

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311

DOI 10.20535/1813-5420.1.2024.297581

В. В. Попов¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4281-2720
А. П. Заболотний¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8696-661X
В. В. Дяченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8705-9683
Д. В. Федоша¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0683-0561
В. Л. Прихно¹, ст. викладач, ORCID 0000-0001-7834-3618
¹Національний університет “Запорізька політехніка”

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ У ЦЕХОВИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Показано, що ефективність цехових мереж електропостачання в значній мірі обумовлює ефективність функціонування системи електропостачання промислового підприємства в цілому і визначається за допомогою мінімізації зведених витрат, які мають дві складові, обумовлені капітальними витратами і витратами від втрат електроенергії у цехових мережах. Розрахунок зведених витрат при техніко-економічному порівнянні варіантів є трудомісткою задачею, оскільки існує велика варіативність вибору схемного рішення, вибору перерізів провідників живлячої і розподільної цехової мережі, а також врахування конструктивних особливостей цехової мережі

Здійснено аналіз особливостей факторів ефективності цехового електропостачання. Виділено базові складові ефективного функціонування схеми цехового електропостачання, а саме: дискретність електротехнічного обладнання; його розміщення у цеху; режими роботи електроприймачів (ЕП); графік навантаження; співвідношення вартості електроенергії і питомої вартості елементів цехової мережі.

Ключові слова: *ефективність електропостачання, радіальна схема, магістральна схема, тривалодопустимий струм, зведені витрати, коефіцієнт форми, коефіцієнт потужності, втрати електроенергії.*

Вступ

Ефективність цехових мереж електропостачання в значній мірі обумовлює ефективність функціонування системи електропостачання промислового підприємства в цілому і визначається за допомогою мінімізації зведених витрат, які мають дві складові, обумовлені капітальними витратами і витратами від втрат електроенергії у цехових мережах. Розрахунок зведених витрат при техніко-економічному порівнянні варіантів є трудомісткою задачею, оскільки існує велика варіативність вибору схемного рішення, вибору перерізів провідників живлячої і розподільної цехової мережі, а також врахування конструктивних особливостей цехової мережі [1-5]. Оптимальність обраного рішення зрештою значною мірою залежить від суб'єктивізму проектувальника, його кваліфікації та особистого досвіду вирішення подібних багатокритеріальних завдань [2]. Тому актуальним питанням є формалізація процесу розрахунку зведених витрат на цехову мережу та процедури оцінки ефективності електропостачання у цехових мережах промислових підприємств, що дозволить знаходити ближчі до оптимальних схемні рішення при врахуванні конструктивних особливостей виконання цехової мережі [3].

Аналіз факторів ефективності електропостачання

Вибір оптимальної схеми цехового електропостачання є важливим питанням, оскільки втрати потужності і електроенергії у цехових мережах становлять від 30% до 70% від загальних втрат в залежності від виду виробництва [4]. Визначення мінімальних зведених витрат, які складаються з капітальних вкладень і експлуатаційних витрат забезпечує застосування оптимального варіанта схеми цехового електропостачання. Як відомо, зведені витрати визначаються за формулою:

$$Z_i = \left(E_n + \frac{K_a + K_o}{100} \right) K_i + C_w \cdot \Delta W_{ai} \quad (1)$$

де Z_i – зведені витрати, тис. грн.; K_i – капітальні витрати для i -ого варіанта, тис. грн.; E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, в. о.; K_a, K_o – нормативний коефіцієнт витрат на амортизацію і обслуговування відповідно, %; C_w – вартість активної електроенергії, грн./кВт·год; ΔW_{ai} – втрати активної електроенергії у цеховій мережі, МВт·год; i – порядковий номер варіанта, що розглядається.

Аналіз виразу (1) показує, що зведені витрати мають дві складові, які відповідно залежать від величини капітальних витрат (K_i) і експлуатаційних витрат, обумовлених втратами активної електроенергії ($C_w \cdot \Delta W_{ai}$). Капітальні витрати складаються з витрат на провідниковий матеріал живлячої і розподільної цехової мережі і витрат на розподільні пристрої (розподільні шафи, розподільні або магістральні шинопроводи, шафи розподільного пристрою 0,4 кВ комплектної трансформаторної підстанції (КТП)). Капітальні витрати визначаються прийнятою схемою цехової мережі, а також залежать від вартості провідникового матеріалу і розподільних пристроїв цехової мережі. В свою чергу експлуатаційні витрати визначаються величиною втрат активної електроенергії і вартості активної електроенергії. Таким чином, функція зведених витрат на спорудження цехової мережі залежить від виду схеми цехової мережі, який визначає величину капітальних витрат і величину втрат активної потужності, режиму електроспоживання ЕП цехової мережі, а також від співвідношення вартості електроенергії і питомої вартості елементів цехової мережі.

Дискретність електротехнічного обладнання

Вибір перерізу провідників цехової мережі, згідно [4], здійснюється за умови:

$$K_3 \cdot I_{тр доп} > I_{розра} \quad (2)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, який залежить від умов прокладки провідника і категорії приміщення за ПУЕ; $I_{тр доп}$ – тривалодопустимий струм провідника, А; $I_{розра}$ – розрахунковий струм приєднання, А.

Розрахунковий струм визначається за формулою, А:

$$I_{розра} = \frac{S_{розра}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (3)$$

де $S_{розра}$ – розрахункова повна потужність, що передається через провідник, кВА; U – напруга мережі, кВ.

Переріз провідника обирається з ряду дискретних значень обумовлених номенклатурою провідникової продукції, що випускається.

$$F_i = f(S_{грі}), \quad (4)$$

де F_i – i -ий стандартний переріз провідника, мм²; $S_{грі}$ – граничне значення повної потужності за умовами тривалодопустимого нагріву для i -ого перерізу, кВА

$$S_{грі} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{тр доп i}}{K_3} \quad (5)$$

де $I_{тр доп i}$ – тривалодопустимий струм для i -ого перерізу.

Капітальні витрати на цехову мережу визначаються за формулою

$$K = K_{пр\Sigma} + K_{рп\Sigma} \quad (6)$$

де $K_{пр\Sigma}$ – сумарні капітальні витрати на провідники живлячої і розподільної мережі, тис. грн.; $K_{рп\Sigma}$ – сумарні капітальні витрати на розподільні пристрої цехової мережі, тис. грн.

$$K_{рп\Sigma} = \sum K_{oi} \cdot l_i \quad (7)$$

де K_{oi} – питома вартість i -ого провідника, грн./м; l_i – довжина i -ого провідника, км.

Капітальні витрати на розподільні пристрої в загальному вигляді визначаються за формулою, тис. грн.:

$$K_{рп\Sigma} = \sum C_{о рп ктп i} \cdot n_{рп ктп i} + \sum C_{о шр i} \cdot n_{шр i} \cdot l_{шр i} + \sum C_{о сп i} \cdot n_{сп i} \quad (8)$$

де $C_{о рп ктпi}, C_{о шрi}, C_{о спi}$ – вартість шафи РУ-0,4кВ КТП, питома вартість розподільного шинопроводу, вартість шафи силового пункту відповідно; $n_{рп ктпi}, n_{шрi}, n_{спi}$ – кількість шаф РУ-0,4кВ КТП, розподільних шинопроводів, силових пунктів відповідно; $l_{шрi}$ – довжина і-ого шинопроводу.

Розміщення електротехнічного обладнання

Що стосується визначення втрат активної електроенергії, то їх доцільно визначати за методом середньої потужності [5], оскільки цей метод дає меншу похибку ніж метод з використанням максимального розрахункового навантаження і величини часу максимальних втрат, які визначаються з певними припущеннями. Точність визначення втрат електроенергії за методом середньої потужності залежить від вибору коефіцієнта використання K_v і коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, які відображають режим електроспоживання окремих ЕП, а також від коефіцієнта форми графіка навантаження K_ϕ , який застосовується для визначення втрат електроенергії при сумісному живленні ЕП у живлячій мережі. Таким чином, втрати електроенергії у розподільній цеховій мережі для радіальної схеми електропостачання за методом середньої потужності визначаються за формулою, МВт·год:

$$\Delta W_{a рмj} = \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{P_{номi} \cdot K_{v_i}}{U_{ном} \cdot \cos\varphi_{номi}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_o \cdot l_i}{F_i} \cdot 8760 \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

де $P_{номi}$ – номінальна активна потужність і-ого ЕП, кВт; $U_{номi}$ – номінальна напруга і-ого ЕП, кВ; $\cos\varphi_{номi}$ – коефіцієнт потужності і-ого ЕП а; K_{v_i} – коефіцієнт використання і-ого ЕП; ρ_o – питомий електричний опір, який залежить від виду матеріалу провідника (алюмінію або міді), Ом·мм²/м; l_i – довжина провідника, який живить і-ий ЕП, м; F_i – переріз провідника, який живить і-ий ЕП, мм²; n – кількість ЕП у вузлі.

Довжина провідника l_i визначається з урахуванням конструктивного виконання розподільної мережі, для схеми з використанням силових пунктів, м:

$$l_{ij} = h_{спj} + 1,1 \sqrt{(x_{спj} - x_{ij})^2 + (y_{спj} - y_{ij})^2}, \quad (10)$$

для схеми з використання розподільного шинопроводу:

$$l_{ij} = h_{шрj} + 1,1 \sum \sqrt{(y_{шрj} - y_{ij})^2}, \quad (11)$$

де $x_{спj}, y_{спj}, x_{шрj}, y_{шрj}$ – координати розташування силових пунктів і шинопроводу на плані цеха відповідно, м; $h_{спj}, h_{шрj}$ – висота встановлення силових пунктів і шинопроводу відповідно, м.

Переріз і-ого провідника для розподільної мережі вибирається за умовами тривалогодопустимого нагріву згідно (4), при цьому за розрахункове навантаження приймається номінальне навантаження ЕП.

Для живлячої мережі для визначення перерізу живлячої лінії розраховується максимальне навантаження за методом впорядкованих діаграм

$$\left\{ \begin{array}{l} P_M = K_M \cdot P_{CP} \\ Q_M = \begin{cases} 1,1 Q_{CP} \text{ при } n_{еф} < 10 \\ Q_{CP} \text{ при } n_{еф} \geq 10 \end{cases} \\ S_M = \sqrt{P_M^2 + Q_M^2} \end{array} \right\} \quad (12)$$

де P_M, Q_M, S_M – максимальні розрахункові значення активної (кВт), реактивної (кВАр) і повної (кВА) потужностей відповідно; P_{CP}, Q_{CP} – середні активна (кВт) і реактивна (кВАр) потужності; $K_M, n_{еф}$ – коефіцієнт максимуму і ефективне число ЕП відповідно.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{CP} = \sum K_{v_i} \cdot P_{номi} \\ Q_{CP} = \sum K_{v_i} \cdot P_{номi} \cdot \text{tg}\varphi_i \end{array} \right\} \quad (13)$$

де $\text{tg}\varphi_i$ – коефіцієнт реактивної потужності та K_{v_i} – коефіцієнт використання для і-ого ЕП відповідно.

Режими роботи ЕП

У формулі (13) використовуються номінальні активні потужності ЕП, зведені до тривалості включення (ТВ) $TB=100\%$:

$$P_{\text{ном}i} = P_{\text{уст}} \sqrt{\frac{TB}{100}} \quad (14)$$

де $P_{\text{уст}}$ – установлена активна потужність ЕП, кВт.

Коефіцієнт максимуму K_M визначається для групи ЕП зі змінним режимом роботи, за умови $K_b < 0,6$ або $TB \neq 100\%$. Для ЕП з постійним режимом роботи (група А) $K_M=1$, тобто $P_M=P_{\text{ср}}$, $Q_M=Q_{\text{ср}}$. Для ЕП зі змінним режимом роботи (група Б)

$$K_M^B = f(K_{\text{всз}}^B, n_{\text{еф}}^B) \quad (15)$$

де $K_{\text{всз}}^B$ – середньозважений коефіцієнт використання для групи Б.

$$K_{\text{всз}}^B = \frac{P_{\text{ср}}^B}{\sum P_{\text{ном}i}^B} \quad (16)$$

Ефективне число ЕП групи Б визначається за формулою:

$$n_{\text{еф}} = \frac{(\sum P_{\text{ном}i}^B)^2}{\sum (P_{\text{ном}i}^B)^2} \quad (17)$$

Для живлячої мережі переріз провідника живлячої лінії F_j визначається за умовами (4), при цьому розрахункове навантаження вузла визначається за формулою:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (18)$$

де S_p , P_p , Q_p – повне (кВА), активне (кВт) і реактивне (кВАр) розрахункові навантаження.

При цьому:

$$\begin{cases} P_p = P_M^A + P_M^B \\ Q_p = Q_M^A + Q_M^B \end{cases} \quad (19)$$

Для визначення втрат електроенергії використовується середньоквадратична потужність, яка визначається за формулою

$$S_{\text{ск}} = K_{\phi} \cdot S_{\text{ср}} \quad (20)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт форми графіка навантаження; $S_{\text{ср}}$ – середня повна потужність вузла навантаження, кВА;

$$S_{\text{ср}} = \sqrt{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2} \quad (21)$$

де $P_{\text{ср}}$, $Q_{\text{ср}}$ – середні активна (кВт) і реактивна (кВАр) потужності вузла навантаження, визначені за формулою (13).

Графік навантаження

Коефіцієнт форми графіку навантаження для вузла залежить від співпадіння максимумів навантаження окремих ЕП даного вузла і визначається за формулою.

$$K_{\phi} = \sqrt{m} \frac{\sqrt{(\sum W_{ai})^2}}{\Delta W_a} \quad (22)$$

де W_a – активна електроенергія вузла навантаження, яка споживається за період T , кВт·год; W_{ai} – активна електроенергія вузла навантаження, яка споживається за час $t=T/m$, кВт·год; m – кількість відрізків графіка навантаження.

На практиці, якщо графік навантаження невідомий приймається $K_{\phi}=1,0$.

Таким чином, втрати активної електроенергії у живлячій мережі для радіальної схеми визначається за формулою, МВт·год [5]:

$$\sum \Delta W_{жм} = 8760 \left(\sum_{j=1}^m \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (P_{номij} \cdot K_{вij}) \cdot K_{фj}}{U_j \cdot \cos \varphi_{сзj}} \right)^2 \frac{\rho_0 \cdot l_j}{F_j} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (23)$$

де $P_{номij}$ – номінальна активна потужність, зведена до ТВ=100% (КВт); $K_{вij}$ – коефіцієнт використання і-ого ЕП приєднаного до j-ого СП; n_j – кількість ЕП у j-ому вузлі; m – кількість вузлів навантаження; l_j , F_j – довжина (м) і переріз (мм²) j-ої живлячої лінії, які визначаються з урахуванням способу прокладки і тривалодопустимого струму відповідно; $\cos \varphi_{сзj}$ – середньозважене значення коефіцієнта потужності для j-ого вузла навантаження.

$$\cos \varphi_{сзj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} P_{номij} \cdot \cos \varphi_{номij}}{\sum_{i=1}^{n_j} P_{номij}} \quad (24)$$

При використанні у якості вузлів навантаження розподільних шинопроводів додатково визначаються втрати електроенергії у шинопроводах, які визначаються за формулою, МВт·год:

$$\sum_{j=1}^m \Delta W_{шрj} = 8760 \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (P_{номij} \cdot K_{вij}) \cdot K_{фj}}{U_j \cdot \cos \varphi_{сзj}} \right)^2 \cdot r_{oj} \cdot l_{шрj} \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n_j} \right) \cdot \left(2 + \frac{1}{n_j} \right) \right) \cdot 10^{-3} \quad (25)$$

Для радіальної схеми з використанням розподільних шаф у якості силових пунктів $\sum_{j=1}^m \Delta W_{шрj} = 0$. Таким чином, формула для визначення зведених витрат на спорудження цехової мережі в загальному випадку набуває вигляду:

$$Z = \left(E_n + \frac{(K_a + K_o)_{рп}}{100} \right) \sum K_{рп} + \left(E_n + \frac{(K_a + K_o)_{рп}}{100} \right) \sum K_{рп} + 8760 C_w \sum_{j=1}^m (\Delta W_{арmj} + \Delta W_{апсмj} + \Delta W_{шрj}) \cdot 10^{-3} \quad (26)$$

де $\Delta W_{арmj}$, $\Delta W_{апсмj}$, $\Delta W_{шрj}$ – втрати активної електроенергії відповідно у розподільній, живлячій мережі та у розподільних шинопроводах.

Такій підхід був апробований при виконанні робіт с проектування цехових мереж в проектній установі ДІПРОПРОМ (м. Запоріжжя). Отримані результати чисельного експерименту показали свою ефективність (3-7%) при визначенні експлуатаційних характеристик цехових мереж у порівнянні з існуючими інженерними методиками.

Висновки

Запропонована методика розрахунку зведених витрат на спорудження цехової мережі дозволяє формалізувати процес розрахунку при врахуванні конструктивних особливостей виконання цехової мережі, підвищити точність розрахунку при врахуванні режиму електроспоживання ЕП, а також дозволяє визначити як зміняться зведені витрати при зміні співвідношення питомих витрат на спорудження цехових мереж і тарифу на електроенергію.

Список використаної літератури

1. ГКД 340.000.002-97. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику./ Методика. Енергосистеми й електричні мережі. Затверджені наказом Міністерства України від 20.01.97 №1ПС та введені в дію з 01.01.97.
2. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
3. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
4. Шестеренко Е. В. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця : Нова книга, 2004. 655 с.
5. V. Popov, D. Prikchno, V. Prikchno, "Development of the method of determining the power and electricity losses in distribution network of shop electrical supply", 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 148-156, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.

V. Popov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003- 4281-2720
A. Zabolotnyi¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8696-661X
V. Diachenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8705-9683
D. Fedosha¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-0683-0561
V. Prikhno¹, senior lecturer, ORCID 0000-0001-7834-3618
¹National University "Zaporizhzhya Polytechnic"

FORMALIZATION OF THE PROCEDURE FOR ASSESSING THE ELECTRIC SUPPLY EFFICIENCY IN WORKSHOP NETWORKS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

There is defined that the efficiency of workshop power supply networks largely determines the efficiency of the power supply system of the industrial enterprise as a whole and is determined by minimizing the reduced costs, which have two components: capital investments and the cost of electricity losses in workshop networks. Calculating the reduced costs during a technical and economic comparison of options is a labor-intensive task, since there is a large variability in the choice of circuit design, the choice of cross-sections of the conductors of the supply and distribution workshop network, as well as taking into account the design features of the workshop network.

The analysis of the characteristics of the efficiency factors of workshop power supply was carried out. The basic components of the effective functioning of the workshop power supply circuit are identified, namely: discreteness of electrical equipment; its placement in the workshop; operating modes of current-using equipment (CUE); loading schedule; ratio of the cost of electricity and the unit cost of workshop network elements.

There has been determined that in any workshop power supply scheme, the duration of switching CUE on the electric power supply (CUE with a constant and variable operating mode), as well as the shape of the load schedule, largely determines the efficiency of its operation.

Obtained results of a numerical experiment, when performing design of workshop networks in the DIPROPROM design institution (Zaporozhye), showed the effectiveness (3-7%) in determining the operational characteristics of workshop networks in comparison with existing engineering methods.

Keywords: *efficiency of power supply, radial circuit, main circuit, long-term permissible current, reduced costs, form factor, power factor, electricity losses.*

References

1. GKD 340.000.002-97. Determining the economic efficiency of capital investments in the energy sector./ Methodology. Energy systems and electrical networks. Approved by the order of the Ministry of Energy of Ukraine dated January 20, 1997 No. 1PS and put into effect on January 1, 1997.
2. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
3. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
4. Shesterenko E. Systems of electricity consumption and electricity supply of industrial enterprises. Vinnytsia: New Book, 2004. 655 p.
5. V. Popov, D. Prikhno, V. Prikhno, "Development of the method of determining the power and electricity losses in distribution network of shop electrical supply", 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 148-156, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.

Надійшла: 09.11.2023
Received: 09.11.2023