

A VOLTAGE LOSS PRELIMINARY ESTIMATION IN AC BUSBARS

Purpose. The development of a universal criterion of determining busbar parameters for operating or calculating values of network power factor, as well as defining parameters of reactive power compensation devices for reducing losses and voltage drops in three-phase systems of power networks. Improvement of the method of preliminary voltage drop estimation in these systems of power networks, which allows taking into account the influence of the skin-effect, the proximity-effect, density and frequency of fundamental and higher current harmonics, depending on the design parameters of steel busbars, short-circuit ratio and operating or calculating values of network power factor.

Methodology. For preliminary estimation of voltage drop in AC busbars, the analytical expressions were used which allow taking into account the design parameters of busbars, the skin-effect, the proximity-effect, density and frequency of the first and higher current harmonics. The preliminary estimation of the full or partial voltage drop compensation, caused by action of the higher current harmonics was performed by the method of comparative analysis.

Findings. A dimensionless function is proposed for estimation of the behavior of busbar voltage drop and optimal choice of their design parameters, depending on calculating or operating values of network power factor for active-inductive and active-capacitive loads. At the design or modernization stages of the workshop networks, for needed or operating value of the network power factor, the dimensionless function allows estimating the resistance and reactance ratio of busbars for the purpose of minimizing voltage drop from overflows of reactive power in the shop networks. For the active-capacitive loads, the dimensionless function provides a preliminary estimation of the required rated value of power of the reactive power compensation devices to minimize the voltage drop in the busbars of the networks. By the improved technique of selecting the optimal busbar design parameters, with the influence of the skin-effect, proximity, density and frequency of the fundamental and higher current harmonics voltage drop was evaluated in conditions of non-sinusoidal busbar current. Depending on the short-circuit ratio and the current loads, the value of the voltage drop of busbars would increase by 1.73–2.51 times. At the maximum allowable current load value of busbars, the full compensation, and particular overcompensation of the voltage drops, caused by the action of higher current harmonics, is performed at lower values of the short-circuit ratio. In this case, the reactive power compensation devices with a smaller related capacity value can be used. At high values of the short-circuit ratio, the current load of busbars must be reduced.

Originality. A universal criterion in the form of a dimensionless function was proposed. For the operating or calculating values of network power factor, it allows choosing the optimal design parameters for steel busbars, as well as defining the parameters of reactive power compensation devices for reducing losses and voltage drops in three-phase networks power systems. The method of preliminary voltage drop estimation in AC three-phase networks power systems, which allows taking into account the influence of the skin-effect, the proximity-effect, density and frequency of the first and higher current harmonics, depending on the design parameters of steel busbars, short-circuit ratio and operating or calculating values of the network power factor was improved.

Practical value. Recommendations were proposed for reducing the voltage drop in busbars, caused by the action of higher current harmonics, depending on the short-circuit ratio of the network and the values of current loads of the steel busbars. The results of this work can be used at design or modernization stages of workshop network systems. This will provide a qualified approach to the formation of requirements for reactive power compensation devices and converters, which are sources of higher current harmonics generation.

Keywords: *busbar, voltage drop, power factor, higher harmonics, short-circuit ratio, compensation*

Introduction. The production of metallurgical energy-intensive products, the provision of technological operations applying hoisting and transport mechanisms, including crane electric drives in the shops of enterprises are quite energy-consuming [1]. Therefore, modernization of proper network power systems of enterprises of the Ukrainian metallurgical industry requires the application of modern solutions in the field of energy resource saving [2]. The wide usage of power semiconductor converters in all industries allowed increasing the energy efficiency of industrial mechanisms, reducing energy consumption, and improving the quality of manufactured products [3]. The implication of frequency-controlled electri-

cal drive systems, rectifiers and other semiconductor converters leads to generation of higher current harmonic in AC conductors [4], and also negatively affects the power factor of networks [5] which are standardized by the relevant standards of electromagnetic compatibility [6].

Literature review. Now, there are a significant number of works devoted to the influence of higher current harmonics on losses in the main elements of the network: transformers [7], semiconductor converters [8], synchronous and asynchronous electric drive systems [9], and others. The known engineering techniques for selecting and calculating busbar design parameters for shop networks (shapes, geometries, relative locations) do not allow taking into account added voltage drops [10], power losses [11], change in active [12] and reactive [13] power

balance and network non-phase symmetry [14], caused by the action of higher current harmonics. In a number of works the authors conducted research to determine the reserve of a possible increase in efficiency coefficient by compensating pulsations of active and reactive powers [15], as well as a constant component of reactive power in electric supply systems [16]. Most of the works on the busbar systems are devoted to the research on electromagnetic [17], energy [18] and thermal processes [19], identification of electrical parameters, electrical stability parameters of busbar systems for graphite furnaces [20], crucible melting furnaces, vacuum plasma electric furnaces by numerical simulation methods. All these research studies allowed increasing energy efficiency of technological processes and electromagnetic compatibility between the main elements of three-phase network power systems.

Unsolved aspects of the problem. To compensate the additional losses, power and voltage drop in busbars, caused by the action of higher current harmonics, the accurate knowledge on the network configuration is required, as well as detailed calculation of the energy system of the industrial enterprises. However, problems related to the assessment of the effect of higher current harmonic components in three-phase network power systems on voltage losses in busbars, depending on their design parameters, skin-effect, proximity, density and frequency of the fundamental and higher harmonic components are not sufficiently researched.

Therefore, the actual problem is to improve the approach to the choice of the optimum busbar design parameters, which provide voltage drop compensation, caused by the action of the higher current harmonic component, for operating or calculating certain values of network power factor.

Purpose. The purpose of this work is development of a universal criterion of determining busbar parameters for the operating or calculating values of network power factor, as well as definition of parameters of reactive power compensation devices for reducing losses and voltage drops in three-phase networks power systems. Improvement of the method of preliminary voltage drop estimation in three-phase networks power systems, which allows taking into account the influence of the skin-effect, the proximity-effect, density and frequency of the fundamental and higher current harmonics, depending on the design parameters of steel busbars, short-circuit ratio and operating or calculating values of network power factor.

Results. The parameters of the reactance (X) and resistances (R) of the current conductor significantly depend on its geometry (the ratio of height and width dimensions, proximity effect, displacement effect, current density and frequency, the presence of protective shieldings, the current conductor materials) [10]. The increases in the value of power and voltage losses in busbar systems are caused by the growth of reactance related to resistance. Therefore, when designing and choosing the geometry constructions of busbars and their placement, designers try to minimize reactance, so that the calculated value of the voltage losses corresponds to the value of the voltage loss for network power factor $\lambda = 1$. For this, it is convenient to use the non-dimensional parameters represented as a function which depends on the network power factor.

The voltage losses in three-phase busbar systems are determined by the known expression [11]

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \sin \varphi)}{U} \cdot 100\%, \quad (1)$$

where R , X are resistance and reactance of busbars, Om ; I is the effective value of busbar current, A ; U is line-to-line value of voltage, V ; φ is an angle phase shift between current and voltage, el. deg.

For further analysis, the expression (1) is transformed in the next form

$$\Delta U = \frac{R \cdot \sqrt{3} \cdot I}{U} (\cos \varphi + \text{tg} \varphi_T \cdot \sin \varphi) \cdot 100\%, \quad (2)$$

where $\text{tg} \varphi_T = X/R$ is the design parameter of the busbar.

If the busbar parameters are expressed in relative units, and we assume that $R^* = 1$, then according to (2), the character of the voltage losses ΔU will be determined by the behavior of the function

$$f(\varphi, \text{tg} \varphi_T) = \cos \varphi + \text{tg} \varphi_T \cdot \sin \varphi. \quad (3)$$

Fig. 1 shows dependence of the function $f(\varphi, \text{tg} \varphi_T)$ on the network power factor for different values of the design parameter $\text{tg} \varphi_T$ for active-inductive (Q/P) and active-capacitive (Q/S) loads. At the active inductive loads, in the Q/P zone, for the eigenvalues of $\text{tg} \varphi_T$, the function (3) will possess the value $f_{QP} = 1$ at two points: at $\lambda_1 = 1$, and the value λ_2 for the corresponding curve with $\text{tg} \varphi_T$. For example, for busbar with $\text{tg} \varphi_T = 0.35$ (curve 1, Fig. 1) the function (3) will possess the value $f_{QP} = 1$, at $\lambda_1 = 1$ and $\lambda_2 = 0.7$; for $\text{tg} \varphi_T = 0.58$ – at $\lambda_1 = 1$ and $\lambda_2 = 0.5$ (curve 2, Fig. 1). With decreasing busbar design parameter $\text{tg} \varphi_T$ the curve of the function (3) shifts to the right side, and the value of network power factor of the second point of intersection λ_2 will tend to $\lambda = 1$. At the active-capacitive loads, in the Q/S zone, the curve of the function (3) is symmetrical relative to the function curve (3) at the active-inductive loads (curves 1'–4', Fig. 1). Since in three-phase systems of workshop network usage only active-inductive loads, the curves of function (3) need considering for estimation of possibility of the voltage drop compensation in busbar systems by reactive power compensation devices. For example, at busbar design parameter $\text{tg} \varphi_T = 0.35$, for a compensation angle $\varphi_c = -5$ el. deg., the voltage drop compensation value $f_{QS} = 0.034$ p.u.; for $\varphi_c = -10$ el. deg. – $f_{QS} = 0.076$ p.u.; for $\varphi_c = -15$ el. deg. – $f_{QS} = 0.106$ p.u.

Thus, the dependences according to (3) are universal criteria, which allow, for the operating and calculating values of the network power factor, choosing optimally the busbar configuration, as well as the parameters of reactive power compensation devices for purpose reducing of capacity and voltage losses in three-phase systems of workshop network.

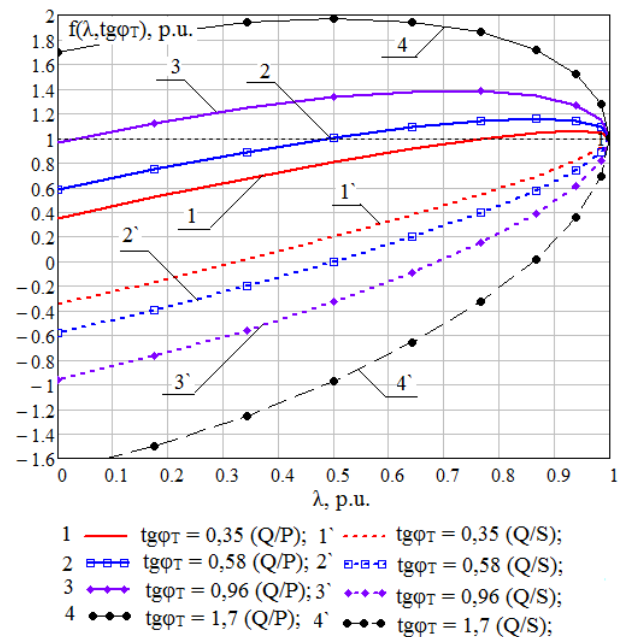


Fig. 1. Dependence of the function $f(\varphi, \text{tg} \varphi_T)$ on the network power factor for different values of the design parameter $\text{tg} \varphi_T$ at active-inductive (Q/P) and active-capacitive (Q/S) loads

To estimate the voltage losses the most widely used steel busbar system were selected. It possess the nonlinear magnetic properties, skin-effects, proximity-effect, as well as most effects of voltage losses through the influence of values and frequency first and higher current harmonics.

To estimate the voltage losses taking into account the presence of higher current harmonics, we transform equation (1) to the following form [18].

Equation (1) is transformed to the following form

$$\Delta U_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sqrt{3} \cdot I_i^2 \cdot Z_{\omega_i}}{U} \right)^2} \cdot 100\%; \quad (4)$$

$$Z_{\omega_i} = R_{\omega_i} \cdot \cos \varphi + X_{\omega_i} \cdot \sin \varphi, \quad (5)$$

where I_i is the effective current value of the i^{th} harmonics; R_{ω_i} is the resistance and reactance of the busbar for the i^{th} harmonics; X_{ω_i} is the reactance of the busbar for the i^{th} harmonics.

Resistance and reactance values of steel busbar, for the i^{th} harmonics are determined from the following expression [10]

$$R_{\omega_i} = k_{\omega_i} \cdot R_g; \quad (6)$$

$$R_g = \rho \cdot \frac{l}{q}; \quad (7)$$

$$X_{\omega_i} = i \cdot X'_{\omega_i} + 0.564 \cdot R_{\omega_i}, \quad (8)$$

where k_{ω_i} is the coefficient, which takes into account the changes in resistance at the current frequency of the i^{th} harmonics and considers the influence of skin-effect; R_g is the resistance for DC [19], Ohm; X_{ω_i} is the reactance of the busbar for the i^{th} harmonics, which consists of internal $i \cdot X'_{\omega_i}$ and external $0.564 \cdot R_{\omega_i}$ reactance, and considers the influence of the proximity-effect, Ohm; l is the active length of busbar, m; ρ is the resistivity of the material of the busbar, Ohm \cdot mm²/m; q is the cross-section of busbar, mm².

The coefficient which takes into account the changes in the resistance from the current frequency of the i^{th} harmonics for steel busbars can be determined as [11]

$$k_{\omega_i} = \begin{cases} 1 + 0.84 \cdot \beta_i^4, & \forall \beta < 1 \\ 0.758 + \sqrt{1.34 \cdot \beta_i^2 - 0.183}, & \forall \beta \geq 1; \beta \leq 3, \\ 0.758 + 1.159 \cdot \beta_i, & \forall \beta \geq 3 \end{cases} \quad (9)$$

where

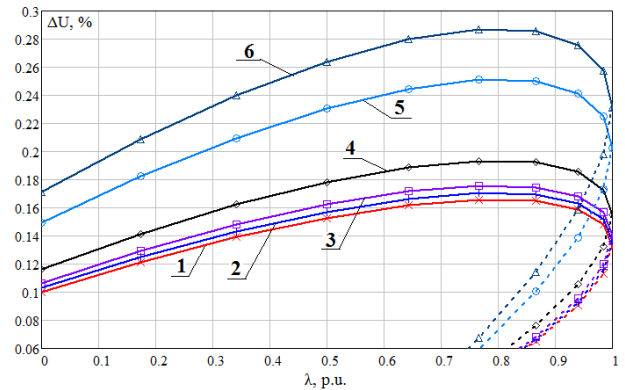
$$\beta_i = 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{q}{P} \cdot \sqrt{\frac{i \cdot f}{\rho}} \cdot \mu; \quad H = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot I}{P}, \quad (10)$$

where P is the busbar perimeter, mm; f is the frequency current of the i^{th} harmonics, Hz; μ is the magnetic permeability of the material of the busbar, H/m.

According to the expressions (4–10), Fig. 2 shows the voltage drop by 1 m of the busbar length for the first current harmonic, as well as the dependence of the resulting voltage drops at nonsinusoidal current for the angled steel of busbar (profile $60 \times 60 \times 6$, cross-section = 684 mm²) at the network power factor, on current load of more than 5000 hours with a current density $J_{\min} = 0.3$ A/mm² (Fig. 2, a); and current load up to 3000 hours, with a current density $J_{\max} = 1.2$ A/mm² (Fig. 2, b) [6].

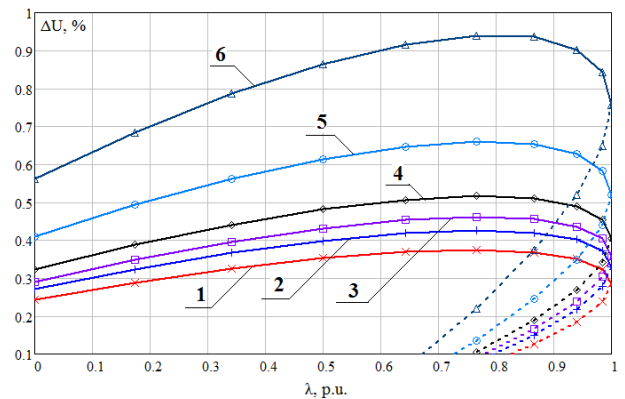
The harmonic composition of the current was determined according to the standard values of the short-circuit ratio R_{sce} , which is the ratio of the short circuit power to the total installed capacity of electrical devices (Table 1).

To analyze the results of the research and estimate the degree of influence of higher current harmonics on the voltage losses in busbars, we will use the relative value of the voltage loss changes with non-sinusoidal current for the corresponding coefficients R_{sce}



1 $\times \times \times$ 1st current harmonic (Q/P); 2 $\times \times \times$ 1st current harmonic (Q/S); 3 $\times \times \times$ 1st current harmonic (Q/S); 4 $\times \times \times$ $R_{sce}=120$, for (Q/P); 5 $\times \times \times$ $R_{sce}=250$, for (Q/P); 6 $\times \times \times$ $R_{sce}=350$, for (Q/P); 1 $\times \times \times$ $R_{sce}=33$, for (Q/S); 2 $\times \times \times$ $R_{sce}=33$, for (Q/S); 3 $\times \times \times$ $R_{sce}=66$, for (Q/S); 4 $\times \times \times$ $R_{sce}=120$, for (Q/S); 5 $\times \times \times$ $R_{sce}=250$, for (Q/S); 6 $\times \times \times$ $R_{sce}=350$, for (Q/S);

a



1 $\times \times \times$ 1st current harmonic (Q/P); 2 $\times \times \times$ 1st current harmonic (Q/S); 3 $\times \times \times$ 1st current harmonic (Q/S); 4 $\times \times \times$ $R_{sce}=120$, for (Q/P); 5 $\times \times \times$ $R_{sce}=250$, for (Q/P); 6 $\times \times \times$ $R_{sce}>350$, for (Q/P); 1 $\times \times \times$ $R_{sce}=33$, for (Q/S); 2 $\times \times \times$ $R_{sce}=33$, for (Q/S); 3 $\times \times \times$ $R_{sce}=66$, for (Q/S); 4 $\times \times \times$ $R_{sce}=120$, for (Q/S); 5 $\times \times \times$ $R_{sce}=250$, for (Q/S); 6 $\times \times \times$ $R_{sce}>350$, for (Q/S);

b

Fig. 2. Dependencies of voltage drop at sinusoidal and non-sinusoidal currents per 1 m length of steel busbar on the network power factor:

a – for $J_{\min} = 0/3$ A/mm²; b – for $J_{\max} = 1/2$ A/mm²

Table 1

Norms of generation of harmonic components of current for symmetric three-phase technical devices

| Minimal value R_{sce} p. u. | The maximum permissible value of the current harmonic component, I_i/I_1 , % | | | |
|-------------------------------|--|-----|-----|----|
| 33 | 10.7 | 7.2 | 3.1 | 2 |
| 66 | 14 | 9 | 5 | 3 |
| 120 | 19 | 12 | 7 | 4 |
| 250 | 31 | 20 | 12 | 7 |
| ≥ 350 | 40 | 25 | 15 | 10 |

$$\Delta U_{res}^* = \Delta U_{res} / \Delta U_1, \quad (11)$$

where ΔU_{res} is the resulting voltage losses at non-sinusoidal current at the corresponding coefficient R_{sce} ; ΔU_1 is the voltage losses from the first harmonic of the current in the busbars.

Tables 2 and 3 show the relative magnitudes of the increment of the voltage drop ΔU_{res}^* , caused by the action of the higher current harmonics, for the corresponding coefficients R_{sce} without (Table 2) and with (Table 3) compensation of reactive power for the minimum and maximum allowable current loads of busbars.

Table 2

Relative values of voltage drop increment
for the corresponding R_{sce} , and $J_{min} = 0.3 \text{ A/mm}^2$

| φ_c , el. deg. | Relative values of voltage drop increment ΔU_{res}^* , p.u. | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|------------|
| R_{sce} | = 33 | = 66 | = 120 | = 250 | ≥ 350 |
| Without reactive power compensation | | | | | |
| – | 1.028 | 1.061 | 1.167 | 1.515 | 1.733 |
| With reactive power compensation | | | | | |
| $\varphi_c = -5$ | 0.92 | 0.948 | 1.044 | 1.355 | 1.549 |
| $\varphi_c = -10$ | 0.811 | 0.837 | 0.92 | 1.201 | 1.371 |
| $\varphi_c = -15$ | 0.708 | 0.723 | 0.805 | 1.05 | 1.196 |
| $\varphi_c = 20$ | 0.603 | 0.621 | 0.684 | 0.893 | 1.02 |

Table 3

Relative values of voltage drop increment
for the corresponding R_{sce} , and $J_{min} = 1.2 \text{ A/mm}^2$

| φ_c , el. deg. | Relative values of voltage drop increment ΔU_{res}^* , p.u. | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|------------|
| R_{sce} | = 33 | = 66 | = 120 | = 250 | ≥ 350 |
| Without reactive power compensation | | | | | |
| – | 1.139 | 1.234 | 1.382 | 1.766 | 2.515 |
| With reactive power compensation | | | | | |
| $\varphi_c = -5$ | 1.013 | 1.22 | 1.235 | 1.578 | 2.255 |
| $\varphi_c = -10$ | 0.887 | 0.964 | 1.082 | 1.387 | 1.99 |
| $\varphi_c = -15$ | 0.766 | 0.834 | 0.935 | 1.205 | 1.744 |
| $\varphi_c = -20$ | 0.64 | 0.701 | 0.794 | 1.015 | 1.489 |

To compensate the reactive power, the increment ΔU_{res}^* was taken into account, when the angle of phase correction varied in the range $0 < \varphi_c \leq -20$ el. deg.

The analysis shows that at maximum allowable current load on busbars, full compensation and particular overcompensation of voltage losses is realized for lower values R_{sce} . For large values R_{sce} , the current load of busbars must be reduced.

Thus, the availability of higher current harmonics leads to a significant effect on the voltage drop increment in busbars. Depending on the current load and the short-circuit ratio R_{sce} , the value of voltage losses can reach 1.73–2.51. Partial or full compensation of the voltage losses for steel busbars, depending on the value of current load and the short-circuit ratio R_{sce} , is performed, when the angle of phase correction $0 < \varphi_c \leq -20$ el. deg. However, execution of correction angles $\varphi_c < -10$ el. deg., especially for large values of the short-circuit ratio R_{sce} , requires the use of reactive power compensation devices with a larger rated capacity, which is not always possible and reasonable for three-phase workshop network systems. Therefore, in order to compensate the voltage drop on availability of the higher current harmonics, it is necessary to take into account not only busbar design parameters, but also a whole complex of features: optimal value of the short-circuit ratio, value of current load, converter operation modes, as well as related capacity of reactive power compensation devices.

Conclusions. For the operating or calculating values of network power factor, the universal criterion was proposed. It allows for optimal choice of the design parameters for steel busbars, as well as defining the parameters of reactive power compensation devices for reducing losses and voltage drops in three-phase systems of power networks. The method of preliminary voltage drop estimation in AC three-phase power

networks systems, which allows taking into account the influence of the skin-effect, the proximity-effect, density and frequency of the first and higher current harmonics, depending on the design parameters of steel busbars, short-circuit ratio and operating or calculating values of network power factor was improved. With the help of the upgraded approach, the preliminary estimation of voltage drop for non-sinusoidal current of steel busbars was executed. Depending on the short-circuit ratio and the current load, the value of the voltage drop can increase by 1.73–2.51 times. Where the busbars has maximum allowable current load, the full compensation and particular overcompensation voltage losses are executed for lower values of short-circuit ratio. In this case, reactive power compensation devices can be used with a lower rated capacity. For large values of the short-circuit ratio, the busbar current load must be reduced. Due to the diversity of the converter technology and the generation by them of higher current harmonics with values of amplitudes and frequency spectrum, which differ from the limited values of the standard documents (Table 1, [6]) this problem will be researched. This research would involve development of specified approach, in the form of analytical expressions, determination of the voltage and power losses, taking into account the design parameters of busbars and their optimization, skin-effect, proximity-effect, displacement-effect, electromagnetic asymmetry, and the presence of protective shells by methods of numerical-field simulation.

References.

- Oliinyk, A., Leoshchenko, S., Lovkin, V., Subbotin, S., & Zaiko, T. (2018). Parallel data reduction method for complex technical objects and processes. In *IEEE: The International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)* (pp. 496-501). Kyiv, Ukraine. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409184.
- Oliinyk, A., Subbotin, S., Lovkin, V., Leoshchenko, S., & Zaiko, T. (2018). Development of the indicator set of the features informativeness estimation for recognition and diagnostic model synthesis. In *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018)* (pp. 903-908). Lviv-Slavske, Ukraine. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336342.
- Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kotsur, M., & Divchuk, T. (2018). Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuitfield modelling methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5(93)), 6-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.134248.
- Gaoyu, Z., Zhengming, Z., & Liqiang, Y. (2013). Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter. In *IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1213-1218). Long Beach, CA, USA. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520453.
- Sung, W.P., & Hyunsu, Ch. (2014). A practical study on electrical contact resistance and temperature rise at the connections of the copper busbars in switchgears. In *IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2013)* (pp. 1213-1218). New Orleans, LA, USA. DOI: 10.1109/HOLM.2014.7031066.
- GOST IEC (61000-3-12-2016) Electromagnetic compatibility of technical means. Limit of harmonic current components created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage general-purpose power systems. Norms and methods of testing.* (n.d.). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200142706>.
- Yarymbash, D. S., Kotsur, M. I., Yarymbash, S. T., Kylymnyk, I., & Divchuk, T. (2018). An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers. In *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018)* (pp. 308-313). Lviv-Slavske, Ukraine. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336209.

8. Zhemerov, G., & Tugay, D. (2014). Energy and power in power supply systems with semiconductor converters and energy storage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1, 45-57. DOI: 10.20998/2074-272X.2014.1.09.
9. Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., & Bezverkhnia, Yu. (2018). Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors. In *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018)* (pp. 304-307). Lviv-Slavske, Ukraine. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336208.
10. Bao, Y.J., Cheng, K.W., Ding, K., & Wang, D.H. (2013). The study on the busbar system and its fault analysis. In *IEEE: 5th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA 2013)* (pp. 30-36). Hong Kong, China. DOI: 10.1109/PESA.2013.6828246.
11. Chen, C., Pei, X., Chen, Y., & Kang, Y. (2013). Investigation, evaluation, and optimization of stray inductance in laminated busbar. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29(7), 3679-3693. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2282621.
12. Plesca, A. (2012). Busbar heating during transient conditions. *Electric Power Syst. Res.*, 89, 31-37. DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211.
13. Roskopf, A., Bar, E., & Joffe, C. (2014). Influence of inner skin- and proximity effects on conduction in litz wires. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29(10), 5454-5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847.
14. Stepanenko, A., Oliinyk, A., Deineha, L., & Zaiko, T. (2018). Development of the method for decomposition of superpositions of unknown pulsed signals using the secondorder adaptive spectral analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9(92)), 48-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126578.
15. Zhemerov, G., & Tugay, D. (2015). Components of the total power losses in three-phase energy supply systems with symmetric sinusoidal voltage source. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 28-34. DOI: 10.20998/2074-272X.2015.4.05.
16. Zhemerov, G., & Tugay, D. (2016). Components of total electric energy losses power in pqr spatial coordinates. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2, 11-19. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.2.02.
17. Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kotsur, M., & Divchuk, T. (2018). Enhancing the effectiveness of calculation of parameters for short circuit of three-phase transformers using field simulation methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5(94)), 22-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140236.
18. Popa, I., & Dolan, A.I. (2013). Numerical modeling of DC busbar contacts. In *IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012)* (pp. 188-193). DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231869.
19. Popa, I.C., Dolan, A.-I., Ghindeanu, D., & Boltasu, C. (2014). Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system. In *IEEE: 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)* (pp. 1-4). Bourgas, Bulgaria. DOI: 10.1109/SIELA.2014.6871884.
20. Manohar, D.M., & Vasanthakumari, R. (2016). Effect of pressure and temperature on properties of carbon-carbon composites prepared from renewable material. In *IEEE: 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)* (pp. 1-5). Allahbad, India. DOI: 10.1109/ICCCCM.2016.7918217.

Попередня оцінка падіння напруги в шинопроводах змінного струму

Ю. С. Безверхня

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: jbezverkh@gmail.com

Мета. Розробка універсального критерію, що дозволяє для діючих або розрахункових значень коефіцієнта потужності мережі, оптимально підібрати конфігурацію шинопроводу, а також параметри пристроїв компенсації реактивної потужності для забезпечення зниження втрат і падіння напруги у трифазних системах цехового електропостачання. Удосконалення методики попередньої оцінки падіння напруги в цих системах, що дозволяє врахувати вплив скін-ефекту, ефекту близькості, густини й частоти основної та вищих гармонік струму, в залежності від конструктивних параметрів сталевих шинопроводів, коефіцієнта короткого замикання, діючого або розрахункового коефіцієнта потужності мережі, а також забезпечити кваліфікований підхід щодо формування вимог до пристроїв компенсації реактивної потужності та перетворювачів, що є джерелами їх генерації.

Методика. Для попередньої оцінки падіння напруги в шинопроводах змінного струму використовувались аналітичні вирази, що дозволяють врахувати конструктивні параметри шинопроводів, скін-ефекту, ефект близькості, щільності та частоти основної й вищих гармонік струму. Попередня оцінка компенсації або часткової компенсації падіння напруги від дії вищих гармонік виконувалась методом порівняльного аналізу.

Результати. Запропонована безрозмірна функція оцінки характеру падіння напруги в шинопроводах змінного струму для оптимального вибору їх конструктивних параметрів, у залежності від розрахункового або діючого коефіцієнту потужності цехової мережі, для активно-індуктивного й активно-ємнісного характерів навантажень. Безрозмірна функція дозволяє для необхідного або діючого значення коефіцієнта потужності мережі, на етапі проектування або при модернізації цехових мереж, попередньо оцінити співвідношення активного й реактивного опорів шинопроводів, за яких мінімізується падіння напруги від перетоків реактивної потужності в цехових мережах. Для активно-ємнісного характеру навантаження безрозмірна функція забезпечує попередню оцінку необхідної встановленої потужності пристроїв компенсації реактивної потужності для мінімізації падіння напруги в шинопроводах змінного струму цехової мережі підприємств. За допомогою вдосконаленої методики вибору оптимальних конструктивних параметрів шинопроводів з урахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, щільності та частоти основної й вищих гармонік струму, проведена оцінка падіння напруги в шинопроводах в умовах несинусоїдальності струму шинопроводів. Встановлено, що, у залежності від коефіцієнту короткого замикання мережі та струмового навантаження, величина падіння напруги може зрости в 1,73–2,51 разів. Встановлено, що при максимальному допустимому струмовому навантаженні шинопроводів повна компенсація, а також перекомпенсація, падіння напруги від дії вищих гармонік виконується за менших значень коефіцієнту короткого замикання мережі. При цьому, можуть бути використані пристрої компенсації реактивної потужності з меншою встановленою потужністю. За великих значень коефіцієнту короткого замикання мережі струмове навантаження шинопроводів повинно бути знижено.

Наукова новизна. Запропоновано універсальний критерій у вигляді безрозмірної функції, що дозволяє для діючих або розрахункових значень коефіцієнту потужності мережі оптимально підібрати конфігурацію шинопроводів, а також параметри пристроїв компенсації реактивної потужності для забезпечення зниження втрат і падіння напруги у трифазних системах цехового електропостачання. Удосконалена методика попередньої оцінки падіння напруги у трифазних системах цехового електропостачання змінного струму, що дозволяє врахувати вплив скін-ефекту, ефекту близькості, щільності та частоти основної й вищих гармонік струму в залежності від

конструктивних параметрів сталевих шинопроводів, коефіцієнта короткого замикання, діючого або розрахункового коефіцієнту потужності мережі.

Практична значимість. Запропоновані рекомендації щодо зниження падіння напруги у сталевих шинопроводах від дії вищих гармонік струму, у залежності від коефіцієнта короткого замикання мережі та значення струмового навантаження шинопроводів. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні або модернізації існуючих цехових систем електропостачання, що дозволить забезпечити кваліфікований підхід щодо формування вимог до пристроїв компенсації реактивної потужності й перетворювачів, що є джерелами генерації вищих гармонік струму.

Ключові слова: шинопровід, падіння напруги, коефіцієнт потужності мережі, гармоніки, коефіцієнт короткого замикання, компенсація

Предварительная оценка падения напряжения в шинопроводах переменного тока

Ю. С. Безверхняя

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина, e-mail: jbezverkh@gmail.com

Цель. Разработка универсального критерия, позволяющего для действующих или расчётных значений коэффициента мощности сети, оптимально подобрать конфигурацию шинопровода, а также параметры устройств компенсации реактивной мощности, с целью обеспечить снижение потерь и падение напряжения в трехфазных системах цехового электроснабжения. Усовершенствование методики предварительной оценки падения напряжения в этих системах, которая позволяет учесть влияние скин-эффекта, эффекта близости, плотности и частоты основной и высших гармоник тока, в зависимости от конструктивных параметров стальных шинопроводов, коэффициента короткого замыкания, действующего или расчетного коэффициента мощности сети, а также обеспечить квалифицированный подход к формированию требований к устройствам компенсации реактивной мощности и преобразователям, являющихся их источниками генерации.

Методика. Для предварительной оценки падения напряжения в шинопроводах переменного тока использовались аналитические выражения, позволяющие учесть конструктивные параметры шинопроводов, скин-эффект, эффект близости, плотности и частоты основной и высших гармоник тока. Предварительная оценка компенсации или частичной компенсации падения напряжения от действия высших гармоник выполнялась методом сравнительного анализа.

Результаты. Предложена безразмерная функция оценки характера падения напряжения в шинопроводах переменного тока для оптимального выбора их конструктивных параметров, в зависимости от расчетного или действующего коэффициента мощности цеховой сети, для активно-индуктивного и активно-емкостного характера нагрузок. Безразмерная функция позволяет при необходимом или действующем значении коэффи-

циента мощности сети, на этапе проектирования или при модернизации цеховых сетей, предварительно оценить соотношение активного и реактивного сопротивления шинопроводов, при которых минимизируется падение напряжения от перетоков реактивной мощности в цеховых сетях. Для активно-емкостного характера нагрузки безразмерная функция обеспечивает предварительную оценку необходимой установленной мощности устройств компенсации реактивной мощности для минимизации падения напряжения в шинопроводах переменного тока цеховых сетей предприятий. С помощью усовершенствованной методики выбора оптимальных конструктивных параметров шинопроводов, с учетом влияния скин-эффекта, эффекта близости, плотности и частоты основной и высших гармоник тока проведена оценка падения напряжения в условиях не синусоидальности тока шинопроводов. Установлено, что, в зависимости от коэффициента короткого замыкания сети и величины токовой нагрузки, величина падения напряжения может возрасти в 1,73–2,51 раза. Установлено, что при максимально допустимой токовой нагрузке шинопроводов полная компенсация, а также перекомпенсация падения напряжения от действия высших гармоник тока, выполняется при меньших значениях короткого замыкания сети. При этом, могут быть использованы устройства компенсации реактивной мощности с меньшей установленной мощностью. При больших значениях отношения короткого замыкания сети токовая нагрузка шинопроводов должна быть снижена.

Научная новизна. Предложен универсальный критерий в виде безразмерной функции, который позволяет для действующих или расчётных значений коэффициента мощности сети оптимально подобрать конфигурацию шинопроводов, а также параметры устройств компенсации реактивной мощности для обеспечения снижения потерь и падения напряжения в трехфазных системах цехового электроснабжения.

Усовершенствована методика предварительной оценки падения напряжения в трехфазных системах цехового электроснабжения переменного тока, которая позволяет учесть влияние скин-эффекта, эффекта близости, плотности и частоты основной и высших гармоник тока в зависимости от конструктивных параметров стальных шинопроводов, коэффициента короткого замыкания, действующего или расчетного коэффициента мощности сети.

Практическая значимость. Предложены рекомендации по снижению падения напряжения от действия высших гармоник тока, в зависимости от коэффициента короткого замыкания сети и величины токовой нагрузки стальных шинопроводах. Результаты работы могут быть использованы при проектировании или модернизации существующих цеховых систем электроснабжения, что позволит обеспечить квалифицированный подход к формированию требований к устройствам компенсации реактивной мощности и преобразователям, являющихся источниками генерации высших гармоник тока.

Ключевые слова: шинопровод, падение напряжения, коэффициент мощности, высшие гармоніки, коэффициент короткого замыкания, компенсація

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук П. Д. Андриенком. Дата надходження рукопису 19.05.18.