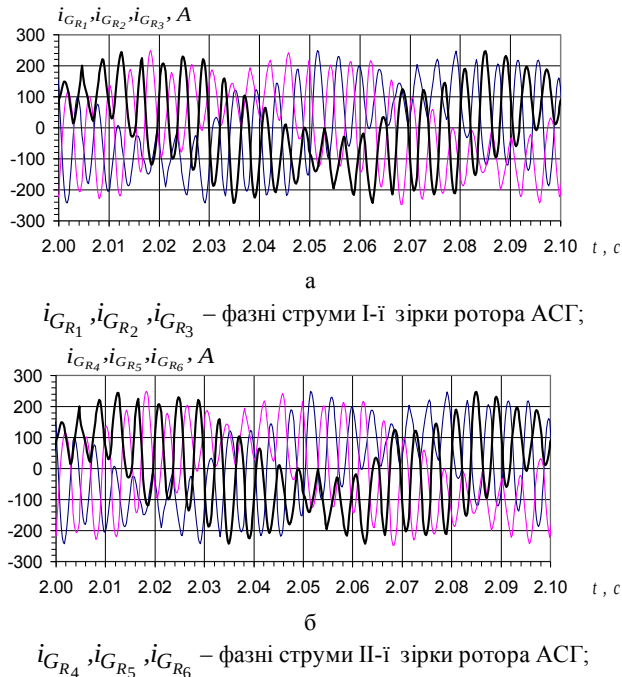


Рис. 4 – Розрахункові залежності струмів фазних гілок першої та другої зірок ротора асинхронізованого генератора

З цього рисунку видно, що струми фазних гілок ротора генератора також мають близьку до синусоїди форму, що є логічним стосовно форм відповідних напруг рис. 3.

Намагнічувальна сила генератора створюється пів-сумою струмів фазних гілок ротора першої та другої зірок (для схеми АСГ з двома зірками), тобто $i_{G_{\mu j}} = (i_{G_{Rj}} + i_{G_{Rj+3}}) / 2$ ($j = 1, 2, 3$). Від форми та величини цих струмів залежить форма і амплітуда фазних напруг статора генератора. Тому для аналізу електромагнітних процесів принципово важливо мати функційні залежності цих струмів, які слугують еквівалентом намагнічувальної сили генератора.

На рис. 5. зображені розрахункові залежності усереднених струмів фазних гілок ротора генератора першої та другої зірок. Цей рисунок виразно ілюструє синусоїдну форму струмів, які є еквівалентом намагнічувальної сили ротора генератора, що аргументовано дає підставу очікувати синусоїдну форму фазних напруг статора генератора.

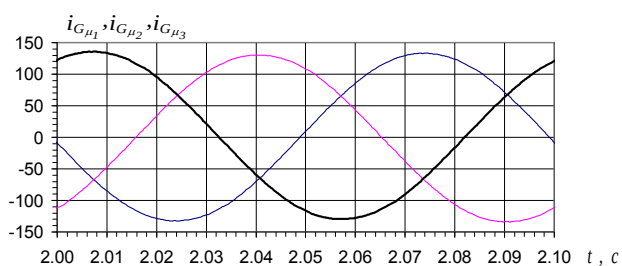


Рис. 5 – Розрахункові залежності половини суми струмів фазних гілок ротора генератора $i_{G_{\mu 1}}, i_{G_{\mu 2}}, i_{G_{\mu 3}}$.

З погляду остаточного результату в контексті роботопридатності генератора достатньо повну відповідь можна отримати на підставі аналізу форми кривих фазних напруг статора генератора, які зображені на рис. 6. З цього рисунку виразно видно, що криві фазних напруг статора генератора мають синусоїдну форму частотою $f=50$ Гц, хоча ковзання генератора є доволі великим і становить $S=0,2$. Крім цього, амплітуда напруги має строго визначене значення, яке дорівнює $U_m=310$ В, адже саме на це значення налаштована система автоматичного регулювання напруги, яка зреалізована пропорційно-інтегральним регулятором.

В статті наведено аналіз електромагнітних процесів для постійного ковзання та для однієї схеми модулятора і генератора. В перспективі ставиться за мету проаналізувати динамічні режими (для змінного ковзання) з врахуванням всіх інших можливих схем силового кола асинхронізованого генератора і його системи збудження.

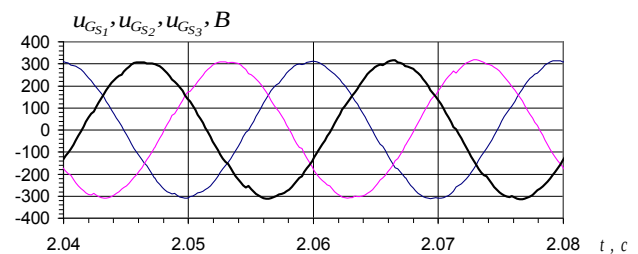


Рис. 6 – Розрахункові залежності $u_{G_{S1}}, u_{G_{S2}}, u_{G_{S3}}$ фазних напруг статора генератора.

Висновки. Досліджено вплив параметрів роторів машин каскадного модулятора напруги на перебіг електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора. На підставі аналізу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній системі збудження асинхронізованого генератора встановлено, а математичним моделюванням підтверджено, що значення параметрів машин модулятора мають визначальний вплив на функціонування тиристорного комутатора, а значить і системи збудження загалом. Встановлено, що збільшення співвідношення витків обмоток статора і ротора машин модулятора дає змогу розширити робочий діапазон ковзання до $S=0,2$ (проти відомого $S=0,06$), що, своєю чергою, сприяє розширенню області практичного застосування таких генераторів.

Список літератури

1. Василів К. М. Математична модель безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск „Силовa електроніка та енергоефективність”. – 2003. – Частина 3. – С.72–79.
2. Василів К. М. Математичне моделювання динамічних процесів неробочого ходу автономної електроенергетичної системи на базі генератора з безконтактним трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск „Силовa електроніка та енергоефективність”. – 2004. – Ч. 2. – С.99–105.
3. Василів К. М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М.

- Василів // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С.50–55.
4. Василів К. М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 2. – С.54–60.
 5. Василів К. М. Узагальнена математична модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем за нульовою схемою / К. М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: – 2009. – № 2. – С. 15–20.
 6. Галиновский А. М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / Галиновский А. М. // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромеханотронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. –1997. – С.182 – 192.

References (transliterated)

1. Vasylyv K. M. Matematychna model bezkontaktynogo asynkronizovanogo generatora z tryfazno-tryfaznym modulovanyim zbudzhuvachem. Texnichna elektrodynamika: Tematychnyj vypusk „Sylova elektronika ta energoefektyvnist”. 2003. Chastyna 3. p.72–79.
2. Vasylyv K. M. Matematychna modelyuvannya dynamichnyx procesiv nerobochogo ходу avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy` na bazi generatora z bezkontaktyn`m tryfazno-tryfazny`m kaskadnym modulovanyim zbudzhuvachem. Texnichna elektrodynamika: Tematychnyj vypusk „Sylova elektronika ta energoefektyvnist”. 2004. Ch. 2. p. 99–105.
3. Vasylyv K. M. Matematychna model` dynamichnyx procesiv avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy na bazi bezkontaktynogo asynkronizovanogo generatora z tryfazno-tryfazny`m kaskadnym modulovanyim zbudzhuvachem. Texnichna elektrodynamika. 2004. No 5. P. 50–55.
4. Vasylyv K. M. Matematychna model` dynamichnyx procesiv avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy na bazi bezkontaktynogo asynkronizovanogo generatora z dvofazno-tryfaznym kaskadnym modulovanyim zbudzhuvachem. Texnichna elektrodynamika. – 2005. – No 2. – S.54–60.
5. Vasylyv K. M. Uzagalnena matematychna model avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy na bazi asynkronizovanogo generatora z bezkontaktynym kaskadnym tryfazno-tryfaznym modulovanyim zbudzhuvachem za nulovoyu sxemoyu Elektrotehnika i elektromexanika. Kharkov: 2009. No 2. P. 15–20.
6. Galynovskiy A. M. Beskontaktnyj asynkronizirovannyj generator s modulirovannym preobrazovatelem chastoty. Trudy I Mezhdunarodnoj (III Vserossyskoy) konferencyi` po Elektromexanotronyke. Sankt-Peterburgskiy gos. elektrotehn. un-t. 1997. P.182-192.

Надійшла (received) 15.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора за схемою у дві зірки на базі трифазно-трифазного модулятора напруги / К. М. Василів // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 48-52. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Закономерности электромагнитных процессов бесконтактной системы возбуждения асинхронизированного генератора по схеме в две звезды на базе трехфазно-трехфазного модулятора напряжения / К. Н. Васылив // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 48-52. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Regularities of electromagnetic processes in the contactless excitation system of an asynchronous generator following a two-star scheme based on a threephase-threephase voltage modulator / K. M. Vasylyv // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 48-52. Bibliography: 6. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Василів Карл Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри „Електричні станції” Національного університету „Львівська політехніка”, м. Львів; тел.: 0972453821; e-mail: karl.vasylyv@gmail.com.

Васылив Карл Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры „Электрические станции” Национального университета „Львівська політехніка”, г. Львов; тел.: 0972453821; e-mail: karl.vasylyv@gmail.com.

Vasylyv Karl Mykolayovych – Doctor of Engineering Sciences, Professor, of the Department of Electric Power Stations „Lviv polytechnic” National university, Lviv; tel 0972453821; e-mail: karl.vasylyv@gmail.com.

УДК 621.313

В. П. ШАЙДА, Е. Ю. ЮРЬЕВА, Д. А. ГРИНЬ

АНАЛИЗ ПУТЕЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДТН-45/27, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПРИВОДА РУДНИЧНОГО КОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Проведено порівняльний аналіз параметрів та конструкцій тягових двигунів постійного струму. Визначено технічні рішення, які дозволяють підвищити техніко-економічні показники тягового двигуна. Визначено переваги та вади конструкцій та технології виготовлення тягових двигунів постійного струму. Запропоновано спосіб збільшення годинної потужності двигуна постійного струму типу ДТН-45/27. Запропоновано конструктивні рішення, які підвищують надійність двигуна при експлуатації в шахті.

Ключові слова: рудниковий контактний електровоз, тяговий двигун постійного струму, годинна потужність, клас нагрівостійкості ізоляції, вакуум-нагнітальне просочення якоря.

Проведен сравнительный анализ параметров и конструкций тяговых двигателей постоянного тока. Выявлены технические решения, позволяющие повысить технико-экономические показатели тягового двигателя. Выявлены преимущества и недостатки в конструкции и технологии производства тяговых двигателей постоянного тока. Предложен способ увеличения часовой мощности двигателя постоянного тока типа ДТН-45/27. Предложены конструктивные решения, которые повышают надежность двигателя при эксплуатации в шахте.

Ключевые слова: рудничный контактный электровоз, тяговый двигатель постоянного тока, часовая мощность, класс нагревостойкости изоляции, вакуум-нагнетательная пропитка якоря.

Purpose. A comparative analysis of parameters and designs DC traction motors to identify technical solutions aimed at improving the technical and economic indicators. **Methodology.** On the basis of the comparative analysis revealed strengths and weaknesses in the design and manufacture technology of traction motors DC. **Results.** The situation was considered in the operation of technological transport of iron ore mines at the present time. The main directions of modernization of contact electric locomotive for mines especially K14 were identified. The analysis of the structure and parameters traction motor DC type DTH-45/27 and its analogs were done. A way to increase the hourly power traction motor DC type DST-45/2 was proposed. **Originality.** The novelty of the results was achieved by integration of the design and manufacture technology of traction motors DC type DTH-45/27. **Practical value.** Ways of increasing the power of traction motors DC in long-term and short-term work were proposed. We support the method of control, motor monitoring and protection against overheating.

Keywords: miner contact electric locomotive, traction motor DC, hourly power, insulation system, vacuum-injection steep armature.

Введение. В настоящее время на железорудных шахтах Украины основным технологическим транспортом являются рудничные контактные электровозы с двигателями постоянного тока [1].

Такая ситуация, с первого взгляда, кажется нелогичной, ведь за рубежом основную массу составляют электровозы с приводом от асинхронных двигателей. Мало того, необходимость перехода на привод от асинхронных двигателей уже давно обоснована нашими учеными не только для рудничного [2], но и железнодорожного, и городского электротранспорта. Даже более того, в Украине уже создан и прошел предварительные испытания в шахте отечественный рудничный электровоз с асинхронным электроприводом [3].

Однако экономический кризис и необходимость больших капитальных вложений не позволяют отказаться от существующего парка рудничных электровозов с двигателями постоянного тока, который составляет несколько тысяч штук [4]. Более того, проводятся работы по повышению надежности и модернизации существующего парка рудничных электровозов [2, 5].

В Украине широко используются рудничные электровозы типа К10 и К14 (и их модификации), производителями которых являются: ГП «НПК Электровозостроение» (г. Днепропетровск, Украина), ЧАО ПКФ «Амплитуда» (г. Донецк, Украина) и ОАО «Александровский машиностроительный завод» (г. Александровск, Россия).

Остановимся на рудничном электровозе К14, как наиболее перспективном для модернизации. Для привода электровоза используются два тяговых двигателя типа ДТН-45/27, выполненных с

последовательным возбуждением.

Работы, проводимые по модернизации рудничного электровоза К14, можно разделить на два направления:

1) улучшение системы управления, что включает замену существующих резисторных систем управления тяговым двигателем постоянного тока (ТДПТ) на импульсные регуляторы [2];

2) модернизация самого ТДПТ с целью повышения его технико-экономических параметров и надежности [5, 6], что особенно актуально из-за частых поломок и выходов электрооборудования из строя.

Как уже писалось в [5], долгое время основным производителем ТДПТ типа ДТН-45/2 и систем управления к нему являлось ПАО «Электромашина» (г. Харьков, Украина), что было связано со специализацией заводов в СССР. Однако, после обретения Украиной независимости, ситуация изменилась – появились производители аналогичного электропривода как в Украине, так и в России. Естественно, что конкуренция между производителями подтолкнула их к проведению работ по улучшению (модернизации) данного электропривода. К тому же, в последнее время, потребители выдвигают требования к повышению мощности ТДПТ, как в длительном, так и в часовом режиме работы.

Поэтому задача модернизации ТДПТ типа ДТН-45/2 с целью повышения мощности в существующем габарите является актуальной.

Цель работы. Проведение сравнительного анализа параметров и конструкции ТДПТ типа ДТН-45/27 с его аналогами для выявления

технических решений, позволяющих повысить его технико-экономические показатели. Поиск путей повышения мощности ТДПТ в режиме работы S2 с 45 кВт до 60 кВт, с сохранением габаритов двигателя.

Конструкция ТДПТ типа ДТН-45/27 и его аналогов. Аналогами двигателя ДТН-45/27 являются двигатели: ДК-812, СТК-45 и ДТНР-45. Рассмотрим по порядку конструкцию и отличия указанных двигателей.

Внешний вид двигателя ДТН-45/27 производства ПАО «Электромашина» показан на рис.1.



Рис. 1 – Внешний вид ТДПТ типа ДТН-45/27

Двигатель имеет классическую конструкцию с явновыраженными полюсами, конструктивное исполнение: горизонтальное, защищенное (IP43, обеспечивается корпусом электровоза), с самовентиляцией (IC01), рудничное нормальное (РН1) и с одним выступающим концом вала конической формы. Это описание характерно и для аналогов данного двигателя.

Конструкция двигателя ДТН-45/27 показана на рис. 2. Магнитная система состоит из стального остова 5 цилиндрической формы, сверху остова размещена коробка выводов с четырьмя

сальниковыми вводами для подвода кабелей питания. С двух сторон корпус закрыт подшипниковыми щитами, которые вместе с крышками 2 и 20 образуют подшипниковые камеры.

В остова со стороны коллектора расположено окно для доступа к коллектору 3, траверсе 4 и щеткам, установленным в щеткодержателях 22. Со стороны привода предусмотрено вентиляционное окно и отверстие для слива смазки, закрытое пробкой 21. Коллекторное окно закрыто фильтром 6, а вентиляционное окно – крышкой-жалюзи.

К остову с помощью шпилек и болтов крепятся главные 13 и добавочные 12 полюса с насаженными на них катушками 14 и 9 соответственно. Сердечники главных полюсов шихтуются из листов электротехнической стали, сердечники добавочных полюсов выполнены из стальной поковки. Катушки полюсов изготавливаются из изолированного провода марки ПСДКТ – Л, изоляция которого выполнена по классу нагревостойкости Н.

Сердечник якоря 10 состоит из листов электротехнической стали марки 2212, которые нашитованы на вал между нажимными кольцами 7 и 17. В пазы сердечника якоря укладывается обмотка якоря 16, которая выполнена из жестких секций и закреплена в пазовой части клиньями, а в лобовых – стеклобандажом. Обмотка якоря – волновая, система изоляции обмотки относится к классу нагревостойкости F. Коллектор 3 арочного типа закреплен на стальном корпусе.

Щеточный узел состоит из траверсы 4, которая установлена на подшипниковом щите. К траверсе крепятся два brackets, с двумя щеткодержателями на каждом, т.е. всего четыре щетки.

Вал якоря вращается в подшипниках качения: шарикоподшипнике 1 – со стороны коллектора и роликоподшипнике 19 – со стороны привода. Подшипники закрыты крышками 2 и 20 соответственно. Подшипниковый щит 18 имеет замок для посадки корпуса редуктора.

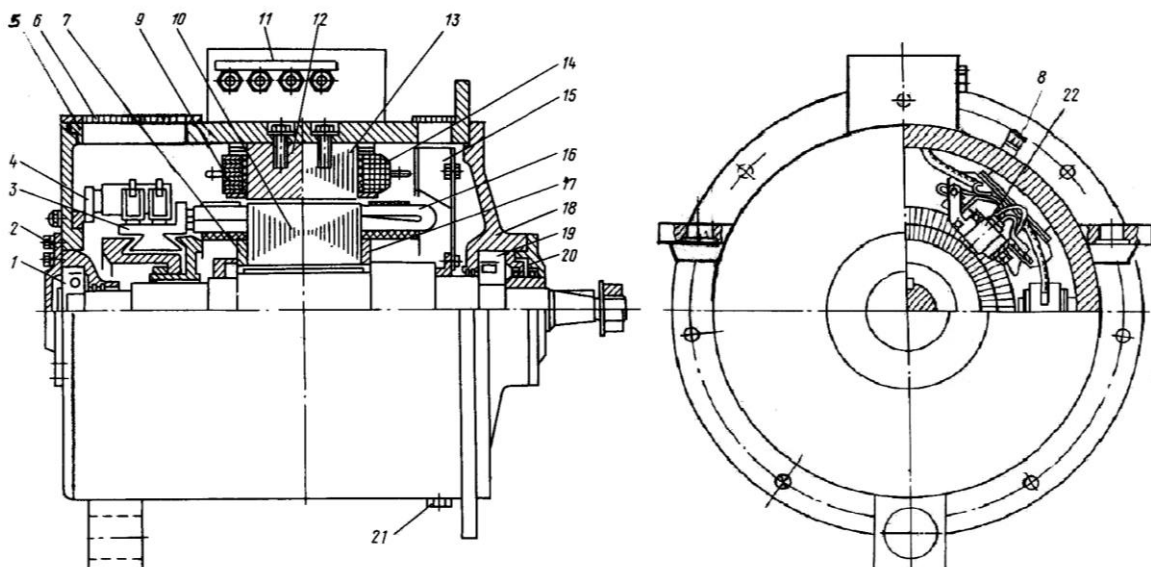


Рис 2 – Конструкция двигателя типа ДТН-45/27

Охлаждение двигателя осуществляется с помощью встроенного вентилятора, установленного внутри корпуса, на валу, со стороны привода. Охлаждающий воздух поступает в двигатель со стороны коллектора и выбрасывается со стороны привода через вентиляционные окна.

Появление конкуренции, повышение требований потребителей к параметрам и надежности двигателей привело к необходимости модернизации как двигателя ДТН-45/27 та и других выпускаемых двигателей на ПАО «Электромашина». Поэтому предприятие несколько лет назад приобрело установку вакуумной пропитки, а затем и вторую установку вакуум-нагнетательной пропитки. Это позволило перейти на изготовление всех обмоток машин постоянного тока с изоляцией класса нагревостойкости Н. Проведя комплекс мероприятий, предприятию удалось повысить длительную мощность двигателя с 27 кВт до 35 кВт, а часовую с 45 кВт до 50 кВт (однако в технических условиях на двигатель заявлено только об увеличении длительной мощности). Увеличение мощности обеспечено путем изменения класса нагревостойкости изоляции якоря с F на H и внедрением прогрессивного пропиточного компаунда «ЭПЛАСТ 180-ИД» для пропитки обмоток двигателя в вакуум-нагнетательной установке вместо лака КО-916к. Также был изменен вентилятор – увеличена длина его лопаток, что позволило существенно улучшить теплоотдачу от обмоток к корпусу.

Внешний вид двигателя ДК-812 показан на рис. 3. Двигатель ДК-812 производился на заводе «ДИНАМО» (г. Москва, Россия), сейчас завод уже не существует, но производством данного двигателя занимаются несколько российских предприятий [6].



Рис. 3 – Внешний вид ТДПТ типа ДК-812

Конструкция двигателя ДК-812 не имеет существенных отличий от модернизированного двигателя ДТН-45/27. Незначительные отличия – вместо крышки-жалюзи установлено две крышки с сетками со стороны коллектора, а встроенный вентилятор отливается из высокопрочного алюминиевого сплава (в ДТН-45/27 он стальной). Также в описании [6] указано, что передний

подшипниковый щит имеет возможность небольшого поворота для правильной установки щеткодержателей на нейтрالي. Это говорит о том, что brackets жестко закреплены на подшипниковом щите, и установка нейтралей возможна только до монтажа двигателя на электровозе.

Двигатель СТК-45 производства «НПП «Смелянский электромеханический завод» (г. Смела, Украина) – недавняя разработка [7]. Внешний вид двигателя СТК-45 показан на рис. 4.



Рис. 4 – Внешний вид ТДПТ типа СТК-45

В двигателе СТК-45 также применена система изоляции класса нагревостойкости Н. Есть изменения в клеммной коробке и вместо трех добавочных полюсов установлено четыре, что улучшает условия коммутации двигателя. Однако есть и недостатки: вместо роликового двигателя установлен шариковый, увеличено количество окон для обслуживания коллектора, а также другие, которые подробно описаны в [5].

Двигатель ДТНР-45 производит ООО «Харьковский завод электрических машин» (г. Харьков, Украина) [8]. В конструкции этого двигателя тоже используется система изоляции класса нагревостойкости Н. Если рассматривать принципиально, то данный двигатель является клоном двигателя ДТН-45/27. Но в описании [8] указано, что применение современных материалов в электродвигателях позволило увеличить ресурс работы электродвигателей до 8000 часов, мощность в кратковременной нагрузке – в среднем на 3-5 кВт. Применение новых технологий точного литья корпусов позволило уменьшить вес корпусов, Вал изготавливается из покованной стали. Также в обмотку возбуждения двигателя устанавливаются датчики для контроля его температуры.

Анализируя конструкцию рассмотренных двигателей, можно сделать вывод, что все производители используют систему изоляции класса нагревостойкости Н как для магнитной системы, так и для якоря. Практически у всех двигателей увеличена длительная мощность до 35 кВт. Также вносятся изменения в расположение вентиляционных окон и конструкцию коробки выводов, однако они не всегда оправданы исходя из условий эксплуатации

двигателя.

Анализ рекомендаций по модернизации. Рассмотрим предложения, приведенные в работе [5], которые даны для повышения конструкционной надежности и долговечности двигателя ДТН-45/27, а именно:

1) разместить вентиляционные отверстия на вертикальных поверхностях с защитой их от брызг, как это показано на рис. 5;

2) улучшить уплотнение крышки клеммной коробки;

3) для повышения стойкости двигателя к вибрациям и технологическим ударам капсулировать лобовые части якорной обмотки эпоксидным компаундом;

4) для контроля текущего состояния электрических параметров тягового двигателя предложен способ бесконтактного контроля, мониторинга и защиты.

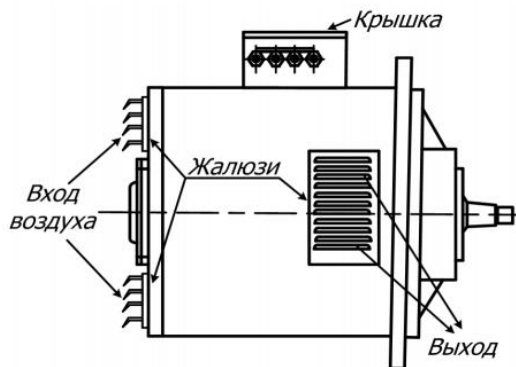


Рис. 5 – Вариант размещения вентиляционных окон в двигателе [5]

С размещением окон, показанным на рис. 5, трудно согласиться, т.к. электровоз зачастую проходит участки пути, где вода доходит до оси колесной пары, а это чревато попаданием влаги в двигатель, особенно для окна для входа воздуха, размещенного внизу подшипникового щита. К тому же все равно нельзя отказаться от окон со стороны коллектора, т.к. они необходимы для обслуживания щеточного узла.

Переход на вакуум-нагнетательную пропитку якоря в компаунде «ЭЛПЛАСТ 180-ИД» решает проблему повышения стойкости двигателя к вибрациям и технологическим ударам. Уплотнение крышки клеммной коробки действительно повысит эксплуатационную надежность двигателя в целом. При последующем производстве в двигателях в базовой комплектации должна предусматриваться аппаратура бесконтактного контроля.

В настоящее время заказчик предложил ПАО «Электромашина» повысить часовую мощность двигателя ДТН-45/27 с 45 кВт до 60 кВт без изменения габарита. Поэтому авторами статьи, в сотрудничестве с СКБ предприятия, намечены пути достижения этой цели и план исследований.

Выводы. 1. Рассмотрена ситуация, сложившаяся в настоящее время, в эксплуатации технологического транспорта железорудных шахт. Рассмотрены

основные направления модернизации рудничных контактных электровозов, в частности электровоза К14.

2. Выполнен анализ конструкции и параметров ТДПТ типа ДТН-45/27 и его аналогов, в результате которого выделены основные направления его развития (модернизации). Также рассмотрены предложения по модернизации ТДПТ типа ДТН-45/27 предложенные в работе [5]. В частности мы не согласны с переносом отверстий для входа охлаждающего воздуха на подшипниковый щит, особенно если эти проемы располагаются ниже оси вала двигателя. В тоже время поддерживаем предложенный способ контроля, мониторинга и защиты двигателя от перегрева.

3. Предложен путь повышения часовой мощности ТДПТ типа ДТН-45/2.

Список литературы

1. Бутт Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание: в 2-х т. / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый [и др.]. Под общ. ред. Б. А. Грядущего. – Т. 1. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.
2. Синчук И. О. К вопросу выбора типа и системы управления тяговым электроприводом рудничных электровозов / И. О. Синчук, К. П. Ляпота, Э. С. Гузов, О. Е. Мельник // Електротехнічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 1/2007 (1). – 2007. – С. 27–31.
3. Синчук О. Н. Синергетический тяговый асинхронный электротехнический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза / О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа, Э. С. Гузов, Ф. И. Караманец // Електротехнічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 4/2011 (16). – 2011. – С. 65–68.
4. Дебелый В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельник // Уголь Украины. – № 6. – 2006. – С. 30–31.
5. Синчук О. Н. Вопросы повышения надежности системы мониторинга температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, Д. О. Кальмус, В. О. Чорная // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 4/2014 (87). – 2014. – С. 44–50.
6. Официальный сайт ООО «Первая горная компания». – Режим доступа: <http://www.1gc.ru/oborudovanie-dlya-rudnichnyh-elektrovozov/elektrodvigatel-dk-812>. – Дата обращения: 20 сентября 2016.
7. Официальный сайт «НПП «Смелянский электромеханический завод». – Режим доступа: <http://www.semz.info/ru/catalog/stk45.html>. – Дата обращения: 20 сентября 2016.
8. Официальный сайт ООО «Харьковский завод электрических машин». – Режим доступа: <http://hzem.biz/elektrodvigateli-dlya-kontaktnyh-el>. – Дата обращения: 20 сентября 2016.

References (transliterated)

1. Butt Yu. F., Gryaduschiy V. B., Debelyiy V. L., Koval' A. N., Furman A. L., Schuka V. M., Yatsenko V. A. *Shahtnyiy podzemnyiy transport: spravochnoe izdanie: v 2-h t.* [Mine underground transport: a reference book: in 2 vol., Vol. 1, Donetsk: «VIK», 2009, 481 p.
2. Sinchuk I. O., Ljapota K. P., Guзов Je. S., Mel'nik O. E. K voprosu vybora tipa i sistemy upravlenija tјagovym jelektroprivodom rudnichnyh jelektrovozov [On the question of the choice of the type and control system electric traction miner electric locomotives]. *Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*. Release 1/2007 (1), 2007, p. 27–31.
3. Sinchuk O. N., Shokarev D. A., Skapa E. I., Guзов Je. S., Karmanec F. I. Sinergeticheskij tјagovyj asinhronnyj jelektrotehnicheskij privod dlja kontaktno-akkumulјatornogo dvuhosnogo elektrovoza [Synergetic asynchronous traction drive

- for electrical contact battery two-axle locomotive]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*. Release. 4/2011 (16), 2011, p. 65–68.
4. Debelyj V. L., Debelyj L. L., Mel'nik S. A. Osnovnye napravleniya razvitiya shahтного локомотивного транспорта [The main directions of development of the mine locomotive transport.]. *Ugol' Ukrainy – Ukraine Coal*. 2006, no. 6, p. 30–31.
 5. Sinchuk O. N., Guzov Je. S., Sinchuk I. O., Kal'mus D. O., Chornaja V. O. Voprosy povysheniya nadezhnosti sistemy monitoringa temperaturnykh rezhimov tzhagovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh elektrovovozov [Questions of increase of reliability of the monitoring system of temperature modes of traction electric motors mine electric locomotives]. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho – Bulletin of Kremenchuk National University named Mykhailo Ostrogradsky*. Release. 4/2014 (87), 2014, p. 44–50.
 6. Official site «ООО «Pervaja gornaja kompanija». – Available at: <http://www.1gc.ru/oborudovanie-dlya-rudnichnyh-elektrovovozov/elektrodvigatel-dk-812>. (accessed 20.09.2016).
 7. Official site «NPP «Smeljanskij jelektromehanicheskij zavod». – Available at: <http://www.semz.info/ru/catalog/stk45.html>. (accessed 20.09.2016).
 8. Official site «ООО «Har'kovskij zavod jelektricheskikh mashin». – Available at: <http://hzem.biz/elektrodvigateli-dlya-kontaktnyh-el>. (accessed 20.09.2016).

Поступила (received) 02.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз шляхів модернізації тягового двигуна постійного струму ДТН-45/27, призначеного для привода рудникового контактного електровоза / В. П. Шайда, О. Ю. Юр'єва, Д. О. Гринь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 32 (1204). – С. 53–57. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

Анализ путей модернизации тягового двигателя постоянного тока ДТН-45/27, предназначенного для привода рудничного контактного электровоза / В. П. Шайда, Е. Ю. Юрьева, Д. А. Гринь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 32 (1204). – С. 53–57. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

Analysis of ways to modernize the traction motor DC DTH-45/27 for the drive of miner contact electric locomotive / V. P. Shayda, O. Yu. Yurieva, D. O. Hryn' // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No. 32 (1204). – P. 53–57. – Bibliogr: 8. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шайда Віктор Петрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

Шайда Виктор Петрович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

Shayda Viktor Petrovich – Ph.D., Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

Юр'єва Олена Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

Юрьева Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

Yurieva Olena Yuriyivna – Ph.D., Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

Гринь Дмитро Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент.

Гринь Дмитрий Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент

Hryn` Dmytro Oleksandrovych – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», student.

И. В. ХОМЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО СХЕМЕ ГЛУБОКОГО ВВОДА

Проведен расчет параметров установившегося режима электрической сети по схеме глубокого ввода методом Ньютона. Исследовано влияние на параметры режима электрической сети суточной неравномерности электрической нагрузки, а также величин продольной компенсации мощности ЛЭП (X_C) и величины компенсации реактивной мощности у потребителя (Q_C).

Ключевые слова: электрическая сеть, параметры режима, узловые уравнения, метод Ньютона, суточная неравномерность нагрузки, продольная компенсация, компенсация реактивной мощности.

Проведено розрахунок параметрів усталеного режиму електричної мережі за схемою глибокого введення методом Ньютона. Исследовано впливу на параметри режиму електричної мережі добової нерівномірності електричного навантаження, а також величин поздовжньої компенсації потужності ЛЕП (X_C) і величини компенсації реактивної потужності у споживача (Q_C).

Ключові слова: електрична мережа, параметри режиму, вузлові рівняння, метод Ньютона, добова нерівномірність навантаження, поздовжня компенсація, компенсація реактивної потужності.

The calculation of the parameters of the steady mains mode according to the scheme of deep feeding Newton method. It is follow-influence on the parameters of the mains mode of daily non-uniformity of the electric load, as well as the values of the longitudinal compensation of power transmission lines (X_C) and the value of reactive power compensation in the consumer (Q_C).

Keywords: electric network mode settings, the nodal equations, Newton's method, the daily load uneven longitudinal someone overcancellation, reactive power compensation.

Введение. Расчеты установившихся режимов электрических сетей являются самыми распространенными видами расчетов. Их результаты используются в практике эксплуатации, а также при проведении проектных и научно-исследовательских работ. По оценкам специалистов доля расчетов установившихся режимов электрических сетей в общей расчетной практике составляет около 70%. Функционирование современных автоматизированных систем, обеспечивающих надежную и эффективную работу систем электроснабжения, неразрывно связано с необходимостью решения задач информационно-вычислительного обслуживания и многократного проведения расчетов установившихся режимов.

Целью исследований является установление функциональных зависимостей параметров режимов электрических сетей для различных условий эксплуатации.

Теоретическая часть. Нелинейные уравнения узловых напряжений описывают установившийся режим электрической системы при задании нелинейных источников тока. В схемах замещения электрических систем нелинейные источники тока соответствуют генераторам с постоянной мощностью либо нагрузкам потребителей, заданных статической характеристикой или постоянной мощностью. Если мощность нагрузки потребителя или генератора в узле k постоянная, то узловой ток, кА, равен:

$$j_k(\dot{U}_k) = \frac{S_k^*}{\sqrt{3}U_k^*}, \quad (1)$$

где S_k^* – постоянная трехфазная мощность k узла, МВА;

U_k^* – линейное напряжение k узла, кВ;

$j_k(\dot{U}_k)$ – нелинейный источник тока, зависящий от напряжения.

В матричном виде уравнения узловых напряжений в формате баланса токов следующие:

$$Y_y \dot{U} = \sqrt{3} j(\dot{U}) - Y_{\sigma} \dot{U}_{\sigma}, \quad (2)$$

где Y_y – комплексная матрица собственных и взаимных узловых проводимостей;

$j(\dot{U})$ – вектор-столбец задающих токов, k элемент которого определяется выражением (1);

$Y_{\sigma} \dot{U}_{\sigma}$ – вектор-столбец, k элемент которого равен $Y_{k\sigma} \dot{U}_{\sigma}$;

$\dot{U}_{\sigma}$ – заданное напряжение балансирующего узла.

Уравнение баланса токов для k узла имеет следующий вид:

$$\dot{\omega}_{jk} = Y_{kk} \dot{U}_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} Y_{kj} \dot{U}_j - \frac{S_k^*}{U_k} = 0, \quad (3)$$

где Y_{kk} – собственная проводимость узла k ;

Y_{kj} – взаимная проводимость узлов k и j ;

ω_{jk} – небаланс тока в k узле, $k = 1, \dots, n$.

Уравнения узловых напряжений в форме баланса мощности и матричной записи имеют вид:

$$U_{\text{diag}}^* \left(Y_y^* U + Y_{\sigma}^* U_{\sigma} \right) = S^*, \quad (4)$$

U_{diag}^* – диагональная матрица, k диагональный элемент которой равен сопряженному комплексу напряжения k узла;

S^* – вектор-столбец, k элемент которого равен сопряженному комплексу мощности k узла.

Уравнения баланса мощностей для k узла легко получить из (3) на сопряженный комплекс напряжения узла:

$$\dot{\omega}_{\dot{S}k} = -Y_{kk} \dot{U}_k^* U_k - U_k^* \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} Y_{kj} \dot{U}_j + S_k^* = 0, \quad (5)$$

где функция $\dot{\omega}_{\dot{S}k}$ соответствует небалансу мощности в k узле, $k = 1, \dots, n$. В выражениях (4), (5) для удобства записи слагаемые $Y_{k\sigma} \dot{U}_{\sigma}^*$ и $Y_{\sigma k} \dot{U}_{\sigma}$ внесены под знак Σ , причем балансирующему узлу присвоен номер $n+1$.

Для того чтобы оперировать с вещественными величинами, выделим в уравнениях (4), (5) действи-

тельные и мнимые части.

Принимаем:

$$\dot{\omega}_{jk} = \omega_{Jak} + j\omega_{Jrk}; \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_{Sk} = \omega_{Pk} + j\omega_{Qk}, \quad (7)$$

где ω_{Jak} , ω_{Jrk} , ω_{Pk} , ω_{Qk} – собственно небалансы активных и реактивных токов и мощностей в узле k .

В качестве переменных при решении уравнений установившегося режима могут использоваться: 1) модуль и фазы напряжений в узлах U и δ ; 2) вещественные и мнимые составляющие напряжений U_a и U_r .

Уравнения баланса активного и реактивного токов при использовании переменных U_a , U_r легко получить, разделив (3) на действительную и мнимую части:

$$\omega_{Jak} = g_{kk}U_{ak} + \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} g_{kj}U_{aj} + b_{kk}U_{rk} + \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} b_{kj}U_{rj} - \frac{P_k U_{ak} + Q_k U_{rk}}{U_k^2} = 0; \quad (8)$$

$$\omega_{Jrk} = -b_{kk}U_{ak} + \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} b_{kj}U_{aj} + g_{kk}U_{rk} + \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} g_{kj}U_{rj} - \frac{P_k U_{rk} + Q_k U_{ak}}{U_k^2} = 0. \quad (9)$$

Уравнения баланса активной и реактивной мощности для k узла при переменных U_a и U_r можно записать следующим образом:

$$\omega_{Pk} = P_k - g_{kk}U_k^2 - \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} [(U_{ak}U_{aj} + U_{rk}U_{rj})g_{kj} + (U_{ak}U_{rj} - U_{rk}U_{aj})b_{kj}] = 0; \quad (10)$$

$$\omega_{Qk} = Q_k - b_{kk}U_k^2 - \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} [-(U_{ak}U_{rj} - U_{rk}U_{aj})g_{kj} + (U_{ak}U_{aj} + U_{rk}U_{rj})b_{kj}] = 0. \quad (11)$$

Уравнения баланса мощностей для k узла при переменных U , δ можно получить из (5) в следующем виде:

$$\omega_{Pk} = P_k - g_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} U_j (g_{kj} \cos \delta_{kj} - b_{kj} \sin \delta_{kj}); \quad (12)$$

$$\omega_{Qk} = Q_k - b_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{j=1, j \neq k}^{n+1} U_j (b_{kj} \cos \delta_{kj} - g_{kj} \sin \delta_{kj}). \quad (13)$$

Нелинейную систему уравнений установившегося режима в упрощенном виде можно записать следующим образом:

$$W(X) = 0, \quad (14)$$

где $W(X)$ – вектор-функция порядка n ;

X – вектор зависимых переменных порядка n :

$$W(X) = \begin{bmatrix} \omega_1(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \omega_2(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \dots \\ \omega_n(X_1, X_2, \dots, X_n) \end{bmatrix}.$$

При решении (14) по методу Ньютона на каждом шаге итерационного процесса решается линеаризованная система

$$\frac{\partial W}{\partial X} (X^{(i)}) \Delta X^{(i+1)} = -W(X^{(i)}), \quad (15)$$

где матрица производных (матрица Якоби)

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_1}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_1}{\partial X_n} \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_2}{\partial X_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \omega_n}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_n}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_n}{\partial X_n} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Следующее, т.е. $(i+1)$ -е, приближение зависимых переменных определяется по выражению

$$X^{(i+1)} = X^{(i)} + \Delta X^{(i+1)}. \quad (17)$$

Контроль сходимости осуществляется по вектору небалансов, т.е. условие

$$\omega_k(X^{(i)}) \leq \varepsilon, \quad (18)$$

должно выполняться для всех небалансов.

Примеры различной записи уравнений установившегося режима приведены выше. Если уравнения узловых напряжений записаны в осях U_a , U_r и во всех узлах заданы активные и реактивные мощности, то матрица производных может быть представлена в виде

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U_a} & \frac{\partial W_P}{\partial U_r} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U_a} & \frac{\partial W_Q}{\partial U_r} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Если для узла заданы активная мощность P_k и модуль напряжения этого узла U_k то в системе уравнений узловых напряжений вместо уравнения баланса Q_k будет уравнение

$$U_k^2 = U_{ak}^2 + U_{rk}^2, \quad (20)$$

В матрице Якоби для узлов с заданными P_k и U_k вместо производных реактивных небалансов по активным и реактивным составляющим узлов будут входить производные (20) по U_{ak} и U_{rk} . Если в качестве переменных при расчете установившегося режима выбраны модули и фазы напряжений U_k , δ_k , то

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

В выражении (19) $\frac{\partial W_P}{\partial U_a}$, $\frac{\partial W_P}{\partial U_r}$, $\frac{\partial W_Q}{\partial U_a}$, $\frac{\partial W_Q}{\partial U_r}$ – матрицы-клетки частных производных небалансов активной и реактивной мощности по активным и реактивным составляющим напряжений узлов.

В (21) $\frac{\partial W_P}{\partial U}$, $\frac{\partial W_P}{\partial \delta}$, $\frac{\partial W_Q}{\partial U}$, $\frac{\partial W_Q}{\partial \delta}$ – матрицы-клетки частных производных небалансов P и Q по модулям и фазам напряжений узлов [1].

Расчетная часть. Схема замещения распределительной электрической сети по схеме глубокого ввода представлена на рис. 1.

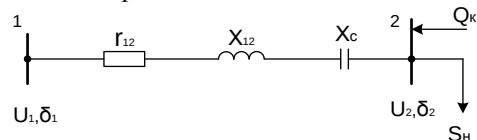


Рис. 1 – Схема замещения сети

Данные о параметрах сети и мощности нагрузки $Z_{12} = R_{12} + jX_{12} = (10 + j20) \text{ Ом}$, $U_1 = U_6 = 115 \text{ кВ}$, $\dot{S} = P_2 + jQ_2 = (-80 - j40) \text{ МВА}$, $X_c = 0 \text{ Ом}$, $Q_k = 0 \text{ МВАр}$
Проведем расчет установившегося режима сети с точностью

$$\varepsilon = 0,1 \text{ мВА.}$$

1. Рассчитаем собственные и взаимные проводимости узлов сети

$$Y_{12} = \frac{1}{R_{12} + jX_{12}} = \frac{R_{12} - jX_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} = \frac{10 - j20}{500} = (0,02 - j0,04) \text{ См},$$

$$Y_{22} = Y_{12}.$$

2. Задание начальных приближений

$$U_2^{(0)} = 110 \text{ кВ}, \quad \delta_2^{(0)} = 0$$

3. Формирование системы линейаризованных уравнений на шаге расчета.

Система нелинейных узловых уравнений для рассматриваемой схемы имеет вид:

$$-g_{22}U_2^2 - U_2U_{12}g_{21}\cos\delta_{21} + U_2U_{12}b_{21}\sin\delta_{21} + P_2 = 0;$$

$$-b_{22}U_2^2 - U_2U_{12}b_{21}\cos\delta_{21} - U_2U_{12}g_{21}\sin\delta_{21} + Q_2 = 0$$

Определим начальное приближение вектора небалансов при известных на шаге напряжениях

$$W(X^{(0)}) = \begin{bmatrix} -0,02 \cdot 110^2 + 110 \cdot 115 \cdot 0,02 \cdot \cos 0^\circ + \\ -0,04 \cdot 110^2 + 110 \cdot 115 \cdot 0,04 \cdot \cos 0^\circ + \\ + 110 \cdot 115 \cdot 0,04 \cdot \sin 0^\circ + 80 \\ -110 \cdot 115 \cdot 0,02 \cdot \sin 0^\circ + 40 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 69 \\ 18 \end{bmatrix}$$

Матрица Якоби для данной системы имеет вид

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial \delta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2g_{22}U_2 - U_{12}(g_{21}\cos\delta_{21} - b_{21}\sin\delta_{21}) + \\ -2b_{22}U_2 - U_{12}(b_{21}\cos\delta_{21} - g_{21}\sin\delta_{21}) - \\ + U_2U_{12}(g_{21}\sin\delta_{21} - b_{21}\cos\delta_{21}) \\ - U_2U_{12}(g_{21}\cos\delta_{21} - b_{21}\sin\delta_{21}) \end{bmatrix}$$

Вычислим элементы матрицы Якоби и запишем ее в следующем виде:

$$\frac{\partial W(X^{(0)})}{\partial X} = \begin{bmatrix} -2,1 & -506 \\ -4,2 & 253 \end{bmatrix}.$$

Систему линейаризованных уравнений на первом шаге можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} -2,1\Delta U_2^{(1)} - 506\Delta\delta_2^{(1)} = 69; \\ -4,2\Delta U_2^{(1)} + 253\Delta\delta_2^{(1)} = 18. \end{cases}$$

4. Оценка достигнутой точности. Небалансы мощности

$$P = 69, Q = 18.$$

больше заданной погрешности расчета.

5. Определим значения $\Delta U_2^{(1)}$ и $\Delta\delta_2^{(1)}$, решая систему линейаризованных уравнений методом Гаусса:

$$\begin{cases} \Delta U_2^{(1)} = -9,9907 \text{ кВ}; \\ \Delta\delta_2^{(1)} = -0,0949 \text{ рад} = -5,4374^\circ. \end{cases}$$

6. После определения поправок находим первое приближение переменных:

$$\begin{cases} \Delta U_2^{(1)} = 110 - 9,9907 = 100,0093 \text{ кВ}, \\ \Delta\delta_2^{(1)} = 0 - 5,4374^\circ = -5,4374^\circ; \end{cases}$$

Для достижения требуемой точности решения вычисления необходимо повторять по п. 3-6 до тех пор, пока небалансы в узлах не станут меньше заданной величины ε (табл. 1) [2].

Таблица 1 – Результаты итерационного процесса

Номер итерации	0	1	2
ΔW , макс	69	7,484	0,19
U_2 , кВ	100,0093	98,0893	98,0333
δ_2 , град	-5,4374	-6,1249	-6,1249

Основываясь на результатах расчета установившегося режима электрической сети проанализируем функциональные зависимости параметров режима от суточной неравномерности нагрузки (S_n), параметров продольной компенсации линии электропередачи (X_c) и от величины компенсации реактивной мощности у потребителя (Q_k).

Известно, что электрическая нагрузка систем электроснабжения неравномерна. Специалисты выделяют суточную, недельную и годовую неравномерности. Изменение нагрузки оказывает влияние на параметры режима электрической сети. Примем, что нагрузка у потребителя S_n изменяется от максимального до минимального значения следующим образом:
 $S_1 = (-60 - j20) \text{ МВА}; \quad S_4 = (-90 - j50) \text{ МВА};$
 $S_2 = (-70 - j30) \text{ МВА}; \quad S_5 = (-100 - j60) \text{ МВА}.$
 $S_3 = (-80 - j40) \text{ МВА};$

Характер этого влияния показан на рис. 2. Анализ приведенных результатов показывает, что с увеличением нагрузки потери активной и реактивной мощности в сети увеличиваются, кроме того увеличиваются потеря напряжения и угол δ_2 , а напряжение у потребителя снижается.

По мнению многих специалистов, одним из наиболее эффективных способов улучшения режима электрической сети является компенсация потоков реактивной мощности у потребителя. При этом снижаются потери мощности в сети, а пропускная способность линий повышается. Результаты расчетов влияния компенсации реактивной мощности на параметры режима приведены на рис. 3. Они показывают, что при компенсации падение напряжения, потери активной и реактивной мощности снижаются, а напряжение и угол δ_2 у потребителя повышаются.

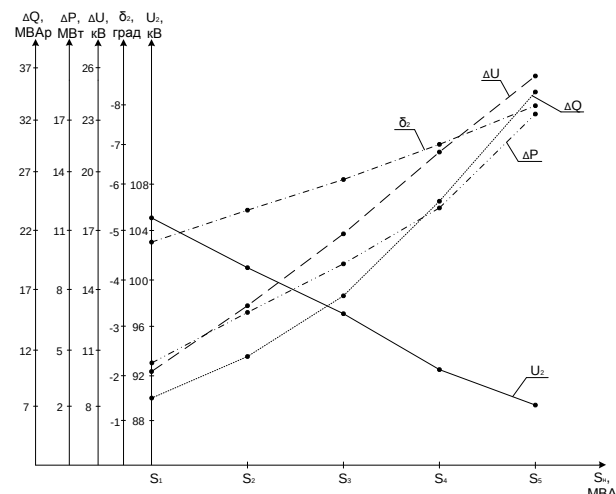


Рис. 2 – Влияние суточной неравномерности нагрузки на параметры режима

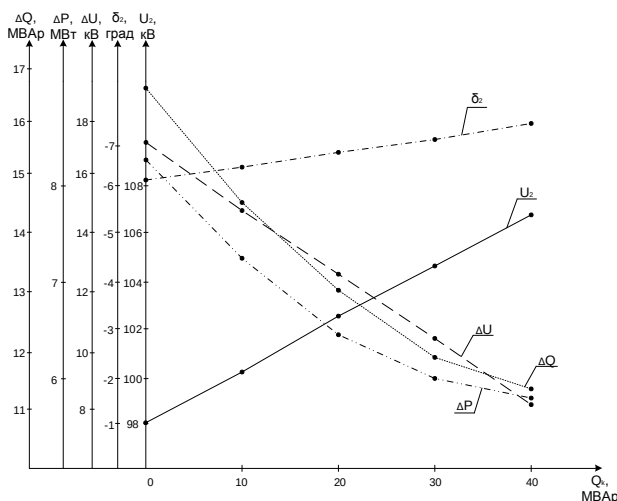


Рис. 3 – Влияние компенсации реактивной мощности у потребителя на параметры режима

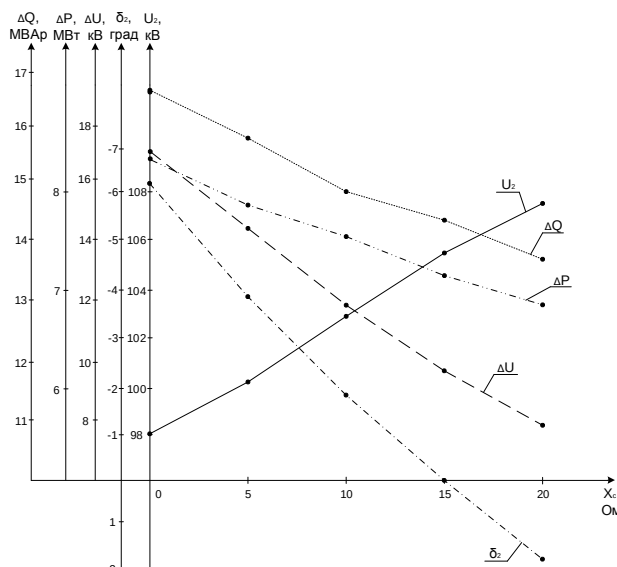


Рис. 4 – Влияние продольной компенсации ЛЭП на параметры режима

В последние годы повысился интерес к вопросам продольной компенсации параметров ЛЭП [3]. По своему влиянию увеличение величины продольной компенсации аналогично процессу увеличения компенсации реактивной мощности у потребителя. Отличие состоит во влиянии на угол δ_2 . Функциональные зависимости параметров режимов от величины продольной компенсации приведены на рис. 4.

Выводы. На основании расчетов установившихся режимов распределительной электрической сети по схеме глубокого ввода получены функциональные зависимости влияния на параметры режима суточной неравномерности электрической нагрузки, величины продольной компенсации и компенсации реактивной мощности у потребителя. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности и качества электроснабжения потребителей электроэнергии при оперативно-технологическом управлении режимами электрических сетей.

Список литературы

1. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1998.
2. Веприк Ю.Н., Бондаренко В.Е., Олейник Е.М. Математическое моделирование и диагностика режимов электрических систем. Харьков: 1997. – 194с.
3. J. Dixon et al., Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review, Proc. IEEE, 93:2144–2164, 2005 DOI:10.1109/JPROC.2005.859937

References (transliterated)

1. Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti. Pod red. V.A. Venikova, V.A. Stroeve. Moscow: Vysshaja shkola, 1998.
2. Veprik Ju.N., Bondarenko V.E., Olejnik E.M. Matematicheskoe modelirovanie i diagnostika rezhimov elektricheskikh sistem. Kharkov: 1997. 194 p.
3. J. Dixon et al., Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review, Proc. IEEE, 93:2144–2164, 2005 DOI:10.1109/JPROC.2005.859937.

Поступила (received) 14.09.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження робочих режимів систем електропостачання за схемою глибокого введення / І. В. Хоменко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 58-61. Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

Исследование рабочих режимов систем электроснабжения по схеме глубокого ввода / И. В. Хоменко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 58-61. Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

Study workers regimes of electric power scheme in deeply Input / I. V. Khomenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 58-61. Bibliography: 3. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хоменко Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри "Передавання електричної енергії"; тел.: (067) 572-49-70; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Хоменко Игорь Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры "Передачи электрической энергии"; тел.: (067) 572-49-70; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Khomenko Igor Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Transmission of electricity"; tel.: (067) 572-49-70; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter	3
Александров В. В. Практичні аспекти визначення ефективності розробок електротехнічної продукції	8
Александрова В. О. Зниження витрат виробництва електричних машин і апаратів при використанні аутсорсинга бізнес-процесів	12
Байда Е.И., Чепелюк А.А. Обнаружение перегорания трубчатых электронагревателей включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью по изменению тока нейтрали с помощью реле тока	16
Гришук Ю.С. Застосування мікроконтролерів при дослідженнях електричних апаратів	23
Лелюк М. А. Структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів середньої напруги	29
Пантелеят М. Г., Гуренцов Ю. В. Скінченоеlementний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити	32
Рой Ю. В., Рой В. Ф., Бурма М. Г. Гібридний пускорегулювальний апарат для розрядних ламп високого тиску	37
Шавьолкін О. О., Кожем'якін С. М. Удосконалення мережевого інвертора комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами енергії	42

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Василів К. М. Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора за схемою у дві зірки на базі трифазно-трифазного модулятора напруги	48
Шайда В. П., Юрьева Е. Ю., Гринь Д. А. Аналіз путей модернизации тягового двигателя постоянного тока ДТН-45/27, предназначенного для привода рудничного контактного электровоза	53

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І МЕРЕЖІ

Хоменко И. В. Исследование рабочих режимов систем электроснабжения по схеме глубокого ввода	58
--	----

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»**

Збірник наукових праць

Серія:
Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів

№ 32 (1204) 2016

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Б.В. Клименко,
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Болюх
Технічний редактор І. С. Варшамова

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра "Електричні апарати"
Тел.: (057) 707-69-76; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com

Обл.-вид № 24-16

Підп. до друку 25.10.2016 р. Формат 60×90 1/8. Папір офсетний.
Друк лазерний. Умов. друк. арк. 9,25.
Тираж 200 пр. Зам. № 66/172-32-2016. Ціна договірна.

Надруковано ТОВ «Друкарня «Мадрид»»
61002, Харків, вул. Максиміліанівська, 11, тел. (057) 764-03-79