

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-2>

УДК 621. 311

О. І. Коваленко, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0003-6262-9234

Л. Р. Коваленко, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0009-9366-9726

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: oleksandr.kovalenko@tsatu.edu.ua

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Значна кількість електроенергії витрачається під час її транспортування. Основними споживачами електроенергії є промислові підприємства. Компенсація реактивної потужності (далі – РП) в системі електропостачання дає змогу забезпечити баланс активної та реактивної потужності, знизити втрати та поліпшити показники якості електричної енергії. Під час компенсації РП необхідно передбачати регульовані джерела РП. Проаналізовано схеми компенсації РП із використанням конденсаторних батарей та статичних тиристорних компенсаторів. Відзначено переваги та недоліки схем. Розроблено комбіновану схему регульованого джерела РП. Схема забезпечує високу швидкість та ефективність регулювання потужності, низький уміст вищих гармонік струму.

Ключові слова: втрати активної потужності, компенсація реактивної потужності, схеми компенсації, регульоване джерело реактивної потужності.

Постановка проблеми. В Україні виробляється близько 110 млрд кВт год (у передвоєнні роки – близько 160 млрд кВт год) електричної енергії. У 2021 р. значна частка виробництва електроенергії припадала на атомну (55,1%) та теплову (29,3%) генерації. На гідро- та гідро-акумуляційних станціях генерувалося близько 6,6% електричної енергії. На відновлювальні джерела енергії (вітрові, сонячні та біогазові) припадало до 8% генерації [1].

Основними споживачами електричної енергії в Україні є промисловість (41,7%), населення (31%), комунальне побутове господарство (12%). Наведені цифри показують, що майже половина (41,7%) виробленої електричної енергії в Україні припадає на галузі промисловості, а саме: 23% – на металургійну; 3,5% – на хімічну; 3,5% – на харчову та переробну; 2,8% – на машинобудування; 2,6% – на паливну; 2,1% – на виробництво будівельних матеріалів та 4,1% – на інші галузі промисловості [2].

Окрім того, відомо, що в 2021 р. під час виробництва електричної енергії в обсязі 156,6 млрд кВт год [1] спожито електроенергії бруто 154,8 млрд кВт год, а нетто – 125,5 млрд кВт год. Тобто втрачено в електричних мережах різних класів напруги близько 29,3 млрд кВт год – 19% [2].

Під час воєнних дій в Україні пошкоджено значну частину потужностей генерації. Поряд із недостатнім обсягом генерації електричної енергії залишаються актуальними проблеми її втрат під час транспортування. Питання зменшення втрат в електричних мережах системи електропостачання є актуальними.

Компенсація реактивної потужності (РП) в системах електропостачання є досить ефективним заходом, який знижує витрату (втрату) електроенергії на її транспорт, знижує потоки реактивної потужності (розвантажує мережі), поліпшує показники якості напруги і знижує витрати на обладнання [3].

Питання компенсації РП актуальні для електричних мереж різних класів напруги. Ці питання є актуальними і для систем електропостачання промислових підприємств у комплексі з підвищенням якості електроенергії.

Сьогодні в системах електропостачання промислових підприємств застосовують або нерегульовані пристрої компенсації, або зі ступінчастим регулюванням РП. Ці пристрої не дають змоги отримати максимальний ефект від компенсації РП за витрати значних коштів на їх упровадження [3; 4], тому дослідження шляхів застосування регульованих джерел РП та їх схем підключення і режимів роботи в системах електропостачання промислових підприємств є актуальними.

Аналіз останніх досліджень. Проблеми компенсації реактивної потужності з метою зменшення втрат електричної енергії у мережах різних класів напруги та підвищення показників якості електричної енергії (напруги) досліджувалися впродовж тривалого часу як українськими, так і зарубіжними вченими. Над ними працювали П.Д. Лежнюк, Ю.В. Грицюк, В.Г. Ягуп, К.В. Ягуп, В.М. Пірняк, П.П. Говоров, Р. Nanda, М.Т.Л. Gayatri та ін.

У статті [3] розглядаються шляхи підвищення пропускної спроможності протяжних ліній електропередавання шляхом застосування пристроїв поздовжньої компенсації реактивної потужності з можливістю регулювання потоку реактивної потужності в мережі.

Огляд методів компенсації РП у мікромережах (у мережах із розподіленою генерацією), проведений авторами у [5], показав, що для таких мереж, у тому числі й для мереж промислових підприємств із власною генерацією, процес компенсації РП стає складним завданням із погляду підтримки прийняттого рівня напруги в мережі через те, що виробництво та розподіл електричної енергії у них тісно пов'язані. Проблеми якості електроенергії у мікромережах, що піддаються коливанням живлення та навантаження, можна компенсувати з використанням сучасних методів керування (регулювання), алгоритмів та пристроїв.

Дослідження, що проведено у [5; 6], показало недоліки традиційного методу розрахунку параметрів пристроїв компенсації, які забезпечують часткову компенсацію реактивної потужності в мережі, що споживається лише її навантаженням. Установлено, що зі збільшенням реактивності (ємності) лінії електропередавання енергетичні показники, отримані в результаті компенсації реактивної потужності, погіршуються. Також показано, що для повної компенсації необхідно змінювати (збільшувати) потужність компенсатора. Запропоновано використовувати метод пошукової оптимізації з реалізацією в програмному пакеті Mathcad.

У [7] розглянуто особливості компенсації РП у системах електропостачання міст, шляхи комплексного вирішення питань регулювання напруги та компенсації РП шляхом використання вольтододаткових трансформаторів із тиристорним керуванням.

Автори [8] проаналізували чинники впливу реактивної потужності на техніко-економічні показники електричної мережі. За компенсації РП під час її передачі мінімізується вплив на техніко-економічні показники електричної мережі. Дослідники наводять чинники впливу реактивної потужності на процес передавання електроенергії. Підключення нерегульованих пристроїв компенсації (конденсаторних батарей) призводить як до позитивних наслідків (зменшення втрат електроенергії, підвищення її якості) так і до негативних – погіршується стійкість системи.

Ці дослідження підкреслюють, що регульовані (керовані) пристрої компенсації реактивної потужності (РПКРП) є найбільш перспективними засобами компенсації. Їхнє основне призначення – плавна зміна споживання РП, що є особливо актуальним для електричних мереж промислових підприємств із різко змінним споживанням РП на протязі доби, що зумовлено технологічним процесом. Тобто для компенсації РП у їхніх мережах необхідно передбачити регульовані джерела реактивної потужності.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є аналіз методів та схем компенсації реактивної потужності, пошук та обґрунтування шляхів підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств із різко перемінним навантаженням.

Основна частина. Ураховуючи сучасний стан електроенергетичної галузі України (дефіцит генеруючих потужностей та значні втрати електроенергії у мережах), можна стверджувати, що компенсація РП у системах електропостачання є ефективним заходом, який веде до зниження втрат електроенергії під час її транспортування, знижує потоки РП у розподільних мережах, поліпшує показники якості напруги і знижує витрати на обладнання мереж [3].

Питання компенсації РП є актуальними для електричних мереж систем електропостачання різних класів напруги. Ці питання також є актуальними і для систем електропостачання окремих промислових підприємств. Із урахуванням проблем забезпечення промислових підприємств необхідними обсягами електричної енергії в їхніх системах електропостачання повинні інтенсивно впроваджуватися заходи з підвищення їх енергоефективності та енергозбереження в комплексі з підвищенням показників якості електричної енергії [9].

У системах електропостачання переважної більшості промислових підприємств країни застосовують або нерегульовані пристрої компенсації РП, або пристрої зі ступінчастим регулюванням потужності. Ці пристрої не дають змоги отримати максимальний ефект від компенсації РП. Постає питання дослідження застосування більш ефективних регульованих джерел РП у системах електропостачання промислових підприємств [9].

Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання промислового підприємства дає змогу забезпечити баланс активної та реактивної потужності, знизити втрати електричної потужності та електричної енергії, поліпшити показники якості електричної енергії [5; 9].

Відомо, що реактивну потужність на відміну від активної, що генерується лише генераторами електричних станцій, можна генерувати як синхронними генераторами електростанцій, так і додатковими джерелами реактивної потужності (синхронними компенсаторами, конденсаторами та ін.) у безпосередній близькості до споживачів, тобто в мережах самого підприємства, тим самим розвантажити лінії електропередавання.

Також відомо, що під час передавання активної P та реактивної Q потужності в системі електропостачання (транспортування) виникають утрати активної потужності, що зумовлені струмом навантаження мережі та параметрами лінії електропередавання, тобто її опором:

$$\Delta P = 3I^2 \cdot r = \frac{S^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2}{U^2} \cdot r + \frac{Q^2}{U^2} \cdot r = \Delta P_a + \Delta P_p, \quad (1)$$

де S, P, Q – повна, активна та реактивна потужності;

U – номінальна (лінійна) напруга мережі;

r – активний опір проводів мережі;

$\Delta P_a, \Delta P_p$ – утрати активної і реактивної потужностей відповідно.

Як видно з (1), утрати активної потужності пропорційні квадрату реактивної потужності, і за зменшення втрат реактивної потужності зменшуються втрати активної.

Під час генерації та споживання енергії на змінному струмі кількість виробленої і споживаної електроенергії у кожен момент часу відповідає кількості переданої і споживаної активної та реактивної потужності, які можуть бути записані у вигляді балансів активної і реактивної потужності [5].

$$\sum P_e = \sum P_{нав.} + \sum \Delta P, \quad (2)$$

$$\sum Q_c = \sum Q_{\text{нав}} + \sum \Delta Q + \sum Q_{\text{ПК}} - \sum Q_{\text{ЛЕП}}, \quad (3)$$

де $\sum P_c$ – сумарна активна потужність, що генерується;

$\sum P_{\text{нав}}$ – сумарна активна потужність навантаження (споживачів);

$\sum \Delta P$ – сумарні втрати активної потужності в мережах;

$\sum Q_c$ – сумарна реактивна потужність, що генерується;

$\sum \Delta Q_{\text{нав}}$ – сумарна реактивна потужність навантаження (споживачів);

$\sum \Delta Q$ – сумарні втрати реактивної потужності в мережах;

$\sum Q_{\text{ПК}}$ – сумарна реактивна потужність пристроїв компенсації;

$\sum Q_{\text{ЛЕП}}$ – сумарна реактивна потужність, повітряних ліній.

Для електричної мережі повинні підтримуватися баланси активної та реактивної потужностей за дотримання нормального режиму роботи мережі.

Необхідно забезпечити баланс РП як для системи електропостачання у цілому, так і для окремих вузлів мережі або системи електропостачання промислового підприємства з наявністю у цих вузлах необхідного резерву РП.

Також необхідно забезпечити баланс РП для кожного характерного режиму роботи електричної мережі окремо, а саме для: режиму максимальних навантажень; режиму мінімальних навантажень; післяаварійного режиму.

Саме баланс РП визначає рівень напруги у вузлах електричної мережі. Рівень напруги є важливим показником режиму роботи електричної мережі.

Рівнем напруги на затискачах споживача і швидкістю його зміни (коливанням) визначається якість електричної енергії. Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, усталене відхилення напруги ($-U_y$) у нормальних робочих умовах за винятком періодів, під час котрих відбувалися переривання напруги, змінення напруги не повинні перевищувати $\pm 10\%$ від номінальної напруги U_n [10].

Значення напруги у вузлах мережі тією чи іншою мірою відрізняються від номінального рівня, причому ступінь цієї відмінності залежить від конфігурації мережі, величини навантаження та інших чинників.

Допустимі значення відхилень напруги [10] обґрунтовано технічно та економічно. За більш жорстких вимог до якості напруги збільшуються витрати на її регулювання. Водночас уже існують способи регулювання напруги за допомогою сучасних пристроїв статичних тиристорних компенсаторів (СТК) та регульованих конденсаторних батарей (КБ) [5; 11; 12].

До основних засобів регулювання напруги в електричних мережах промислових підприємств слід віднести трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням (РПН), батареї конденсаторів зі ступінчастим регулюванням і статичні тиристорні компенсатори (СТК).

Також часто використовуються і неавтоматизовані засоби, наприклад трансформатори з перемикачем без збудження (ПБЗ), нерегульовані КБ.

Розмах змін напруги є наслідком, швидкої зміни напруги в мережі, що пов'язано з виникненням різко змінних навантажень у мережі.

Для зміни потоків реактивної потужності в мережі промислових підприємствах застосовують батареї статичних конденсаторів.

Поздовжній складник падіння напруги ΔU_m визначається за виразом:

$$\Delta U_m = \frac{P_m \cdot r_m + Q_m \cdot x_m}{U_n}, \quad (4)$$

де P_m, Q_m – потоки активної та реактивної потужності в мережі;

r_m, x_m – активний та реактивний опори мережі.

Оскільки в мережах електропостачання $x_0 > r_0$, то найбільший вплив на величину ΔU_m має саме реактивний складник виразу (4): $\frac{Q_m x_m}{U_m}$.

Під час використання пристроїв компенсації у мережах електропостачання зміна напруги відбувається за рахунок регулювання їхньої реактивної потужності.

$$U_2 = U_1 - \frac{P_m r_m + (Q_m \pm Q_{ПК}) x_m}{U_2}, \quad (5)$$

де U_1 – напруга на початку окремої ділянки системи електропостачання;

U_2 – напруга в точці встановлення пристрою компенсації;

$Q_{ПК}$ – реактивна потужність пристрою компенсації.

У СТК застосовуються регульовані реактори паралельно з КБ, які можуть бути регульованими і нерегульованими [12].

Способи регулювання напруги за рахунок зміни потоків РП пов'язані із забезпеченням її балансу в електричних мережах. Регулювання напруги у вузлах розподільної мережі підприємства, цехових мережах і безпосередньо на затискачах електроприймачів виконується за рахунок зміни втрат напруги в елементах електричної мережі переважно шляхом регулювання потоків РП.

Генерування на станціях та перетікання електричними мережами додаткових обсягів РП призводить до додаткових утрат активної потужності (1).

Так, утрати в синхронних генераторах електричних станцій залежать від обсягу генерованої ними реактивної потужності [8]:

$$\Delta P = \frac{D_1}{Q_n} Q + \frac{D_2}{Q_n^2} Q^2, \quad (6)$$

де D_1 та D_2 – постійні для певного типу синхронного генератора, які залежать від його номінальної потужності та коефіцієнта корисної дії;

Q_n – номінальна реактивна потужність генератора;

Q – поточне значення реактивної потужності генератора.

Так, для синхронного генератора Т-2-50-2 із $Q_n = 31$ МВар збільшення РП на 20% із метою регулювання рівня напруги в електричній мережі призведе до збільшення втрат реактивної потужності на 35%. При цьому на 20% зменшується обсяг активної потужності, що генерується на електростанції [8].

Додаткові втрати активної потужності, що пов'язані з РП, також характерні й для підвищувальних та знижувальних трансформаторів, шунтувальних реакторів, синхронних компенсаторів тощо [8]. Це призводить до збільшення втрат активної потужності та її недовідпуску з шин генераторів.

Увімкнення конденсаторних батарей (КБ) на шини навантаження з метою компенсації реактивної потужності призводить як до зменшення втрат електроенергії, так і до погіршення стійкості системи [8]. На рис. 1 показано залежності $Q=f(U)$ до (крива 1) і після (крива 2) включення КБ.

Як видно з рис. 1, після увімкнення КБ відбувається деформування характеристики $Q = f(U)$ (крива 2). Вона стає більш пологою, а запас стійкості зменшується, тому що у складі навантаження з'являється від'ємний складник.

Із цього випливає, що за компенсації реактивної потужності з метою зменшення втрат електричної енергії у системі електропостачання необхідно передбачати регульовані джерела реактивної потужності для коригування характеристики $Q = f(U)$. У вузлах системи необхідно підтримувати задані співвідношення між активною і реактивною ($\tan \varphi$) потужностями.

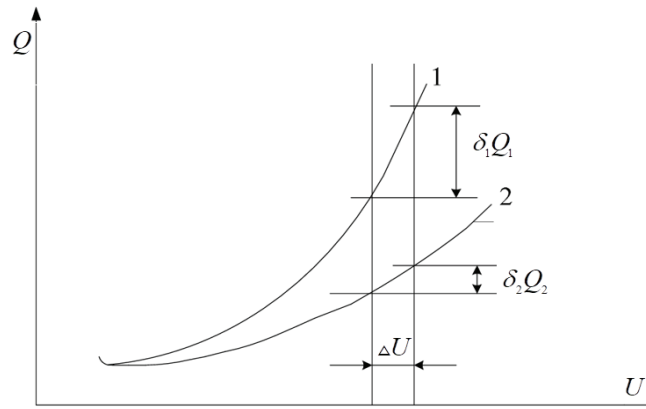


Рис. 1. Залежність $Q = f(U)$ до (1) та після (2) підключення КБ [8]

Найбільш дешевими та зручними для застосування в електричних мережах промислових підприємств є схеми на основі конденсаторних батарей [9].

На рис. 2 наведено схему пристрою компенсації (ПК) без регулювання.

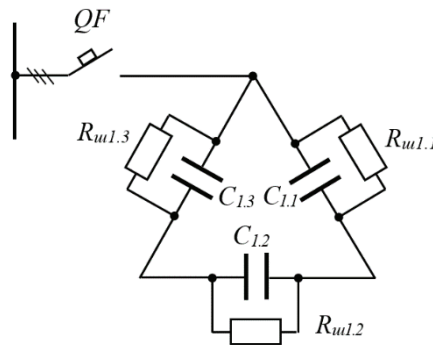


Рис. 2. Схема підключення ПК без регулювання

Перевагами такої схеми є її простота та мінімальні втрати активної потужності в пристрої, що визначаються втратами у статичних конденсаторах:

$$\Delta P = 2\pi f C_{KB} U_{нKB}^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (7)$$

де f – частота електричної мережі;

C_{KB} – ємність конденсаторної батареї;

$U_{нKB}^2$ – номінальна напруга на конденсаторній батареї;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута втрат.

Недоліком цієї схеми є те, що втрати активної потужності в електричній мережі є максимальними [9; 11].

Також відома аналогічна схема пристрою компенсації з можливістю перемикавання схеми з'єднання конденсаторів «трикутник» на схему «зірка». Така схема не знайшла широкого застосування на практиці, оскільки потужність пристрою компенсації змінюється в три рази, що є недоцільним для регулювання.

На рис. 3 наведено схему ПК із регулюванням ємності ступенями [12].

Таку схему застосовують за значних і різко перемінних навантажень у мережі підприємства. Недоліком таких схем є «тяжкий» режим перемикавання під час роботи контактів (тиристорних ключів). Регулювання потужності здійснюється лише ступенями, потужність яких визначена виробниками.

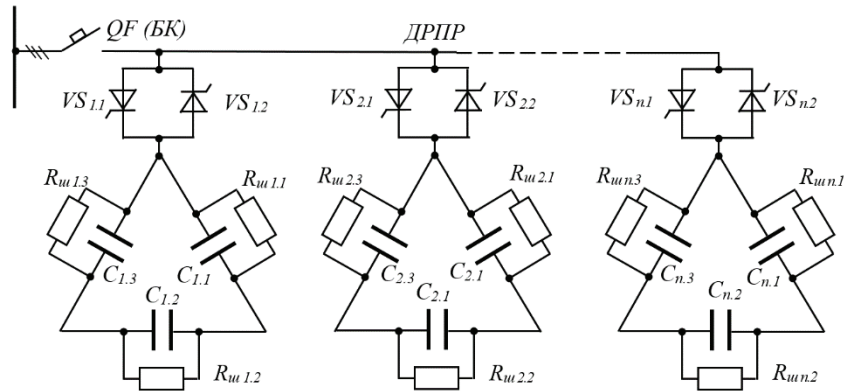


Рис. 3. Схема ПК із регулюванням ємності ступенями

Для плавного регулювання реактивної потужності використовуються пристрої компенсації (рис. 4) з тиристорно-реакторною групою (СТК), у яких за рахунок фазового регулювання тиристорів VS , що включені послідовно з реактором L , плавно змінюється потужність пристрою [12]. Для таких пристроїв:

$$Q_{ПК(СТК)} = Q_L - Q_C. \quad (8)$$

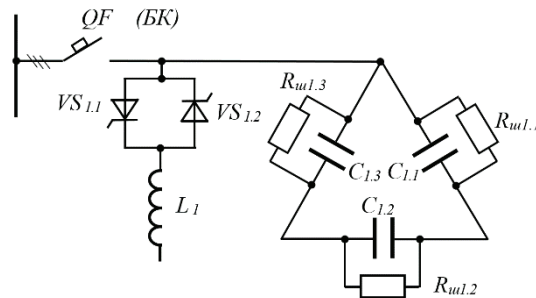


Рис. 4. Схема ПК із регульованою індуктивністю (СТК)

Подальшої еволюції у регулюванні реактивної потужності в електричній мережі досягнуто у схемі СТК (рис. 5), яка забезпечує регулювання індуктивності та ємності (ступінчасте) шляхом поєднання паралельно ввімкнених реактора та конденсаторних батарей [12–15].

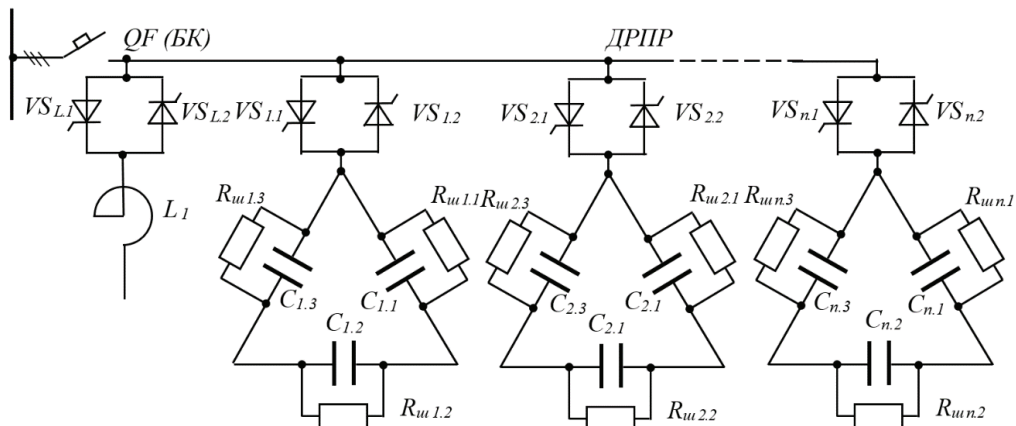


Рис. 5. Схема СТК із регульованою індуктивністю та ступінчасто регульованою ємністю

Така схема передбачає два принципово різні режими регулювання. В одному з режимів регулювання потужності здійснюється ступінчасто шляхом поєднання в різних варіантах ємності та індуктивності, при цьому потужність реактора L_1 дорівнює половині потужності ступеня КБ C_1 .

За такою схемою кількість ступенів регулювання збільшується у два рази порівняно з кількістю ступенів КБ. Схема має незначні втрати потужності в ПК за рахунок відносно малої потужності реактора:

$$Q_L = \frac{Q_{KB \max}}{2N}, \quad (9)$$

де N – кількість ступенів КБ.

У іншому режимі регулювання потужність реактора L_1 дорівнює одному ступеню КБ C_1 і змінюється за допомогою тиристорного регулятора. Схема за допомогою блока керування (БК) забезпечує плавне регулювання РП та високу швидкість регулювання. Такі СТК забезпечують одночасно і компенсацію РП, і підтримку якісних параметрів електричної енергії (напруги) в мережі підприємства. Недоліком такої схеми є те, що за значного зменшення навантаження в мережі може виникнути режим перекомпенсації, що призведе до збільшення втрат потужності та підвищення напруги [15].

Для усунення недоліків схем ПК, що розглянуті, пропонується їх комбінування. Пропонується до застосування розроблена за цим принципом схема регульованого джерела реактивної потужності (РДРП) (рис. 6).

Така схема забезпечує високу швидкість та ефективність регулювання потужності, низький уміст вищих гармонік струму. За такою схемою пропонується здійснювати централізоване регулювання напруги та РП у мережах низької напруги цехових підстанцій промислових підприємств.

Для даного РДРП запропоновано конденсаторну батарею з трьома ступенями C_1 , C_2 та C_3 . Конденсатори кожного ступеня з'єднані в «трикутник» та підключені до мережі через реактор обмеження струму L_0 і тиристорні ключі VS , що забезпечують задану швидкість регулювання та покращують перехідні процеси під час комутації.

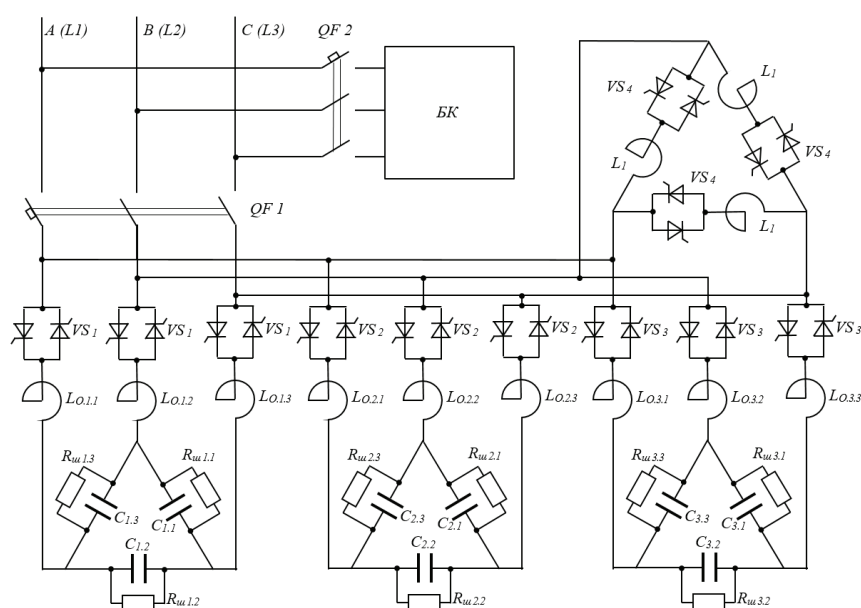


Рис. 6. Схема регульованого джерела реактивної потужності

Параметри реакторів обмеження струму, що сприяють зменшенню впливу струму навантаження на форму кривої вихідної напруги, вибирають за виразом:

$$L_0 = \frac{(U_{1\max} + U_{2\max})1,1}{di / dt} \kappa_{\text{зп.}}, \quad (10)$$

де $U_{1\max}$ – максимальна амплітудна напруга мережі;

$U_{2\max}$ – максимальна амплітудна напруга на затискачах ємності;

$\kappa_{\text{зп.}}$ – коефіцієнт запасу (1,1–1,2);

di / dt – швидкість наростання струму.

Керуючі імпульси подаються на тиристорні ключі VS від блоку керування (БК) протягом кожного півперіоду, при цьому автоматично підключається КБ у момент, коли напруга на затискачах конденсатора дорівнює напрузі мережі.

Особливістю даного РДРП є те, що реактор L_1 приєднаними послідовно тиристорними регуляторами VS_4 з'єднані в «трикутник». Сумарна потужність трьох реакторів дорівнює потужності одного ступеня КБ. Теоретично за такою схемою третій гармонійний складник від роботи тиристорів практично зникає.

Також особливістю РДРП є те, що регулювання РП здійснюється за власним законом регулювання невеликими ступенями від цифрової системи керування (БК). За рахунок зміни кута відкривання тиристорних регуляторів VS_4 можна отримати чотири ступені реактивної потужності, що споживається реакторами L_1 , – 25, 50, 75 та 100%. Ступені КБ підключаються послідовно.

Основною функцією даного РДРП є регулювання напруги в електричній мережі промислового підприємства, при цьому РДРП генерує або споживає РП. Це дає змогу отримати нормовані показники якості електроенергії у мережі підприємства [8], звільнити мережу живлення від перетікання реактивної потужності та, відповідно, зменшити втрати активної потужності в мережі.

Висновки. Низька ефективність роботи систем електропостачання визначається високим рівнем утрат електричної енергії у них. Одним із напрямів зниження втрат електроенергії у мережах різних класів напруги є розвантаження їх від реактивної потужності, тобто генерування її безпосередньо біля споживачів. Особливо актуальним це є для потужних споживачів із різко перемінним навантаженням, якими є промислові підприємства з великою кількістю електроприводного, електронагрівального та іншого технологічного обладнання. Компенсація реактивної потужності в них здійснюється за допомогою різнотипних пристроїв без регулювання або зі ступінчастим регулюванням потужності, що мають низьку ефективність.

У роботі проаналізовано основні схеми підключення пристроїв компенсації. Відзначено їхні недоліки, основним з яких є ступінчасте регулювання, що не забезпечує повної компенсації. Розроблено і запропоновано використовувати в мережах промислових підприємств комбіновану схему на базі статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності, яка доповнена регульованим реактором (індуктивністю). Така схема за розробленими законами регулювання дає змогу здійснювати корекцію (регулювання) як індуктивності, так і ємності, що в поєднанні забезпечує плавне регулювання реактивної потужності в мережі й підтримання напруги на заданому рівні.

Список використаних джерел

1. Структура виробництва електроенергії в Україні на початок 2022 року. *Українська енергетична біржа*. URL: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/osoblivosti-vitchiznyanogvirobnitstva-elektroenergii/> (дата звернення : 05.09.2025).
2. Споживання електроенергії в Україні у 2021 році. *Всеукраїнська енергетична асамблея*. URL: <https://uaea.com.ua/news/pek-news/ee-consumption-12.html> (дата звернення: 05.09.2025).

3. Коваленко Л.Р. Підвищення пропускної спроможності електричних мереж шляхом упровадження засобів компенсації реактивної потужності. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : матеріали VI Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, 28–30 травня 2025 р. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. С. 62–68.
4. Пристрій компенсації реактивної потужності в мережі живлення змінного струму: пат. 159344 Україна: МПК H02J 3/18. № u 2024 04840; заявл. 10.10.2024; опубл. 14.05.2025 Бюл. № 20. 3 с.
5. Gayatri M.T.L., Alivelu M. Parimi A.V. Pavan Kumar. A review of reactive power compensation techniques in microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 81, 1030–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.006>.
6. Аналіз та оптимізація режимів компенсації реактивної потужності в системі електропостачання / В. Ягуп та ін. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2019. № 3(8 (99)). С. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168584>.
7. Говоров П.П., Говоров В.П. Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання та освітлення міст. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2013. № 1(14). С. 71–76.
8. Лежнюк П.Д., Грицюк Ю.В., Пірняк В.М. Регулювання реактивної потужності й напруги в електричних мережах як допоміжна послуга. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Енергетика та електротехніка*. 2012. № 2. С. 1–6.
9. Miron A., Cziker A.C., Ungureanu Ș., Beleiu H.G. and Dărab C.P. Reactive Power Compensation at Industrial Consumers: Romanian Study Case. *International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*. Iasi. Romania. 2022. P. 101–106. DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959800.
10. ДСТУ EN 50160:2014 – Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності [Чинний від 2014-10-01]. Вид. офіц. Київ : Національний стандарт України, 2014. 27 с.
11. Nanda P., Kumar Panigrahi C., Dasgupta A. Reactive power monitoring and compensation in a distribution network of modern power system. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. № 12(22). P. 12395–12402.
12. Igbinoia O., Ghaeth Fandi, Jan Švec, Zdenek Müller, Josef Tlustý Famous. Comparative Review of Reactive Power Compensation Technologies. *2015 16-th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161066.
13. Ismail B., Abdul Wahab N.I., Othman M.L., Radzi M.A.M., Naidu Vijyakumar K. and Mat Naain M.N. A Comprehensive Review on Optimal Location and Sizing of Reactive Power Compensation Using Hybrid-Based Approaches for Power Loss Reduction, Voltage Stability Improvement, Voltage Profile Enhancement and Loadability Enhancement. *IEEE Access*. Vol. 8, pp. 222733–222765, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043297.
14. Wang L., Lam C.-S. and Wong M.-C. Design of a Thyristor Controlled LC Compensator for Dynamic Reactive Power Compensation in Smart Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. Vol. 8, no. 1, pp. 409–417. Jan. 2017. DOI: 10.1109/TSG.2016.2578178.
15. Liu Y.-W., Rau S.-H., Wu C.-J. and Lee W.-J. Improvement of Power Quality by Using Advanced Reactive Power Compensation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 54, no. 1, pp. 18–24. Jan.-Feb. 2018. DOI: 10.1109/TIA.2017.2740840.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 15.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025



**O. Kovalenko, L. Kovalenko***Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University***WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF REACTIVE POWER COMPENSATION
IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISE*****Summary***

This article presents the volumes of generation and consumption of electrical energy in Ukraine. Up to 19% of electrical energy is expended during its transmission. The principal consumers of electrical energy are industrial enterprises. For them, increasing energy efficiency and reducing losses of electrical energy in power supply networks are pressing tasks. Compensation of reactive power in the power supply system makes it possible to: ensure the balance of active and reactive power; reduce losses of electrical power; improve power quality indices. Methods of voltage regulation by altering reactive power flows are associated with ensuring its balance within the network. Voltage regulation at the nodes of an enterprise's distribution network and directly at the terminals of electrical loads is performed by changing the voltage drops in the elements of the electrical network by regulating the flows of reactive power. It is noted that, when compensating reactive power, it is necessary to provide controllable sources of reactive power to adjust the characteristic $Q = f(U)$. At the system nodes, specified ratios between active and reactive power must be maintained. Schemes of reactive power compensation are analysed: capacitor banks without power regulation; capacitor banks with stepwise power regulation; capacitor banks regulated by a thyristor-reactor group – static VAR compensators; static VAR compensators with stepwise controllable capacitance. The advantages and disadvantages of the schemes are noted. A combined scheme of a controllable source of reactive power has been developed. The scheme provides high speed and efficiency of power regulation, and a low content of higher current harmonics. Smooth regulation is achieved by regulating the inductive and capacitive components of reactive power. The main function of the source of reactive power is to regulate voltage in the enterprise's electrical network, wherein the source generates or consumes reactive power. This makes it possible to obtain standardised power quality indices in the enterprise's network, to relieve it of the transfer of reactive power, and to reduce active power losses.

Keywords: active power losses, reactive power compensation, compensation schemes, controllable source of reactive power.