

REACTIVE POWER COMPENSATION AS AN EFFECTIVE MEANS OF REDUCING ELECTRICITY LOSSES

V. Shesterenko, I. Izvolensky
National University of Food Technologies

Key words: <i>Reactive power Compensation Supply system</i>	ABSTRACT The ways of increasing operation efficiency of reactive power compensation on the plants are considered. The basic aspects of standardized methods of choosing power compensating devices are provided, depending on voltage and configuration of its individual elements. The expediency of the use of each synchronous motor for reactive power compensation is grounded. If the load factor of a synchronous motor is smaller than one, it is economically expedient to use fully expected reactive power output. The system of complex compensation provides a shift in the emphasis of reactive power sources capacity management: from decentralizing to ensuring the system commitment in solving problem that is conceptually related to the optimization of power consumption mode at the industrial enterprises. Recommendations on the system implementation in the industry are given.
Article history: Received 15.07.2015 Received in revised form 20.08.2015 Accepted 02.09.2015	
Corresponding author: V. Shesterenko E-mail: npnuht@ukr.net	

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЗАСІБ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В.Є. Шестеренко, І.Є. Ізволєнський
Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто шляхи підвищення ефективності компенсації реактивної потужності на промислових підприємствах. Наведено основні аспекти нормативної методики вибору потужності компенсуючих пристроїв залежно від напруги мережі та конфігурації окремих її елементів. Доведено доцільність використання кожного синхронного двигуна для компенсації реактивної потужності. Якщо коефіцієнт завантаження синхронного двигуна менший за одиницю, економічно доцільно використовувати повністю очікувану реактивну потужність двигуна. Запропонований системний підхід до компенсації дозволяє суттєво підвищити економічні показники всіх джерел реактивної потужності. Система комплексної компенсації забезпечує зміну в акцентах керування потужностями конденсаторної установки від децентралізації до забезпечення системної цілеспрямованості вирішення проблеми, що концептуально пов'язана з оптимізацією режиму електроспоживання на промисловому підприємстві. Надано рекомендації щодо впровадження системи на промислових підприємствах.

Ключові слова: реактивна потужність, компенсація, система електропостачання.

Постановка проблеми. Витрати на компенсуючі пристрої включають складові, що не залежать від величини реактивної потужності, тому була розроблена методика визначення потужності компенсуючих пристроїв, що не потребує врахування абсолютних значень вартості елементів електропостачання [1, 2, 3]. При зниженні реактивної потужності, що передається, втрати активної потужності зменшуються до 0,12 кВт/квар і залежать від віддаленості джерела живлення. При компенсації необхідно враховувати такі загальні вимоги: на відміну від активної реактивну потужність можна генерувати в будь-якій точці мережі; наближення джерел реактивної потужності до споживачів сприяє розвантаженню мережі; баланс реактивної потужності має бути витриманий для всіх вузлів системи електропостачання [4, 5, 6, 7].

Під час передачі реактивної потужності спостерігаються значні втрати активної потужності:

$$\Delta P = \frac{Q^2}{U^2} \cdot r, \text{ або } \Delta P = P^2 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \phi). \quad (1)$$

Втрати електричної енергії

$$\Delta W_i = \frac{r_i}{U_{\text{ном}}^2} \sum_{k=1}^{\omega} T_k [M_k(P_i^2) + M_k(Q_i^2)], \quad (2)$$

де $M_k(P_i^2)$ — математичне очікування квадрата активної потужності; $M_k(Q_i^2)$ — математичне очікування квадрата реактивної потужності; ω — кількість інтервалів стаціонарності й ергодійності, T_k — тривалість цих інтервалів.

Метою статті є надання рекомендацій щодо оптимального застосування певних моделей пристроїв компенсації реактивної потужності в системах електроспоживання промислових підприємств.

Матеріали і методи. Для дослідження використовувались такі математичні методи: теорія ймовірності, математична статистика і теорія масового обслуговування, а також патенти [Патент України на винахід № 90684, Н02J 3/12. — Спосіб керування джерелами реактивної потужності промислового підприємства — Опубл. 25.02.2010. Патент України № 52809, Н02J 3/12. — Оптимальний спосіб використання резервної дизельної електростанції — Опубл. 10.09.2010. Патент України № 34943, Н02J 3/12. — Спосіб підключення конденсаторів індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронного двигуна. — Опубл. 26.08.2008.]

На промислових підприємствах для компенсації реактивних навантажень використовують конденсатори і синхронні двигуни [2, 3]. Найбільшого поширення дістали конденсатори. Невелика маса, відсутність частин, що обертаються, незначні втрати енергії, простота обслуговування, безпечність і надійність в експлуатації дозволяють використовувати конденсатори для компенсації реактивної потужності на всіх ступенях системи електропостачання.

чання. Синхронні двигуни широко використовуються на підприємствах для приводу пристроїв, що не потребують регулювання частоти обертання. Двигуни можуть працювати з випереджаючим коефіцієнтом потужності й компенсувати реактивну потужність інших електроприймачів. Компенсуюча здатність двигуна визначається навантаженням на його валу, напругою й струмом збудження.

Результати і обговорення. Синхронні двигуни (СД) застосовуються для приводу механізмів з тривалим режимом роботи — насосів, вентиляторів тощо. Заводи вітчизняної електропромисловості випускають СД з номінальним випереджальним коефіцієнтом потужності, що дорівнює 0,9 і можуть бути використані як джерела реактивної потужності (ДРП).

Кожний синхронний двигун може бути джерелом реактивної потужності, номінальне значення якої [1, 2, 3]:

$$Q_{\text{СД}} = P_{\text{СД ном}} \cdot \text{tg}\phi_{\text{ном}}, \quad (3)$$

де $P_{\text{СД ном}}$ — номінальна активна потужність СД; $\text{tg}\phi_{\text{ном}}$ — номінальний коефіцієнт потужності.

Якщо коефіцієнт завантаження СД менший за одиницю $K_3 < 1$, економічно доцільно використовувати повністю очікувану реактивну потужність СД:

$$Q_{\text{СД}} = \alpha_M \cdot S_{\text{СД ном}},$$

де α_M — коефіцієнт допустимого перевантаження СД, який залежить від його завантаження активною потужністю.

$$\alpha_M = \sin\phi_{\text{ном}} + (1 - K_3) \cdot \left(\frac{\sin\phi_{\text{ном}}}{48 \cdot \sin\phi_{\text{ном}} - 32} + 0,4 \right), \quad (4)$$

де K_3 — коефіцієнт завантаження СД активною потужністю.

В існуючих дизельних електростанціях (ДЕС), що використовуються як резервне джерело живлення, електрогенератор з'єднаний жорстко з дизельним двигуном. У нормальних умовах дизельний двигун не працює, і електрогенератор не використовується. При порушенні електропостачання дизельний двигун запускається (автоматично чи з допомогою обслуговуючого персоналу) і електрогенератор живить електроенергією споживачі протягом часу аварії. Після відновлення електропостачання за основною схемою ДЕС відключається і обладнання її не використовується.

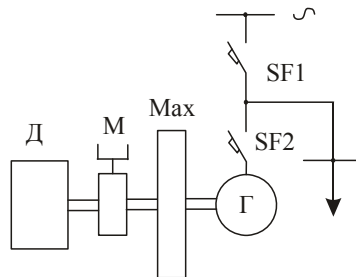


Рис. 1. Оптимальна схема використання резервної дизельної електростанції

У запропонованому способі на валу електрогенератора монтують додатковий маховик, підключають електрогенератор до дизельного двигуна через електромагнітну муфту і використовують електрогенератор як джерело реактивної потужності в періоди безаварійної роботи системи електропостачання.

Технічна суть запропонованого способу пояснюється кресленням (рис. 1), на якому зображено блок-схему ДЕС, де Д — дизельний двигун, М — електромагнітна муфта, Мах — маховик, Г — електрогенератор, SF1 і SF2 — комутаційні пристрої для автоматичного підключення ДЕС.

У нормальному режимі генератор Г ДЕС відключений від дизельного двигуна Д з допомогою електромагнітної муфти М, контакти SF1 і SF2 замкнені і генератор використовується як синхронний компенсатор для компенсації реактивної потужності та регулювання напруги. В аварійному режимі муфта М приєднує генератор Г з маховиком Мах до дизельного двигуна Д, за рахунок енергії маховика Мах дизельний двигун Д запускається, контакти SF 1 розмикаються і весь комплекс працює як ДЕС.

Застосування електромагнітної муфти дозволяє суттєво підвищити економічні показники ДЕС, оскільки електрогенератор можна застосовувати для компенсації реактивної потужності протягом всього року. При цьому маховик запасє значну кількість механічної енергії, яку можна використати для пуску дизельного двигуна. Схема ДЕС спрощується, тому застосовувати акумуляторну батарею для пуску двигуна не потрібно. Поєднання цих двох елементів в одній схемі дозволяє суттєво підвищити економічність ДЕС.

В існуючих способах індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів конденсаторна установка підключається до затискачів електроприймача без комутаційних апаратів. У випадку відключення двигуна від мережі живлення досить часто виникають умови для самозбудження. При самозбудженні напруга на затискачах двигуна зростає пропорційно струму конденсатора та швидкості ротора двигуна. Величина напруги може піднятися до 160 % $U_{ном}$. Якщо двигун повторно вмикається в період самозбудження, розвивається потужний перехідний процес, оскільки фаза напруги самозбудження не завжди збігається з фазою напруги електричної мережі. На обмотки та вал двигуна діють електродинамічні сили, які в декілька разів вищі за ті, що спостерігаються при нормальній роботі, і двигун може вийти з ладу.

У запропонованому способі підключення конденсаторів індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронного двигуна конденсаторну установку підключають до затискачів двигуна через вакуумний автоматичний вимикач, що обладнаний електромагнітом дистанційного відключення, паралельно затискачам двигуна підключають електронний датчик максимальної напруги, сигнал керування з датчика подають на систему відключення автоматичного вимикача і відключають конденсаторну установку при підвищенні напруги безпосередньо на двигуні як при нормальній роботі двигуна, так і під час перехідних процесів в моменти відключення двигуна від мережі.

Реалізація запропонованого способу пояснюється кресленням (рис. 1), на якому зображено блок-схему підключення конденсаторної установки для компенсації реактивної потужності двигуна.

Асинхронний двигун М підключено до мережі через контактор КМ. Конденсаторна установка (КУ) може складатися з одного конденсатора чи з батареї конденсаторів, з'єднаних паралельно або послідовно залежно від напруги і потужності двигуна М. Установка КУ підключена до затискачів двигуна М через вакуумний автоматичний вимикач SF. До затискачів двигуна М підключають електронний безінерційний датчик напруги KV. Робоче положення автоматичного вимикача SF — постійно включений. Комутацію двигуна М і установки КУ здійснюють контактором КМ. У випадку самозбудження двигуна М і підвищенні напруги на ньому спрацьовує датчик KV і посилає сигнал на відключення вакуумного автоматичного вимикача SF. Конденсаторну установку КУ відключають при аварійному підвищенні напруги безпосередньо на двигуні, що дозволить миттєво призупинити перехідні процеси, які можуть викликати вихід з ладу ізоляції двигуна.

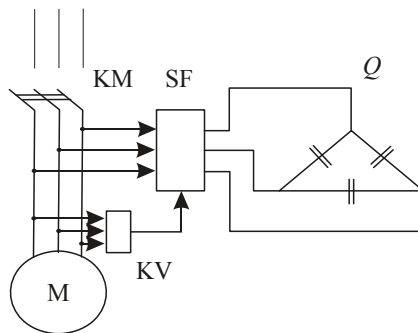


Рис. 2. Схема підключення конденсаторів для індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронного двигуна

Схема підключення асинхронних двигунів за запропонованим способом забезпечує суттєве підвищення надійності роботи двигунів і конденсаторних установок індивідуальної компенсації, оскільки вакуумний автоматичний вимикач здійснює надійний захист у робочих режимах конденсаторів від перевантажень струмами вищих гармонік.

У конденсаторних батареях застосовують конденсатори з діелектриком з конденсаторного паперу та з синтетичної плівки. Ці конденсатори зазвичай призначаються для підвищення коефіцієнта потужності електроустановок змінного струму частотою 50 Гц. Конденсатори з'єднують трикутником або зіркою в групи, секції та цілі установки. З'єднання трикутником дозволяє отримати від конденсаторів однієї і тієї ж ємності в 3 рази більшу потужність, ніж з'єднання зіркою.

Згідно з нормативною методикою розрахунку потужності конденсаторів, за обраним числом трансформаторів визначають максимальну реактивну потужність, яку доцільно передати через трансформатори ТП у мережу напругою до 1000 В:

$$Q_T = \sqrt{(N_{TE} \cdot \beta_T \cdot S_T)^2 - P_P^2}, \quad (5)$$

ТЕПЛО-І ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

де N_{TE} — число трансформаторів в групі (цех, корпус); β_T — очікуваний коефіцієнт завантаження трансформаторів; S_T — номінальна потужність трансформатора в групі, кВ·А; P_P — розрахункова активна потужність електроприймачів; напругою до 1000 В.

Сумарна потужність КУ для даної групи трансформаторів визначається за формулою:

$$Q_{HK1} = Q_P - Q_T, \quad (6)$$

де Q_T — розрахункова реактивна потужність електроприймачів напругою до 1000 В.

На другому етапі визначається додаткова сумарна потужність КУ для даної групи трансформаторів ТП:

$$Q_{HK2} = Q_P - Q_{HK1} - \gamma \cdot N_{TE} \cdot S_T, \quad (7)$$

де γ — розрахунковий коефіцієнт, що залежить від схеми живлення та кількості робочих змін.

Для однієї підстанції γ визначається за формулою:

$$\gamma = \frac{4,5 \cdot K_1}{100 + \frac{r \cdot l \cdot S_T}{F}}, \quad (8)$$

де K_1 — питомий коефіцієнт втрат; l — довжина лінії живлення, км; F — переріз провідників ЛЕП, мм²; r — коефіцієнт, що залежить від напруги живлення.

Застосування конденсаторних установок напругою 6...10 кВ призводить до завантаження мережі підприємства реактивною потужністю та до збільшення втрат енергії. При цьому, як правило, економічний ефект від компенсації буде тільки в мережах енергосистеми, а не підприємства. Більше того, енергосистема може застосовувати штрафні санкції до підприємства, оскільки, маючи тільки високовольтні конденсаторні установки досить великої потужності (часто без регулювання потужності), підприємство не зможе витримати задані енергосистемою величини реактивних потужностей у режимах максимуму й мінімуму.

Вказівки щодо компенсації рекомендують до кожної секції розподільчої підстанції напругою 6...10 кВ підключати конденсаторні установки однакової потужності, але не менш як 1000 квар. При цьому регулювання реактивної потужності практично виключається, оскільки ретроспективний аналіз показує, що сумарна потужність усіх конденсаторних установок на діючому пересічному підприємстві середньої потужності знаходиться в цих межах.

Проведені теоретичні й експериментальні дослідження дозволили вдосконалити методику, не порушуючи її фундаментальний принцип.

Якщо підприємство одержує енергію від мережі напругою 10 кВ при розрахунковому значенні $Q_{HK} < 200$ квар, то для трансформатора підстанції потужністю 1000 кВ·А необхідно встановити конденсаторну установку з мінімальною потужністю 200 квар. Це може бути стандартна конденсаторна установка типу УКМ 0,4-225-37,5. Для трансформаторів підстанції потуж-

ністю 630 кВ·А рекомендована мінімальна потужність 110 квар, тобто стандартна конденсаторна установка типу УКМ 0,4-112,5-37,5.

За наявності на підприємстві кількох конденсаторних установок застосовується багатоступеневе регулювання сумарної реактивної потужності шляхом різночасового вмикання чи вимикання окремих батарей згідно з графіком навантаження. Сумарна потужність нерегульованих джерел не повинна перевищувати споживану потужність у години мінімуму навантаження, бо реактивна потужність не повинна передаватися з мережі підприємства у мережу енергосистеми.

Протягом доби потужність, що генерується, повинна не менш як на 80—90 % збігатися з графіком споживаної реактивної потужності. Завжди необхідно забезпечувати вимкнення нерегульованих компенсуючих пристроїв у вихідні дні та неробочі години. Вимкнення може здійснюватися вручну чи автоматично. Число секцій конденсаторних батарей слід вибирати залежно від характеру графіка реактивної потужності. Ступінчасто-регульовані конденсаторні установки виготовляються з різним числом регульованих секцій. Такі установки ступінчастого регулювання дозволяють підтримувати в певних межах задане значення того параметра, на який настроєний вимірювальний орган блоку керування. Це є їхньою додатковою перевагою порівняно з нерегульованими шунтовими конденсаторними батареями.

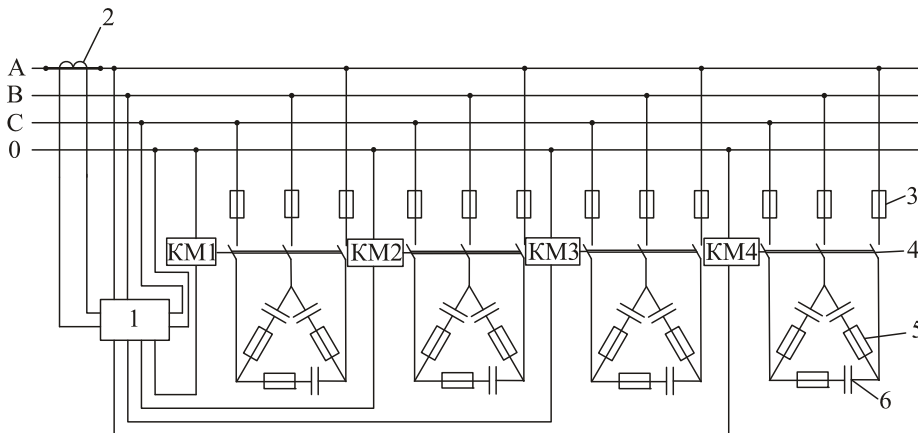


Рис. 3. Схема конденсаторної установки з дискретним регулюванням потужності

Ступінчато-регульована конденсаторна установка складається з певної кількості конденсаторів, підімкнених до загальних шин через контактори чи напівпровідникові ключі. Недоліком таких пристроїв є неможливість точного регулювання параметра, тому що потужність батареї змінюється дискретно, збільшуючись або зменшуючись відразу на значення потужності однієї секції.

Автоматичні системи регулювання потужності конденсаторної установки (КУ) будують за розімкнутою або замкнутою схемою. При розімкнутій схемі здійснюється автоматичне керування, при замкнутій — автоматичне регулювання. Автоматичне управління можливе тільки для односекційної КУ, автоматичне регулювання — у разі багатосекційної КУ,

потужність якої багаторазово змінюється в часі відповідно до вимоги режиму розподільчої мережі.

Для управління за розімкнутою схемою односекційної установки автоматичний регулятор не потрібний, тому що можна використовувати реле управління, що реагують на будь-який параметр режиму електричної мережі. При регулюванні за замкнутою схемою застосовують спеціальні автоматичні регулятори. Застосовуючи спеціальні автоматичні регулятори, слід використовувати один параметр або комбінацію параметрів, які істотно змінюються зі зміною потужності КУ.

Регулятор РКМ-220/01, забезпечуючи автоматичне регулювання шістьма або дев'ятьма секціями КУ чи дев'ятьма окремими КУ однієї напруги, можна використовувати для створення систем регулювання реактивної потужності в розподільних мережах промислових підприємств. Узгодження декількох регуляторів, що працюють в одній розподільній мережі, досягається за рахунок використання систем керування. Однак реалізація таких систем із розосередженою установкою значного числа регуляторів у вузлах розподільної мережі й узгодження алгоритмів їх роботи є досить складним завданням. Більш перспективною є побудова систем з централізованим комплексним регулюванням джерел реактивної потужності. Таке регулювання, здійснюване на базі АСДУ енергосистем, вимагає складної мікропроцесорної техніки, значної кількості датчиків і каналів зв'язку.

Регульовані КУ підключають до шин розподільних пристроїв через комутуючий апарат. У мережах напругою до 1000 В це може бути контактор або автоматичний вимикач, а в мережах напругою вище 1000 В — вимикач. Проте умови роботи цих апаратів при експлуатації регульованих КУ відрізняються від умов роботи комутуючих апаратів іншого електрообладнання через перехідні процеси, що виникають у моменти комутації конденсаторних батарей. При перехідних процесах з'являються короткочасні імпульси струму, що перевершують номінальний струм КУ, тому необхідно застосовувати пристрої, що обмежують ці перехідні процеси.

При паралельній роботі КУ або окремих її секцій імпульси струму і перенапруги можуть бути значними. Однак вітчизняний і зарубіжний досвід показує, що навіть для потужних КУ максимальний струм включення менше ударного струму КЗ, який витримує вимикач. Імпульси струму і перенапруги при відключенні КУ можуть бути значнішими, ніж при її включенні, якщо відключення відбувається недостатньо швидко.

Для оптимального розміщення конденсаторних установок в радіальній мережі необхідно мінімізувати функцію:

$$f = \sum_{i=1}^n r_i [(Q_{КВи} - Q_i)^2 + \delta_{Q_i}^2], \quad (9)$$

де $\delta_{Q_i} = \sqrt{D(Q_i)}$ — середньоквадратичне відхилення значення навантаження.

При цьому оптимальна потужність конденсаторних установок визначається за формулою:

$$Q_{\text{КУ}i} = Q_i + \frac{r_{\text{ЕКВ}}}{r_i} (Q_{\text{КУ}\Sigma} - \sum_{i=1}^n Q_i), \quad (10)$$

де $r_{\text{ЕКВ}}$ — еквівалентний опір мережі.

Висновки

1. Висока вартість реактивної енергії робить економічно доцільною компенсацію реактивної потужності електроприймачів харчових виробництв.

2. Вартість втрат електричної енергії зростає значно швидше, ніж питома вартість конденсаторів, що дозволяє забезпечити всі асинхронні двигуни конденсаторами індивідуальної компенсації і суттєво знизити втрати в електричних мережах промислових підприємств напругою до 1кВ.

3. Застосування конденсаторів індивідуальної компенсації дозволяє відмовитися від складних і дорогих пристроїв регулювання потужності конденсаторних установок, якими необхідно комплектувати установки централізованої компенсації на трансформаторних підстанціях.

4. Захист двигуна від режиму самозбудження можна здійснити шляхом підключення конденсаторів до затискачів двигуна через автоматичний вимикач, що обладнаний електромагнітом дистанційного відключення, паралельно затискачам двигуна підключають реле максимальної напруги, сигнал керування з реле подають на електромагніт автоматичного вимикача і відключають конденсаторну установку при підвищенні напруги безпосередньо на двигуні.

5. Запропонована методика вибору потужності КУ не вимагає суттєвих трудовитрат, дає конкретні результати, точність розрахунку практично не залежить від рівня інфляції. Але методика дає задовільні результати тільки для великих цехів хімічних, машинобудівних і металургійних підприємств. На невеликих підприємствах, особливо якщо вони живляться від кільцевої міської мережі напругою 10 кВ, необхідно вводити поправку до розрахунку.

6. Споживання реактивної потужності протягом доби нерівномірне. Режим роботи всіх джерел реактивної потужності повинен відповідати графіку споживання реактивної потужності. Потужність КУ необхідно змінювати залежно від графіка споживання реактивної потужності.

Література

1. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств / В.Є. Шестеренко. — Вінниця: Нова Книга, 2011. — 656 с.
2. Сірий О.М. Розрахунки при проектуванні та реконструкції систем електропостачання промислових підприємств: навч. посібник / О.М. Сірий, В.Є. Шестеренко. — Київ: ІСДО, 1993. — 592 с.
3. Шестеренко В.Є. Електропостачання промислових підприємств / В.Є. Шестеренко, О.В. Шестеренко. — Київ, 2013. — 424 с.
4. Shesterenko V., Sydorochuk I. Reactive power compensation in the combined system of sugar refinery electricity // Ukrainian Food Journal. — 2013. — Volume 2, Issue 1. — P. 116—122.
5. Шестеренко В.Є. Оптимізація систем електроспоживання промислових підприємств / В.Є. Шестеренко. — Київ: ЧП «Глана», 2001. — 214 с.
6. Shesterenko V., Sidorochuk I. Research of the features of reactive power compensation in the combined system of food industry // Ukrainian Journal of Food Science. — 2013. — Volume 1, Issue 1. — P. 89—95.

7. Shesterenko V., Izvolensky I., Mashchenko O., Shesterenko O. Optimization of power supply system at food production enterprises.// Ukrainian Journal of Food Science. — 2014. — Volume 2, Issue 1. — P. 97—105.

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В.Е. Шестеренко, И.Е. Изволенский

Национальный университет пищевых технологий

В статье рассмотрены пути повышения эффективности компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях. Приведены основные аспекты нормативной методики выбора мощности компенсирующих устройств в зависимости от напряжения сети и конфигурации отдельных ее элементов. Показана целесообразность использования каждого синхронного двигателя для компенсации реактивной мощности. Если коэффициент загрузки синхронного двигателя меньше единицы, экономически целесообразно использовать полностью ожидаемую реактивную мощность двигателя. Система комплексной компенсации обеспечивает смену в акцентах управления мощностями конденсаторной установки от децентрализации к системной целеустремленности решения проблемы, что концептуально связано с оптимизацией режима электропотребления на промышленном предприятии. Даны рекомендации по внедрению системы.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсация, система электро-снабжения.