

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.11

УДК 658.26:621.316.1

Хмельницький Є.Д., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8605-4960,
e-mail: khmell2020@gmail.com

Азізов Теймур, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,
e-mail: azizov.t2000@gmail.com

Коробков Є.К., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти,
e-mail: uaevgenius @gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м.Кам'янське

Khmelnitskyi Evgen, Ph.D., Associate Professor

Azizov Teymur, Postgraduate student

Korobkov Evgen, higher education student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ОПТИМАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТЕЙ КОНДЕНСАТОРІВ У МЕРЕЖІ ЦЕХОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ

Дослідження присвячено аналізу розрахункової методики з розподілу потужностей конденсаторів у мережі двох напруг цехової підстанції підприємства. Порівняльні розрахунки з визначення оптимальної потужності конденсаторів у мережі низької напруги показали значний вплив на кінцеві результати питомої вартості електроенергії та терміну окупності обладнання.

Ключові слова: розподіл потужностей конденсаторів; цехова підстанція; питома вартість електроенергії; термін окупності обладнання.

The study is devoted to the analysis of the calculation method for the distribution of capacitor capacities in the two-voltage network of the workshop substation of the enterprise. Comparative calculations for determining the optimal capacity of capacitors in the low-voltage network showed a significant impact on the final results of the specific cost of electricity and the payback period of the equipment.

Keywords: distribution of capacitor capacities; workshop substation; specific cost of electricity; payback period of the equipment.

Постановка проблеми

У процесі проектування цехових підстанцій підприємств необхідно вирішувати питання розподілу потужностей конденсаторів на стороні високої (ВН) та низької (НН) напруги. Основна частина цехових підстанцій має високу напругу 6 або 10 кВ, а низьку — 0,4 кВ. Необхідна потужність батареї конденсаторів (БК) залежить від низки факторів, основними з яких можна назвати: потужність трансформаторів та їх вторинну напругу, тип цехової мережі та різницю питомої вартості конденсаторів ВН та НН. Відносно питомої вартості можна зауважити, що конденсатори НН значно дорожчі ніж ВН, але задачу компенсації реактивного навантаження необхідно вирішувати саме з вибору потужності БК на стороні НН. Тому обґрунтування вибору оптимальної потужності конденсаторів на стороні НН має принципове значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розв'язання задачі компенсації реактивної потужності на промислових підприємствах у значній мірі регламентується постановою Кабінету Міністрів України [1]. Питання оптимального розподілу потужності конденсаторних установок у мережах промислових підприємств детально розглядаються у працях [2, 3, 4]. Однак при цьому динаміка зміни питомих цін на електричну енергію здебільшого не враховуються. У сучасних умовах це набуває особливої актуальності, оскільки економічна ефективність систем компенсації реактивної потужності істотно залежить від структури тарифів на електроенергію та вартості обладнання. Урахування зазначених чинників підвищує достовірність техніко-економічного обґрунтування, сприяє оптимізації розміщення конденсаторних батарей у мережі та забезпечує мінімальні втрати активної і реактивної потужності в електроенергетичних системах підприємства.

Формування мети дослідження

Визначити оптимальну потужність конденсаторів на стороні низької напруги з урахуванням технічних та, передусім, економічних чинників, таких як питома вартість електроенергії, термін окупності обладнання та режим роботи батарей конденсаторів на конкретному об'єкті. Тому у даному дослідженні вихідні дані розрахунків прийняті згідно теперішньої ситуації в країні.

Виклад основного матеріалу

1. Теоретичні посилання.

Витрати на конденсатори НН, запишемо у вигляді [1]:

$$B = \Delta C_K \cdot Q_{HH}, \quad (1)$$

де ΔC_K — різниця питомої вартості конденсаторів ВН та НН, грн./кВАр; Q_{HH} — потужність конденсаторів низької напруги, кВАр.

Якщо подати функцію вартості втрат потужності (1) у залежності від реактивного навантаження після встановлення батареї конденсаторів на стороні низької напруги та виконати її диференціювання за вартістю втрат електроенергії, то одержуємо формулу оптимальної потужності конденсаторів низької напруги [1], а саме:

$$Q_{KH}^{opt} = Q_{HH} - \frac{M}{r_{e.m}(1+\lambda)} = Q_{HH} - \Delta Q_H, \quad (2)$$

де Q_{HH} — сумарне реактивне навантаження підстанції на стороні НН, кВАр; $r_{e.m}$ — еквівалентний опір мережі до 1000 В; λ — коефіцієнт, що визначає тип цехової підстанції; M — розрахунковий параметр, який знайдемо за формулою

$$M = U_{HH}^2 \left(\frac{K_T \cdot \Delta C_K}{C_{n.e} \cdot T_B} + \Delta_T \right) \text{кВАр} \cdot \text{Ом}; \quad (3)$$

де K_T — коефіцієнт терміну окупності батареї конденсаторів; ΔC_K — питома різниця вартості конденсаторів ВН та НН, грн./кВАр; $C_{n.e}$ — питома вартість електроенергії, грн/кВт-год; T_B — час використання БК, годин; Δ_T — розрахунковий коефіцієнт терміну окупності БК; U_{HH} — вторинна напруга цехового трансформатора, кВ.

2. Вихідні дані порівняльних розрахунків.

Виходячи із сучасного стану електропостачання підприємств та нормативних документів [2], приймаємо у порівняльних розрахунках наступне: термін окупності — 8; 6; 4 років; відповідно коефіцієнт K_T буде дорівнювати — 112,5; 150,0; 225,0, а коефіцієнт Δ_T — 0,5; 0,664; 1,0. Еквівалентний опір мережі $r_{\Sigma} = r_{e.m}(1+\lambda) = 0,00088(1+0,4) = 0,0012$ Ом. Час використання БК — 6000 або 4000 годин. Вартість електроенергії: $C_{n.e} = 1; 2; 3; 4; 5$ грн./кВт-год. Питома різниця вартості конденсаторів ВН та НН змінюється залежно від виробника, тому у розрахунках приймаємо $\Delta C_K = 50$ грн/кВАр. Розрахунковий параметр M по суті визначає залежність оптимальної величини БК від вартості електричної енергії та часу її використання. Розрахуємо параметр M з урахуванням прийнятих значень параметрів.

3. Розрахунковий приклад.

Цехова підстанція підприємства живиться від ЛЕП–35 кВ, головний знижувальний трансформатор ТМ–4000–35/6 кВ, навантаження підстанції $S = 2980 + 2340$ кВА. Споживачі низької напруги живляться від двох трансформаторів ТМ–1000–6/0,4 кВ, навантаження на кожну секцію шин 0,4 кВ поділено приблизно порівну.

Для компенсації реактивного навантаження необхідно встановити батареї конденсаторів потужністю

$$Q_{БК} = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 2980(0,78 - 0,23) = 1640 \text{ кВА},$$

де P — загальне активне навантаження, кВт; $tg\varphi_1 = 0,78$ — середньорічний; $tg\varphi_2 = 0,23$ — нормативний коефіцієнт потужності, згідно [2].

Оптимальний розподіл потужностей БК між пристроями ВН та НН визначаємо за [4], однак на відміну від попередніх розрахунків будемо враховувати зміну вартості електроенергії.

3.1. Приймаємо $T_{ок} = 8$ років, час роботи БК, $T_B = 4000$ годин, вартість електроенергії $C_{n.e} = 1,0$ грн/кВт-год.

Сумарне реактивне навантаження на стороні НН: $Q_{HH} = 1200$ кВАр.

Параметр M :

$$M = 0,38^2 \left(\frac{112,5 \cdot 50}{1 \cdot 4000} + 0,5 \right) = 0,21 \text{ кВАр} \cdot \text{Ом},$$

$$\Delta Q_H = \frac{M}{r_\Sigma} = \frac{0,21}{0,0012} = 182 \text{ кВАр},$$

$$Q_H^{onm} = 1200 - 182 = 1018 \text{ кВАр},$$

$$Q_{BH} = Q_{BK} - Q_H^{onm} = 1640 - 1018 = 622 \text{ кВАр}.$$

Аналогічні розрахунки виконуємо для $C_{n.e}=2; 3; 4; 5$ грн/кВт·год. Результати занесені у табл. 1.

Таблиця 1. Розподіл потужностей конденсаторів у мережі ВН і НН при різних термінах окупності та вартості електроенергії

Термін окупності і час роботи БК		$T_{ок}=8$ років		$T_{ок}=6$ років		$T_{ок}=4$ роки	
Вартість електроенергії грн/кВт·год		$T_B=4000$ годин	$T_B=6000$ годин	$T_B=4000$ годин	$T_B=6000$ годин	$T_B=4000$ годин	$T_B=6000$ годин
$C_{n.e}=1,0$		1018	1037	960	998	842	902
		622	612	680	649	798	740
$C_{n.e}=2,0$		1058	1084	1018	1042	911	960
		584	556	622	595	729	674
$C_{n.e}=3,0$		1080	1102	1042	1070	968	992
		558	537	596	570	672	638
$C_{n.e}=4,0$		1092	1112	1062	1084	990	1018
		544	528	578	556	640	626
$C_{n.e}=5,0$		1106	1118	1075	1090	1010	1030
		534	522	565	550	627	605

Примітка: у чисельнику оптимальна потужність конденсаторів мережі НН;
у знаменнику потужність БК мережі ВН

3.2. Приймаємо $T_{ок}=6$ років, час роботи БК, $T_B=4000$ годин, вартість електроенергії $C_{n.e}=1,0$ грн/кВт·год.

Параметр M :

$$M = 0,38^2 \left(\frac{150,0 \cdot 50}{1 \cdot 4000} + 0,664 \right) = 0,288 \text{ кВАр} \cdot \text{Ом},$$

$$\Delta Q_H = \frac{M}{r_\Sigma} = \frac{0,288}{0,0012} = 240 \text{ кВАр},$$

$$Q_H^{onm} = 1200 - 240 = 960 \text{ кВАр},$$

$$Q_{BH} = 1640 - 960 = 680 \text{ кВАр}.$$

Аналогічні розрахунки виконуємо для $C_{n.e}=2; 3; 4; 5$ грн./кВт·год. Результати занесені у табл. 1.

3.3. Приймаємо $T_{ок}=4$ роки, час роботи БК, $T_B=4000$ годин, вартість електроенергії $C_{n.e}=1,0$ грн/кВт·год.

Параметр M :

$$M = 0,38^2 \left(\frac{225 \cdot 50}{1 \cdot 4000} + 1,0 \right) = 0,422 \text{ кВАр} \cdot \text{Ом},$$

$$\Delta Q_H = \frac{0,422}{0,0012} = 358 \text{ кВАр},$$

$$Q_H^{onm} = 1200 - 358 = 842 \text{ кВАр},$$

$$Q_{BH} = 1640 - 842 = 798 \text{ кВАр}.$$

Аналогічні розрахунки виконуємо для $C_{n.e}=2; 3; 4; 5$ грн/кВт·год. Результати занесені у табл.1.

Для оцінки впливу часу роботи БК на величину оптимальної потужності конденсаторів повторимо розрахунки для $T_B=6000$ годин. Результати розрахунків заносяться у табл. 1.

Для наочності виконаних розрахунків побудований графік (рис. 1) оптимальної потужності конденсаторів у залежності від вартості електроенергії та терміну окупності конденсаторів.

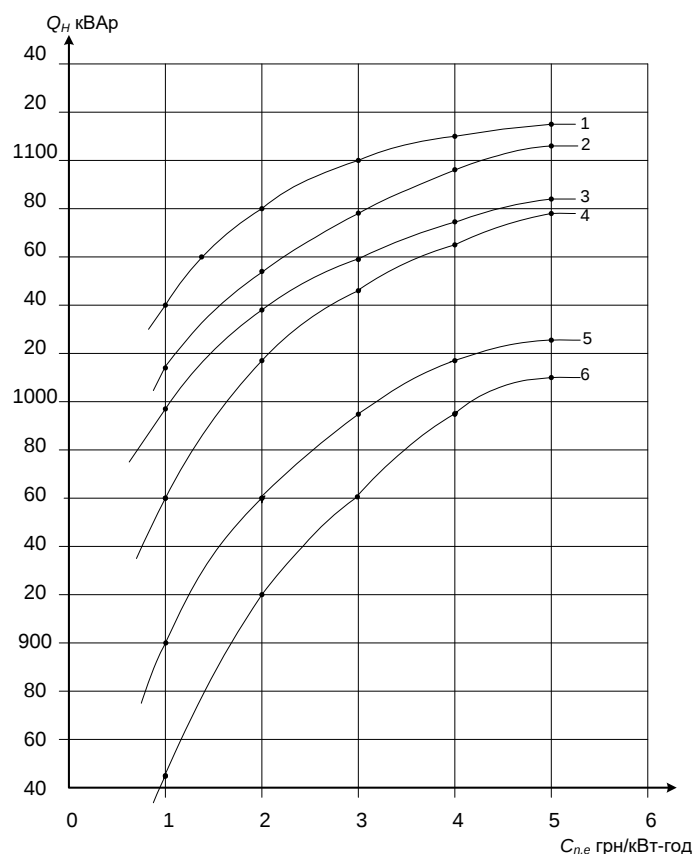


Рис. 1. Графік оптимального розподілу потужностей конденсаторів у мережі НН:
1 – 3 – 5 (для $T_B=6000$ годин); 2 – 4 – 6 (для $T_B=4000$ годин)

4. Оцінка результатів.

Аналіз отриманих результатів виконаний на підставі даних табл. 1:

- **вплив собівартості електроенергії:** збільшення $C_{n.e}$ призводить до зростання оптимальної потужності конденсаторів на стороні НН, аналогічно впливає і час роботи конденсаторів;
- **вплив терміну окупності:** зменшення терміну окупності призводить до зменшення оптимальної потужності конденсаторів на стороні НН;
- **вплив часу роботи БК:** при незмінній питомій вартості електроенергії та зростанні часу роботи конденсаторів оптимальна потужність на стороні НН зростає.

Висновки

Збільшення оптимальної потужності конденсаторних установок на стороні низької напруги свідчить про те, що на високій стороні підстанції потужність батарей конденсаторів буде зменшуватись. З економічної точки зору це зумовлює підвищення капітальних витрат у розподільному пристрої 0,4 кВ, однак водночас сприяє зниженню втрат потужності в цехових трансформаторах. Оптимальний розподіл потужності конденсаторів може істотно змінитись у разі зменшення різниці між вартістю конденсаторів високої та низької напруги, що призведе до збільшення потужності БК у мережах низької напруги.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні систем електропостачання промислових підприємств.

Список використаної літератури

1. Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України Про затвердження методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії : прийнятий 6 лютого 2018 року № 87 (Із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства енергетики № 764 від 30.11.2020).
2. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств / В.Є. Шестеренко. Вінниця : Нова книга. 2004. 656 с.
3. Василега П. О. Електропостачання: навчальний посібник. – Суми: ТОВ «ВТД «Університетська книга», 2015. 417 с.
4. Маліновський А.А. Основи електроенергетики та електропостачання : підручник / А.А. Маліновський, Б.К. Хохулін. Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2009. 436 с.

OPTIMAL DISTRIBUTION OF CAPACITORS IN THE NETWORK OF A WORKSHOP SUBSTATION

Abstract

The study is devoted to the analysis of the calculation method for the distribution of capacitor capacities in the network of a workshop substation of an enterprise. Separate calculations were made using this method, however, the initial data have changed fundamentally recently, especially regarding the cost of electricity and the payback period of the equipment. Therefore, there was a need for a more detailed analysis of this issue taking into account the new initial data.

The method involves determining the calculation parameter M for payback periods of 8; 6; 4 years and the cost of electricity within $1 \div 5$ UAH/kWh, which corresponds to the current situation in the country, the operating time of the capacitors is taken for two- and three-shift enterprises, namely 4000 and 6000 hours.

As an example, the optimal capacity of low-voltage capacitors of a 6/0.4 kV substation is calculated. The calculations yielded important conclusions, the most informative of which is the fact that the increase in the cost of electricity leads to an increase in the capacity of the BC on the LV side, which increases the investment in the 0.4 kV switchgear. However, such a solution cannot always be implemented in practice due to the limited dimensions of this device. An increase in the optimal capacity of LV capacitors is also expected if the payback period of the equipment increases. It is necessary to take into account the instability of the pricing policy in the cost of HV and LV capacitors, since the latter are produced by the industry in limited quantities. Thus, the results obtained are advisable to use in the case of designing shop substations of enterprises.

References

- [1] Nakaz Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy *Pro zatverdzhennia metodyky obchyslennia platy za peretikannia reaktyvnoi elektroenerhii* [On approval of the methodology for calculating the fee for the flow of reactive electricity] : pryiniaty 6 liutoho 2018 roku № 87 (Iz zminamy, vneseny zghidno z Nakazom Ministerstva enerhetyky № 764 vid 30.11.2020) [in Ukrainian].
- [2] Shesterenko V.Ye. (2004) *Systemy elektrospozhyvannia ta elektropostachannia promyslovykh pidpriemstv* [Power consumption and power supply systems for industrial enterprises] / V.Ye. Shesterenko. Vinnytsia : Nova knyha [in Ukrainian].
- [3] Vasyleha P. O. (2015) *Elektropostachannia* [Power supply] : navchalnyi posibnyk. – Sumy: TOB «VTD «Universytetska knyha» [in Ukrainian].
- [4] Malinovskiy A.A. (2009) *Osnovy elektroenerhetyky ta elektropostachannia* [Fundamentals of Electrical Power Engineering and Power Supply] : pidruchnyk / A.A. Malinovskiy, B.K. Khokhulin. Lviv : Vydavnytstvo NU «Lvivska politehnika» [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 13.10.2025

Прийнята після рецензування 14.10.2025

Опублікована 23.10.2025