

**Висновки.** Використання КРПП-ПНС у джерелі струму, наприклад для живлення потужних освітлювальних світлодіодів чи для заряджання акумуляторів, дозволяє покращити параметри такого джерела, а саме значно зменшити втрати під час комутаційних процесів, тим самим підвищити ККД, а також дозволяє підвищити частоту роботи силового ключа до десятків мегагерц і зменшити динамічні втрати на ключі, що, у свою чергу, веде до покращення масогабаритних показників. Вирази електромагнітних процесів, що отримані у статті, можна використовувати для розрахунку стабілізаторів струму на основі КРПП-ПНС. Проведене моделювання електромагнітних процесів у КРПП-ПНС у режимі джерела струму загалом підтвердило коректність теоретичних розрахунків. Для високої стабільності вихідного струму КРПП-ПНС обов'язково необхідно використовувати замкнену систему стабілізації струму, оскільки в розімкненій системі вихідний струм суттєво залежить від опору навантаження та кількості підключених світлодіодів.

#### Список використаних джерел

1. *Ли Ф. К.* Высокочастотные квазирезонансные преобразователи / Ф. К. Ли // ТИИЭР. Тем. вып. "Энергетическая электроника" / под ред. В. А. Лабунцова. – 1988. – Т. 76, № 4. – С. 83–97.
2. *Городний О. М.* Порівняльна оцінка енергетичної ефективності імпульсних перетворювачів з квазирезонансними та звичайними ключами за результатами моделювання / О. М. Городний, В. В. Гордієнко, Б. І. Чуб // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник. – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – № 4 (61). – С. 222–231.
3. *Городний А. Н.* Анализ мощности рассеивания транзисторным ключом в последовательных импульсном и квазирезонансном преобразователях / А. Н. Городний // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 75–76.
4. *Горяшин Н. Н.* Использование квазирезонансного преобразователя напряжения для светодиодного источника света большой мощности / Н. Н. Горяшин, А. С. Сидоров. – Красноярск, 2013. – 6 с.
5. *Ревко А. С.* Проблема широтно-импульсного регулирования в квазирезонансных преобразователях / А. С. Ревко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч. 8. – С. 50–53.
6. *Денисов Ю. А.* Анализ электромагнитных процессов в системе квазирезонансный импульсный преобразователь, переключаемый при нулевом токе – двигатель постоянного тока / Ю. А. Денисов, А. С. Ревко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2000. – Ч. 4. – С. 29–33.

УДК 621.311

**Б.І. Кулик, асистент**

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

#### АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ДІЮЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

**Б.И. Кулик, ассистент**

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

#### АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Bohdan Kulyk, assistant**

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

#### CONTROL ALGORITHM OF REACTIVE POWER COMPENSATION ARTIFICIAL MEANS IN EXISTING ELECTRIC SYSTEM

*Розглянуто наявні підходи до регулювання потужності пристроїв компенсації реактивної потужності. Для сталого режиму роботи діючої електричної системи підприємства запропоновано алгоритм цільового управління навантаженням по реактивній потужності. Показано можливості алгоритму прогнозувати навантаження по реактивній потужності протягом технологічної зміни підприємства із врахуванням функціональних зв'язків між*

## VISNYK OF CHERNIHIV STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

параметрами режиму. Результати роботи рекомендується використовувати під час розроблення алгоритмів роботи мікропроцесорних пристроїв управління конденсаторними установками.

**Ключові слова:** діюча електрична система, сталий режим роботи електричної мережі, компенсація реактивної потужності, прогнозування електричних навантажень, алгоритм управління.

*Rассмотрены существующие подходы к регулированию мощности устройств компенсации реактивной мощности. Для установившегося режима работы действующей электрической системы предприятия предложен алгоритм целевого управления нагрузкой по реактивной мощности. Показаны возможности алгоритма прогнозировать нагрузку по реактивной мощности в течение технологической смены предприятия с учетом функциональных связей между параметрами режима. Результаты работы рекомендуется использовать при разработке алгоритмов работы микропроцессорных устройств управления конденсаторными установками.*

**Ключевые слова:** действующая электрическая система, установившийся режим работы электрической сети, компенсация реактивной мощности, прогнозирование электрических нагрузок, алгоритм управления.

*The existing approaches to power control of reactive power compensation devices are considered in this article. The algorithm of reactive-power load control for steady mode of existing enterprise electric system is offered. Possibilities of algorithm to forecast reactive-power loading during the enterprise technological shift taking into account functional links between the mode parameters are shown. The results are recommended to use in the development of microprocessor control algorithms of capacitor units.*

**Key words:** actual electric system, steady-state operation of the electrical grid, reactive power compensation, forecast of the electric load, control algorithm.

**Вступ.** Передача реактивної енергії в діючих електричних системах (ДЕС) супроводжується додатковим нагрівом струмоведучих частин електроустановок мереж, а отже, і додатковими втратами активної енергії і напруги. Ефективним способом зниження втрат активної енергії і підвищення якості споживаної електроенергії в ДЕС є компенсація реактивної потужності [1].

Основними технічними засобами штучної компенсації реактивної потужності (ЗШКРП) у ДЕС є: синхронні двигуни, синхронні компенсатори, конденсаторні установки, статичні тиристорні конденсатори, компенсаційні перетворювачі [2].

Регулювання потужності ЗШКРП здійснюється за такими параметрами: час доби, напруга, струм навантаження, значення і напрям реактивної потужності [3]. Регулювання за часом доби є найбільш простим видом регулювання, яке доцільно застосовувати у тих випадках, коли режим реактивного навантаження і напруги у вузлах електричних мереж є достатньо стабільним. Регулювання потужності за напругою доцільно в тих випадках, коли режим напруги визначається в основному тільки режимом реактивних навантажень. Здебільшого це можливо тоді, коли ЗШКРП підключаються до мережі, яка живиться від нерегульованого трансформатора. Регулювання за струмом навантаження доцільно у тому випадку, коли за своїм характером графіки електричних навантажень по активній і реактивній потужностях збігаються. Регулювання по величині і напрямку реактивної потужності слід застосовувати тоді, коли характери цих графіків один від одного відрізняються, а вимогу реактивної потужності в мережу енергосистеми необхідно обмежити. Регулювання потужністю ЗШКРП здійснюється за допомогою мікропроцесорних регуляторів реактивної потужності, які працюють за заданими параметрами. Практика показує, що наявні алгоритми управління ЗШКРП не забезпечують повною мірою такі вимоги [4]: 1) мінімум втрат електроенергії в мережах споживачів у всіх режимах добового електроспоживання; 2) підтримання рівнів напруги в допустимих межах; 3) надійність роботи ЗШКРП.

Отже, нині розроблення алгоритму управління ЗШКРП у ДЕС, який буде відповідати вищезазначеним вимогам, є актуальним завданням.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогодні методологічною основою розв'язання експлуатаційних задач управління ЗШКРП є система нелінійних алгебраїчних рівнянь, які відображають сталий режим роботи мережі з використанням законів Кірхгофа й Ома і принципів нелінійного математичного програмування. Відомо, що умова визначеності оцінювання сталого режиму будь-якої електричної мережі виконується тільки при заданості її базисного вузла (вузла, в якому напруга відома і постійна під час зміни навантажень мережі). Дослідження режимів роботи ДЕС показали велику динаміку зміни у часі параметрів режиму та нестационарність напруги  $U(t)$  навіть на межі балансового розділу розподі-

льних мереж споживачів і мереж енергопостачальної організації [5]. Також параметри нормального сталого режиму роботи ДЕС мають функціональні зв'язки, які через стохастичний характер зміни величин параметрів режиму неоднозначні. Під час управління навантаженням по реактивній потужності у часі  $Q(t)$ , як випадковим процесом, необхідно враховувати ці зв'язки.

Нижче представлені результати натурального експерименту, проведеного в ДЕС підприємства "Чернігівське Хімволокно". Об'єктом дослідження в ньому є нормальний сталий режим роботи вводу розподільчої підстанції РП-2 підприємства (фідер 32), що живиться від Чернігівської ТЕЦ. До завдання експерименту входили прогнозування енергетичного стану мережі з формуванням алгоритму цільового управління реактивною потужністю. Вихідними параметрами сталого режиму роботи мережі послужили експериментально отримані півгодинні електричні навантаження по активній та реактивній потужностях та відповідні їм осереднені значення напруги станом на березень 2007 р. Розрахунковим шляхом були отримані втрати активної та реактивної потужностей у фідері 32. Для виявлення функціональних зв'язків між параметрами режиму було використано кореляційний та регресійний аналіз.

У табл. 1 наведені коефіцієнти кореляції ( $K_r$ ) між півгодинними електричними навантаженнями по реактивній потужності першої технологічної зміни 1 березня 2007 р. з півгодинними електричними навантаженнями по реактивній потужності цієї ж зміни з другого по десяте березня. Знак коефіцієнтів кореляції вказує на пряму залежність між добовими навантаженнями, але величина не визначає сильної тісноти.

Таблиця 1

*Коефіцієнти кореляції між добовими електричними навантаженнями по реактивній потужності*

| <b>Коефіцієнт кореляції навантажень 01.03.2007 з навантаженнями:</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 02.03.07   | 03.03.07 | 04.03.07 | 05.03.07 | 06.03.07 | 07.03.07 | 08.03.07 | 09.03.07 | 10.03.07 |
| 0,71   | 0,70     | 0,70     | 0,43     | 0,75     | 0,77     | 0,62     | 0,68     | 0,66     |

У табл. 2 наведені коефіцієнти кореляції між півгодинними електричними навантаженнями по реактивній потужності за час з 6:00 до 6:30 першої технологічної зміни з півгодинними електричними навантаженнями по реактивній потужності першої технологічної зміни за 10 діб березня 2007 р.

Таблиця 2

*Коефіцієнти кореляції між півгодинними електричними навантаженнями по реактивній потужності*

| <b>Коефіцієнт кореляції півгодинного навантаження (6:00–6:30) з навантаженням за час:</b> |           |           |           |           |           |            |             |             |             |             |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 6:30–7:00   | 7:00–7:30 | 7:30–8:00 | 8:00–8:30 | 8:30–9:00 | 9:00–9:30 | 9:30–10:00 | 10:00–10:30 | 10:30–11:00 | 11:00–11:30 | 11:30–12:00 |
| 0,97  | 0,95      | 0,96      | 0,95      | 0,94      | 0,89      | 0,88       | 0,86        | 0,82        | 0,68        | 0,67        |

З табл. 1–2 видно, що коефіцієнти кореляції між півгодинними навантаженнями більші, ніж між добовими. Найтісніший зв'язок між корелюючими навантаженнями за час 6:00–6:30 припадає на навантаження за час 6:30–7:00,  $K_r$  між якими становить 0,97. Статистичний зв'язок слабшає в міру збільшення часу між корелюючими півгодинними навантаженнями. Так,  $K_r$  між навантаженнями за час 6:00–6:30 з навантаженнями за час 11:30–12:00 становить 0,67.

Провівши кореляційний аналіз між добовими півгодинними навантаженнями та між півгодинними навантаженнями за добу протягом березня як по активній, так і по реактивній потужностях, загальна тенденція зміни коефіцієнтів кореляції зберігалась. Це дало змогу зробити висновок про найтісніший статистичний зв'язок між сусідніми півгодинними електричними навантаженнями.

Для кожного навантаження на  $n$  півгодинному інтервалі осереднення навантажень на основі статистичного зв'язку з навантаженням на  $n-1$  півгодинному інтервалі осереднення отримано математичну регресійну модель для короткотермінового прогнозу електричного навантаження. Для отриманих моделей зроблено оцінювання дисперсії параметрів, виконано перевірку адекватності моделі за критеріями Фішера і Ст'юдента. Отже, для першої технологічної зміни математичні регресійні моделі прогнозованого електричного навантаження по реактивній потужності  $Q$  для кожного півгодинного інтервалу осереднення на основі попереднього півгодинного навантаження по реактивній потужності  $Q'$  наведені в табл. 3.

За цими моделями були отримані прогнозовані півгодинні навантаження по реактивній потужності на наступну першу зміну. На рис. зображено реальний та прогнозований графіки електричних навантажень по реактивній потужності для першої технологічної зміни на 11.03.2007. Як  $Q'$  взяті електричні навантаження за 10.03.2007.

Таблиця 3

*Математичні регресійні моделі прогнозованого електричного навантаження*

| Реальні інтервали часу доби | Математичні регресійні моделі |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 6:00–6:30                   | $Q = 201 + Q'$                |
| 6:30–7:00                   | $Q = 89 + 0,94Q'$             |
| 7:00–7:30                   | $Q = 19 + Q'$                 |
| 7:30–8:00                   | $Q = 75 + 0,96Q'$             |
| 8:00–8:30                   | $Q = 35 + 0,98Q'$             |
| 8:30–9:00                   | $Q = -16 + 1,03Q'$            |
| 9:00–9:30                   | $Q = 2 + 0,97Q'$              |
| 9:30–10:00                  | $Q = 43 + 0,93Q'$             |
| 10:00–10:30                 | $Q = 50 + 0,94Q'$             |
| 10:30–11:00                 | $Q = 1 + 1,02Q'$              |
| 11:00–11:30                 | $Q = -15 + Q'$                |
| 11:30–12:00                 | $Q = -78 + 1,02Q'$            |
| 12:00–12:30                 | $Q = -154 + 1,05Q'$           |
| 12:30–13:00                 | $Q = -41 + 0,99Q'$            |
| 13:00–13:30                 | $Q = 4 + 0,91Q'$              |
| 13:30–14:00                 | $Q = 95 + 0,95Q'$             |

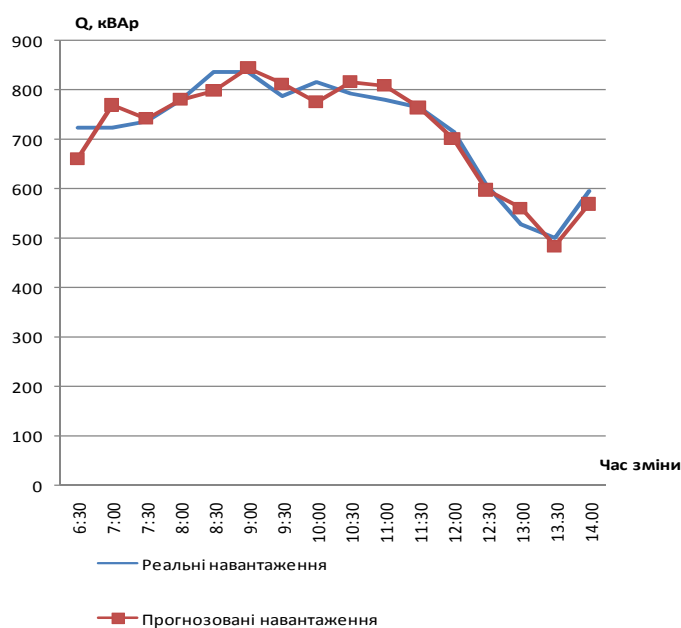


Рис. Графіки реальних та прогнозованих навантажень по реактивній потужності

З рис. видно, що отримані регресійні моделі дають достатньо точні результати прогнозування навантажень по реактивній потужності і дають можливість управляти ЗШКРП з упередженням. Точність оцінювалась, враховуючи мінімальну дискретність потужності конденсаторних установок, наявних у досліджуваній ДЕС.

У результаті статистичного оброблення основних та залежних параметрів нормального сталого режиму роботи досліджуваної ДЕС було отримано коефіцієнти кореляції між втратами активної потужності  $\Delta P$ , втратами реактивної потужності  $\Delta Q$ , напругою  $U$  з реактивними навантаженнями  $Q$  ( $Q \rightarrow \Delta P$ ,  $Q \rightarrow \Delta Q$ ,  $Q \rightarrow U$ ) на кожному півгодинному інтервалі часу доби. Також для кожного півгодинного інтервалу часу доби були складені функції регресії  $\Delta P(Q)$ ,  $\Delta Q(Q)$ ,  $U(Q)$ . За отриманими коефіцієнтами кореляції та функціями регресії можна зробити висновки щодо ступеня впливу навантаження по реактивній потужності на втрати активної потужності й енергії та на напругу в заданому вузлі електричної мережі. Це дасть можливість визначити цілі управління ЗШКРП у цьому вузлі на кожному досліджуваному інтервалі часу.

Наприклад, для півгодинного інтервалу часу доби (7:30–8:00) були отримані коефіцієнти кореляції:

$$K_r(Q \rightarrow \Delta P) = 0,89; K_r(Q \rightarrow \Delta Q) = 0,90; K_r(Q \rightarrow U) = 0,05.$$

Для цього ж півгодинного інтервалу часу доби були складені такі функції регресії:

$$\begin{cases} \Delta P(Q) = 3,187 + 0,010Q; \\ \Delta Q(Q) = 1,497 + 0,0051Q; \\ U(Q) = 10,569 + 0,000026Q. \end{cases}$$

Значення коефіцієнта кореляції  $K_r(Q \rightarrow U)$  за величиною показує відсутність статистичного зв'язку між корелюючими параметрами режиму ДЕС і незалежність зміни напруги досліджуваного вузла мережі від навантаження по реактивній потужності. Знак  $K_r(Q \rightarrow U)$  показує незначне зростання напруги під час зростання навантаження по реактивній потужності. Тобто напруга у цьому вузлі не залежить від зміни  $Q$  цього фідера і тому, управляючи потужністю ЗШКРП, не вдасться вплинути на її рівень. Компенсація реактивної потужності дозволить зменшити втрати активної та реактивної потужності у фідері. Коефіцієнти регресії показують ступінь зменшення втрат активної та реактивної потужності від протікання реактивної потужності у цьому вузлі ДЕС.

Отже, для досліджуваного вузла ДЕС на інтервалі часу доби (7:30–8:00), управляючи потужністю ЗШКРП, можна досягти мети енергозбереження, мети забезпечення надійності елементів ДЕС, але при цьому немає можливості впливати на якість напруги.

Для забезпечення тільки надійності 3-жильного силового кабелю типу АСБ з перерізом жили 185 мм<sup>2</sup>, яким виконаний фідер 32, осереднення навантажень провести на інтервалах часу тривалістю 1,5 години. Це приведе до зменшення кількості комутацій конденсаторної установки і, відповідно, до збільшення її надійності.

У результаті проведених досліджень можна запропонувати алгоритм цільового управління ЗШКРП у ДЕС. Кроки його такі.

1. Для заданого вузла електричної мережі за допомогою АСКОЕ зняти електричні навантаження по активній і реактивній потужностях та відповідні їм значення напруги. Кількість необхідних вимірів визначається мінімальним (для приведення похибки обчислень у допустимі межі) обсягом вибірки випадкових величин.

2. Осереднити їх на інтервалі часу, рівному мініальному часу комутації батарей конденсаторів, встановлених у діючій мережі. Цей час визначається часом розряду конденсаторів і для установок вище 1000 В дорівнює п'ять хвилин [6]. Цей інтервал часу буде мінімальним інтервалом осереднення навантажень по реактивній потужності для забезпечення надійності конденсаторної установки.

3. Розрахувати втрати активної та реактивної енергії на кожному інтервалі осереднення в елементах ДЕС обумовлені знятими навантаженнями.

4. Задати допустимі межі, в яких може перебувати напруга в заданому вузлі електричної мережі (це може бути  $\pm 5\% U_{\text{ном}}$ , продиктоване вимогами ГОСТ 13109–97, або за необхідності це значення може задаватися вручну).

5. Знайти найтісніші статистичні зв'язки між осередненими навантаженнями по реактивній потужності, розрахувавши коефіцієнти кореляції  $K_r$ .

6. Скласти функції регресії  $Q(Q')$  на кожному інтервалі осереднення навантаження по реактивній потужності.

7. Спрогнозувати на кожному інтервалі осереднення навантаження по реактивній потужності.

8. На кожному інтервалі осереднення розрахувати коефіцієнти кореляції  $Q \rightarrow \Delta P$ ,  $Q \rightarrow \Delta Q$ ,  $Q \rightarrow U$  та скласти функції регресії  $\Delta P(Q)$ ,  $\Delta Q(Q)$ ,  $U(Q)$ .

9. Визначити можливі цілі управління ЗШКРП та ступінь їх досягнення. За необхідності розширити інтервал осереднення.

10. Включити необхідну потужність ЗШКРП.

**Висновки.** У результаті проведених досліджень нормального сталого режиму роботи діючої електричної системи запропоновано алгоритм управління ЗШКРП, який враховує функціональні зв'язки між параметрами режиму та дозволяє реалізовувати цільову компенсацію реактивної потужності з упередженням. В основу алгоритму закладено кореляційний та регресійний аналіз параметрів режиму ДЕС.

Запропонований алгоритм може бути покладено в основу роботи мікропроцесорних коректорів коефіцієнта потужності, що дозволить підвищити ефективність компенсації реактивної потужності.

#### Список використаних джерел

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
2. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях / В. А. Веников, Л. А. Жуков, И. И. Карташов, Ю. П. Рыжов. – М. : Энергия, 1975. – 136 с.
3. Ильяшов В. П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок / В. П. Ильяшов. – М. : Энергия, 1966. – 62 с.
4. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління / Б. С. Рогальський. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – Ч. 1. – 118 с.
5. Скоробогатова В. І. Підвищення функціональної ефективності управління потоками реактивної енергії в діючих електричних мережах / В. І. Скоробогатова, Б. І. Кулик // Вісник ЧДТУ. – 2007. – № 30. – С. 118–121.
6. ГОСТ 12.2.007.5–75. Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные. Требования безопасности. – Введ. 1978–01–01. – (Межгосударственный стандарт).