

13. In Anapa opened the first in Russia «smart» station. Access: <http://pronedra.ru/alternative/2012/07/26/solnechnie-paneli-na-anapskom-zhd-vokzale/>.
14. Improving the efficiency of the traction power supply in the application of renewable electricity. / Yu.P. Goncharov [et al.] // Railway Problems, a scientific journal / Railway Institute. – Warszawa, 2014. – № 162. – Pp. 65-82. (Rus.)
15. In Belgium, has been tested train on solar energy. Access: <http://www.1tv.ru/news/world/178100>.
16. Braun M. Power sources. Calculation and design / M. Braun. – K. : МК-Press , 2005. – 279 p. (Rus.)
17. Maximization of electrical energy from photogenerator / E.I. Sokol, Yu.P. Goncharov, V.V. Zamaruev, S.Yu. Krivosheev, E.M. Zarzhavets, E.A. Malyarenko, B.A. Styslo, A.V. Eres'ko // Technical electrodynamics. Subjects. Issue «Power Electronics and Energy Efficiency». – 2012. – Part 4. – Pp. 110-116. (Rus.)
18. Bal'jan R.H. Transformers for electronics / R.H. Bal'jan. – Moscow : Sovetskoe radio, 1971. – 720 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Кузнецов
д-р техн. наук, проф., «ДНУЖТ им. ак. В. Лазаряна»

Статья поступила 03.04.2015

УДК 621.316.1.016

© Лежнюк П.Д.¹, Демов О.Д.², Півнюк Ю.Ю.³

ПОЕТАПНИЙ РОЗРАХУНОК КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОСНИХ СПАДІВ НАПРУГИ

Запропоновано метод поетапного установаження компенсуючих установок в розподільних електричних мережах з використанням відносних спадів напруги як інтегральних показників. Відносні спади напруги, як інтегральні показники, дозволяють одночасно оцінювати втрати активної потужності під час передачі реактивної і спади напруги. Розроблений метод дозволяє, на відміну від відомих, спростити процес оптимізації шляхом її лінеаризації.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, розподільні електричні мережі, відносні спади напруги.

Лежнюк П.Д., Демов О.Д., Півнюк Ю.Ю. Поэтапный расчет компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях с использованием относительных падений напряжения. Предложен метод поэтапного установаження компенсующих установок в распределительные электрические сети с использованием относительных падений напряжения как интегральных показателей. Относительные падения напряжения, как интегральные показатели, позволяют одновременно оценивать потери активной мощности при передаче реактивной и спады напряжения. Разработанный метод позволяет, в отличие от известных, упростить процесс оптимизации путем ее линейзации.

Ключевые слова: компенсации реактивной мощности, распределительные электрические сети, относительные падения напряжения.

P.D. Lezhniuk, O.D. Demov, Yu.Yu. Pivniuk. Step-by-step calculation of reactive power

¹ д-р техн. наук, професор, «Вінницький національний технічний університет», м. Вінниця, lpd@inbox.ru
² канд. техн. наук, доцент, «Вінницький національний технічний університет», м. Вінниця, demov@yandex.ua

³ аспірант, «Вінницький національний технічний університет», м. Вінниця, pivnjuk-jurijj@rambler.ru

compensation in electrical distribution networks using relative voltage drops. A method of phased installation of compensating units in electrical distribution networks using relative voltage drops as integral indicators was proposed. Introduction of compensating units is one of the most effective ways to reduce electricity losses in distribution networks. In accordance with the existing methods this task is carried out in two ways: maximum reduction of losses and providing acceptable levels of voltage in load nodes. Complicated mathematical methods, nonlinear programming methods in particular, are necessary to solve this problem. Results of the calculations, obtained by these methods, are difficult to be checked on compliance with both criteria, since they characterize different technical parameters. On the other hand, these criteria are of common physical nature which makes it possible to form the integral indicators evaluating both active power losses and voltage drops. The aim of the article is to research and use integral indicators which evaluate both active power losses and voltage drops. A mathematical model of positioning compensating units in electrical network was presented. A calculation example of the phased establishing of compensating units in electrical distribution network by two methods: the one being in use now and the proposed one were presented. Calculation results are given in tabular and graphical forms. These results show the coincidence of the results obtained by these two methods. Proposed method provides minimum active power losses, specified relative voltage drop value and makes it possible to simplify the introduction of compensating units through linearization.

Keywords: reactive power compensation, electrical distribution networks, relative voltage drops.

Постановка проблеми. Впровадження компенсуючих установок (КУ) є одним з ефективних шляхів зниження втрат електроенергії у розподільних мережах (РМ). Відповідно до існуючих методів [1-5] розв'язання цієї задачі проводиться за двома критеріями: максимальним зниженням втрат і забезпеченням допустимих рівнів напруги у навантажувальних вузлах мережі. Розв'язання задачі в такій постановці потребує складних математичних методів, зокрема методів нелінійного програмування [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати розрахунків, одержані вказаними методами, практично складно перевірити на відповідність обом критеріям, оскільки вони характеризують різні технічні параметри. З іншої сторони, у [4] показано, що ці критерії мають спільну фізичну природу, що дає можливість формувати інтегральні показники, які одночасно оцінюють втрати активної потужності і спади напруги.

Мета роботи – дослідження і використання інтегральних показників, які одночасно оцінюють втрати активної потужності і спади напруги.

Викладення основного матеріалу. Проведемо відповідні дослідження для ділянки електричної мережі, заступна схема якої зображена на рис. 1.

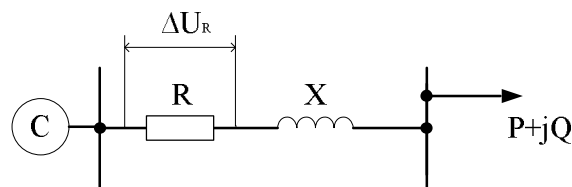


Рис. 1 – Заступна схема ділянки електричної мережі: С – енергосистема; ΔU_R – активна складова спаду напруги; R, X – активний та індуктивний опори; P, Q – активне та реактивне навантаження мережі

Втрати активної потужності під час передачі реактивної потужності Q визначаються як

$$\Delta P_Q = \Delta U_R \cdot \frac{Q}{U}, \quad (1)$$

де U – напруга у вузлі навантаження.

Знайдемо значення ΔU_R . Спад напруги на ділянці електричної мережі (рис. 1):

$$\Delta \dot{U} = IR + jIX = \Delta U_R + j\Delta U_X, \quad (2)$$

де I – повний струм навантаження; ΔU_X – реактивна складова спаду напруги.
Активну складову спаду напруги у свою чергу можна записати як

$$\Delta \dot{U}_R = I_a R + jI_p R = \Delta U_{aR} + j\Delta U_{pR}, \quad (3)$$

де I_a, I_p – активна та реактивна складові повного струму навантаження I ; $\Delta U_{aR}, \Delta U_{pR}$ – активні спади напруги, зумовлені протіканням відповідно активного та реактивного струмів, на опорі R .

На рис. 2 приведені векторні діаграми напруг, які дозволяють знайти спади напруги ΔU_{pR} .

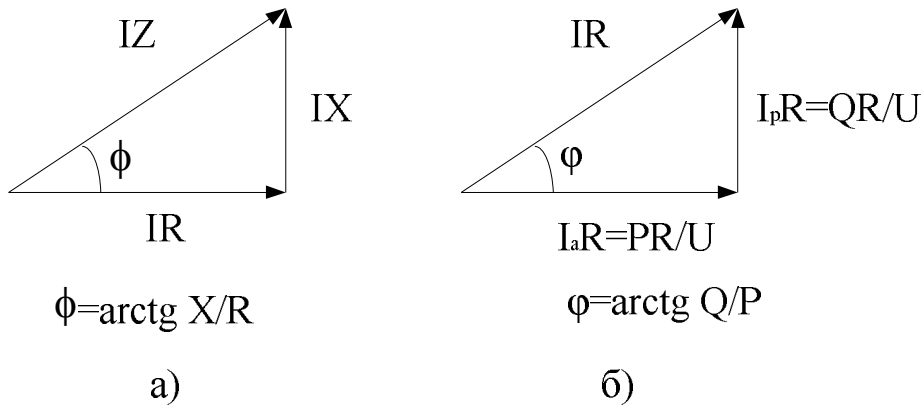


Рис. 2 – Векторні діаграми спаду напруги на повному (Z) (а) і на активному (R) (б) опорах ділянки електричної мережі

Спади напруги ΔU_{pR} визначаються як:

$$\Delta U_{pR} = I \cdot Z \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi. \quad (4)$$

Розглянемо економічний зміст величини ΔU_{pR} . Для цього знайдемо втрати активної потужності ΔP , які створює реактивне навантаження Q :

$$\Delta P = \Delta U_{pR} \cdot \frac{Q}{U};$$

або

$$\Delta P = I \cdot Z \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \frac{Q}{U}. \quad (5)$$

Якщо врахувати, що $\Delta U_* = \frac{\Delta U}{U}$ – відносний спад напруги, то (5) запишеться як

$$\Delta P = d \cdot \Delta U_* \cdot Q, \quad (6)$$

де $d = \sin \phi \cdot \cos \phi$.

З формули (6) видно, що $\Delta U_* = \frac{\Delta P}{d \cdot Q}$, тобто значення ΔU_* , дозволяє оцінювати не тільки спад напруги, а й питому втрату активної потужності під час передачі Q .

Це дозволяє використовувати значення ΔU_* у розрахунках компенсації реактивної потужності (КРП) в електричній мережі. Очевидно, що під час розрахунку послідовності встановлення КУ у першу чергу їх необхідно установлювати у вузлах із максимальним значенням ΔU_* .

Розглянемо оптимізацію впровадження КУ в електричній мережі шляхом їх поетапного встановлення. Вважаємо, що встановлення КУ можливе тільки на стороні низької напруги трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ.

Розбиваємо процес оптимізації на g етапів. Максимальне зниження втрат на i -ому етапі встановлення КУ в електричній мережі визначається перебором усіх можливих місць встановлення КУ

$$\Delta U_{*i}^{\max} \in \max_{j=1}^n (\Delta U_{*j}), \quad i = \overline{1, g}, \quad (7)$$

де g – кількість етапів встановлення КУ; n – кількість вузлів навантаження, в яких встановлюється КУ.

При переборі здійснюється перевірка виконання наступних обмежень:

1) неможливість зворотних перетоків реактивної потужності

$$\sum_{i=1}^g Q_{kij} < Q_{pj}, \quad (8)$$

де Q_{kij} – потужність КУ, встановленої в j -ому вузлі на i -ому етапі розрахування; Q_{pj} – розрахункове реактивне навантаження j -ого вузла;

2) вузли із недопустимими значеннями напруги виключаються

$$U_j^{\min} \leq U_j \leq U_j^{\max}, \quad (9)$$

де U_j^{\min}, U_j^{\max} – відповідно мінімальне і максимальне гранично допустиме значення напруги у j -ому вузлі навантаження.

Розширена математична модель перебору на i -ому етапі розрахунку (7) буде мати вигляд:

$$\Delta U_{*i}^{\max} = \begin{cases} \Delta U_{*1}, \text{ якщо } \Delta U_{*1} > \Delta U_{*2}, \Delta U_{*3}, \dots, \Delta U_{*n}; \Delta U_{*1} \leq \Delta U_*^{\text{don}}; \\ \Delta U_{*2}, \text{ якщо } \Delta U_{*1} < \Delta U_{*2} > \Delta U_{*3}, \Delta U_{*4}, \dots, \Delta U_{*n}; \Delta U_{*2} \leq \Delta U_*^{\text{don}}; \\ \Delta U_{*3}, \text{ якщо } \Delta U_{*1}, \Delta U_{*2} < \Delta U_{*3} > \Delta U_{*4}, \Delta U_{*5}, \dots, \Delta U_{*n}; \Delta U_{*3} \leq \Delta U_*^{\text{don}}; \\ \dots \\ \Delta U_{*n}, \text{ якщо } \Delta U_{*n-1}, \dots, \Delta U_{*n-2}, \Delta U_{*n-1} < \Delta U_{*n} > \Delta U_{*n+1}, \Delta U_{*n+2}, \\ \dots, \Delta U_{*n+n}; \Delta U_{*j} \leq \Delta U_*^{\text{don}}; \end{cases}, \quad (10)$$

де ΔU_*^{don} – допустиме значення відносних спадів напруги на ділянці електричної мережі.

На всіх етапах встановлення КУ проводиться аналогічний перебір. Кількість етапів визначається як

$$g = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{pj}}{Q_{kij}}. \quad (11)$$

Приклад розрахунку. Провести розрахунок поетапного встановлення КУ для РМ, представленої на рис. 3, і забезпечити компенсацію 50% реактивних навантажень мережі. Задачу розв'язати двома методами: існуючим [3, 6] та запропонованим. Допустиме значення відносних спадів напруги $\Delta U_*^{\text{don}} = 10\%$. Потужність КУ, яка встановлюється на кожному етапі розрахунку, 100 квар.

Розв'язання. Відповідно приведених параметрів схеми РМ (рис. 3) визначені розрахункові параметри схеми заміщення РМ (рис. 4).

Втрати напруг на вітках мережі ΔU_{0j} , визначені за існуючим методом [3] як

$$\Delta U_{0j} = \frac{P_j \cdot R_{0j} + Q_j \cdot X_{0j}}{U_0}, \quad (12)$$

де U_0 – напруга початкової точки вітки.

Напруги у вузлах навантаження РМ розраховані як

$$U_j = U_0 - \Delta U_{0j}. \quad (13)$$

Відносні спади напруги згідно (4) визначені як

$$\Delta U_{*pRj} = \frac{\Delta U_{pR0j}}{U_j}. \quad (14)$$

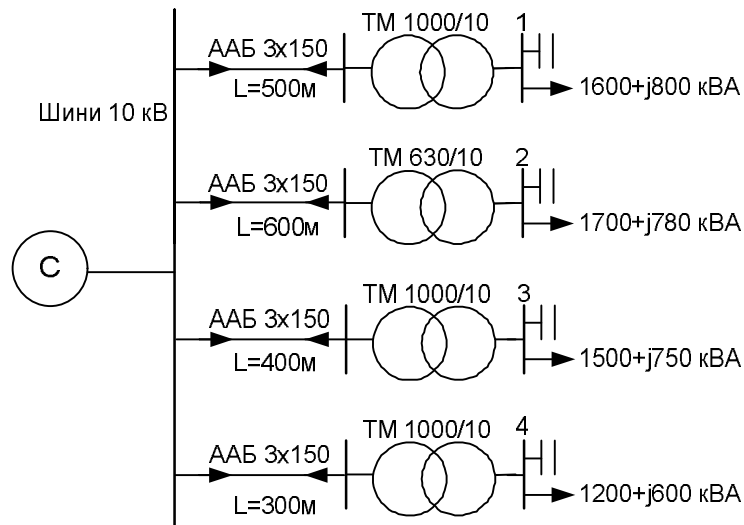


Рис. 3 – Схема розподільної мережі

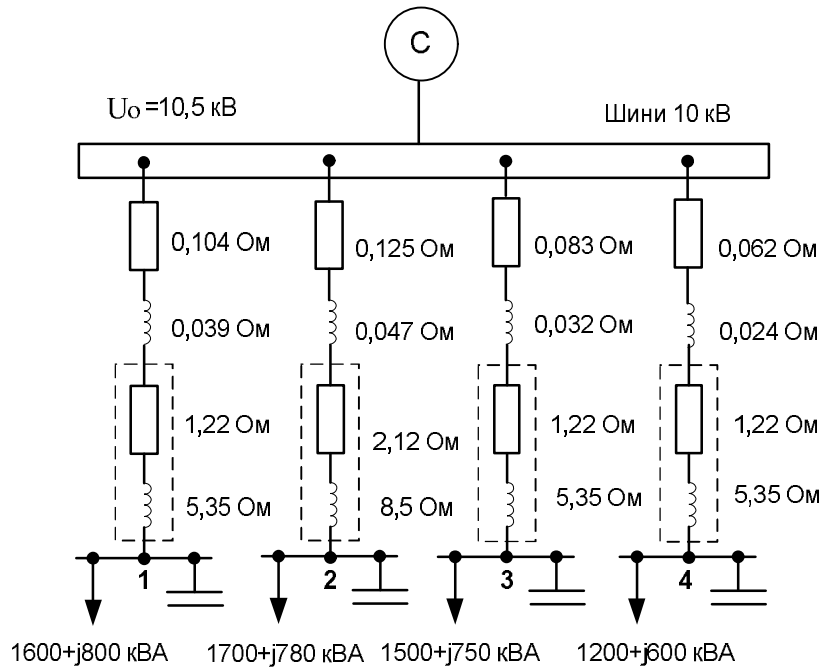


Рис. 4 – Схема заміщення розподільної мережі

Зниження втрат у РМ при встановленні КУ потужністю Q_k у j -ому вузлі на i -ому етапі розрахунку існуючим методом [6] визначені як

$$\delta(\Delta P)_{ij} = \Delta P_{ij}^{до} - \Delta P_{ij}^{після} = \frac{(2Q_{pj}Q_{kij} - Q_{kij}^2)R}{U_j^2}, \quad (15)$$

де $\Delta P_{ij}^{до}$, $\Delta P_{ij}^{після}$ – втрати активної потужності від перетоків реактивної потужності до j -го вузла у РМ відповідно до і після встановлення КУ на i -ому етапі.

На першому етапі розрахунку згідно (12), (13) отримали наступні значення ΔU_{*j} : $\Delta U_{*1}=0,0583$; $\Delta U_{*2}=0,0951$; $\Delta U_{*3}=0,0543$; $\Delta U_{*4}=0,0432$.

Згідно (9) визначаємо ΔU_{*i}^{max} . На першому етапі розрахунку: $\Delta U_{*1}^{max} = \Delta U_{*2} = 0,0951$. Отже, КУ будемо встановлювати у другому вузлі.

На кожному наступному етапі аналогічно знаходимо максимальні значення відносних спадів напруги ΔU_{*i}^{\max} і відповідні місця встановлення КУ. Результати розрахунків 1-3 етапів зведені у таблицю. Результати розрахунків на усіх етапах представлені на графіках (рис. 5-7).

У результаті одержимо, що КУ доцільно встановлювати послідовно у таких вузлах: 2 – 2– 2 – 2– 1 – 3 – 1 – 3 – 2 – 1 – 4 – 3 – 1 – 4 – 2.

Як видно з результатів розрахунку:

- послідовності встановлення КУ, визначені існуючим і запропонованим методами, співпадають;

- запропонований метод забезпечує задане допустиме значення відносного спаду напруги $\Delta U_*^{\text{дон}}$.

Таблиця

Результати розрахунку

№ вузла	Результати розрахунку				Місце встановлення КУ 100 квар (вузол)	
	1	2	3	4	по max $\delta(\Delta P)$	по max ΔU_*
№ етапу	$U_1/\Delta U_{*1}/\Delta U_{*pR1}/\delta(\Delta P)_1$	$U_2/\Delta U_{*2}/\Delta U_{*pR2}/\delta(\Delta P)_2$	$U_3/\Delta U_{*3}/\Delta U_{*pR3}/\delta(\Delta P)_3$	$U_4/\Delta U_{*4}/\Delta U_{*pR4}/\delta(\Delta P)_4$		
1	9,8877	9,5016	9,9294	10,0464	2	2
	0,0583	0,0951	0,0543	0,0432		
	0,0066	0,0111	0,0061	0,0047		
	2,0314	3,6306	1,8502	1,3972		
2	9,8877	9,583	9,9294	10,0464	2	2
	0,0583	0,0873	0,0543	0,0432		
	0,0066	0,009	0,0061	0,0047		
	2,0314	3,08	1,8502	1,3972		
3	9,8877	9,6644	9,9294	10,0464	2	2
	0,0583	0,0796	0,0543	0,0432		
	0,0066	0,0071	0,0061	0,0047		
	2,0314	2,5478	1,8502	1,3972		

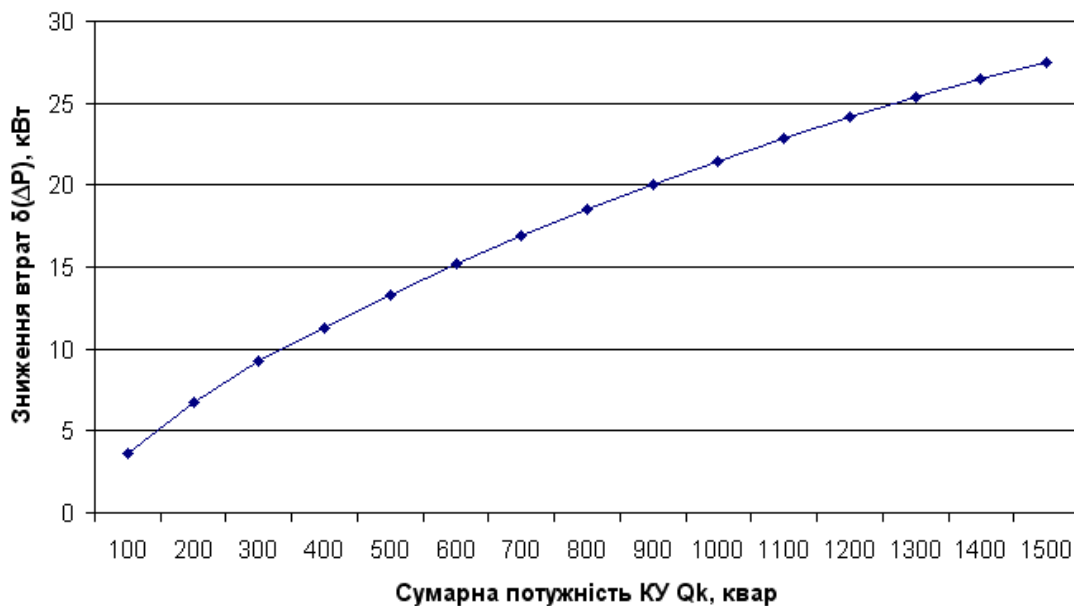


Рис. 5 – Графік функції зниження втрат $\delta(\Delta P)$ у РМ від сумарної потужності КУ Q_k

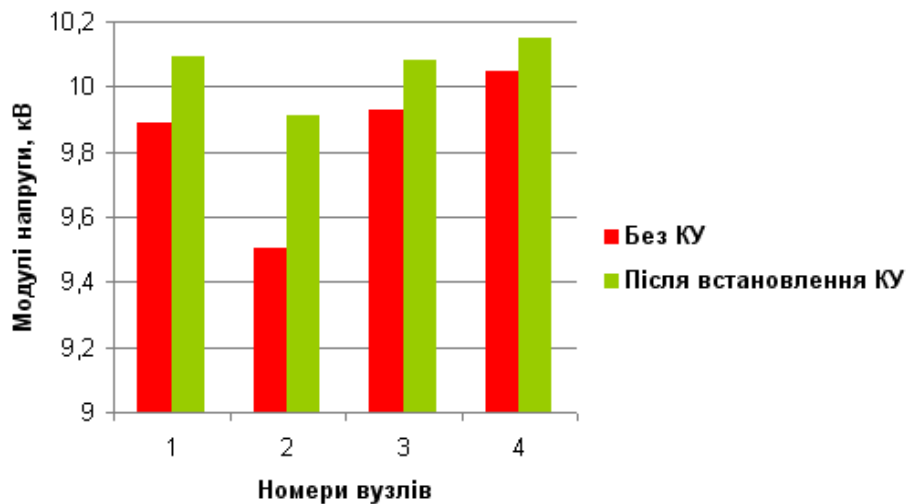


Рис. 6 – Графік зміни значення напруг у вузлах РМ до і після встановлення КУ

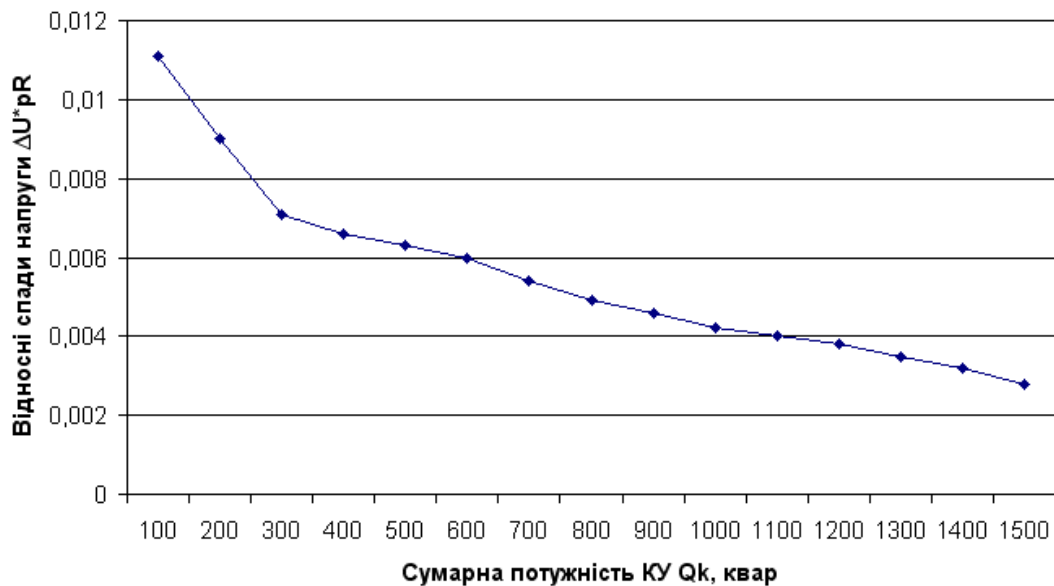


Рис. 7 – Графік функції зниження відносних спадів напруги ΔU_{*pR} у РМ від сумарної потужності КУ Q_k

Висновки

1. Обґрунтовано використання відносних спадів напруги як інтегральних показників, які дозволяють одночасно оцінювати втрати активної потужності під час передачі реактивної і спади напруги.

2. Розроблено метод поетапного встановлення КУ, який на відміну від відомих, дозволяє спростити процес оптимізації шляхом її лінеаризації.

Список використаних джерел:

1. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф.Ф. Карпов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
2. Мельников Н.А. Электрические сети и системы / Н.А. Мельников. – М.: Энергия, 1969. – 456 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических се-

- тей / И.Н. Ковалев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
5. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
 6. Демов О.Д. Розрахунок поетапного впровадження конденсаторних установок в розподільні мережі енергопостачальних компаній при дефіциті коштів / О.Д. Демов, А.Б. Миндюк, І.О. Бандура // Новини енергетики. – 2011. – С. 38-44.

Bibliography:

1. Karpov F.F. Reactive power compensation in distribution networks / F.F. Karpov. – М.: Energy, 1975. – 184 p. (Rus.)
2. Melnikov N.A. Electrical networks and systems / N.A. Melnikov. – М.: Energy, 1969. – 456 p. (Rus.)
3. Idelchik V.I. Electrical systems and networks / V.I. Idelchik. – М.: Energoatomizdat, 1989. – 592 p. (Rus.)
4. Kovalev I.N. Selection of compensating devices in the design of electrical networks / I.N. Kovalev. – М.: Energoatomizdat, 1990. – 200 p. (Rus.)
5. Zhelezko Yu.S. Loss of electricity. Reactive power. Power quality: A guide for practical calculations / Yu.S. Zhelezko. – М.: ENAS, 2009. – 456 p. (Rus.)
6. Demov O.D. Calculation phased implementation capacitors in distribution networks of power supply companies with a deficit of money / O.D. Demov, A.B. Myndyuk, I.A. Bandura // News of Energy. – 2011. – P. 38-44. (Ukr.)

Рецензент: В.М. Кутін
д-р техн. наук, проф., «ВНТУ»

Стаття надійшла 06.05.2015

УДК 621.311(07)

© Яндульський О.С.¹, Нестерко А.Б.²

**ЦЕНТРАЛІЗОВАНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ЧАСТОТИ ТА ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З
ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

Сучасні підходи до керування електроенергетичними системами (ЕЕС) ґрунтуються на використанні математичних моделей систем, без яких неможливо здійснювати оптимальне керування. Отримані з системи моніторингу перехідних режимів (СМППР) дані використовуються для ідентифікації моделі електроенергетичної системи, яка є адекватною відносно процесів зміни частоти ЕЕС і дозволяє вирішувати задачу оптимального керування перехідним режимом ЕЕС. Використання керування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) при регулюванні процесів зміни частоти підвищує ефективність керування. В роботі розроблено структуру та алгоритми роботи ієрархічної системи централізованого керування, що дозволяє залучити до регулювання частоти керувані ВДЕ.

Ключові слова: електроенергетична система, регулювання частоти, оптимальне керування, відновлювані джерела енергії.

Яндульський О.С., Нестерко А.Б. Централизованная система оптимального регулирования частоты и мощности электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии. Современные подходы к управлению электроэнергетическими системами (ЕЭС), основанные на использовании математиче-

¹ д-р техн. наук, професор, НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, yandu_kpi@ukr.net

² аспірант, НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, nesterko@fea.kpi.ua