

УДК 621.313.32

**ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В  
РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

*А. О. Омельчук, кандидат технічних наук*

*e-mail: omelchuk\_anatoli@ukr.net*

**Анотація.** *Наведена методика обґрунтування потужності регульованих конденсаторних установок у визначених місцях розподільної електричної мережі 0,38...10 кВ районної трансформаторної підстанції та оцінки економічної ефективності компенсації реактивної потужності в цій мережі.*

**Ключові слова:** *економічність, компенсація реактивної потужності, витрати електроенергії, конденсаторні установки*

Технологічна та режимна спільність виробництва, передачі-розподілу та використання електричної енергії зобов'язує розглядати компенсацію реактивної потужності (КРП) як спільний захід зниження технологічних витрат електроенергії та забезпечення стійкості роботи електричної системи.

Задачу балансу реактивної потужності у вузлах навантаження системи необхідно вирішувати від споживчих і розподільних мереж, де повна невизначеність, обумовлена суб'єктивним ставленням споживача до КРП до мереж живлення.

Техніко-економічне завдання вибору потужності і розміщення конденсаторних установок (КУ) в електричних мережах розділяється на дві складові: підтримка балансу реактивної потужності в електричних мережах (ЕМ) та зниження втрат потужності і електроенергії в розподільних мережах.

Аналіз досліджень з цього питання засвідчив:

- нерегульованість з КРП в мережах споживачів обумовлює, по-перше, невизначеність і ускладнення у розв'язанні задачі підтримки балансу реактивної потужності, що пов'язане із забезпеченням надійності роботи ЕМ і

підтримкою заданих рівнів напруги у вузлах навантаження, і по-друге, не вирішується задача зниження втрат – це вже питання підвищення економічної ефективності галузі, і воно доки тільки встає на порядок денний;

- відсутність КРП призводить до збільшення загальних втрат в електричних мережах, зменшенню пропускної спроможності розподільних мереж і, кінець кінцем, до збільшення витрат на передачу електроенергії. Розподільні мережеві компанії закладають втрати в тариф на передачу електроенергії, а енергопостачальні компанії транслюють тариф на кінцевих споживачів.

- як першу причину виникнення такої ситуації можна навести зміни в характері навантаження електроспоживання – поширення устаткування на напівпровідниковій базі, збільшення частки освітлювального навантаження одночасно із зменшенням в ній частки ламп розжарювання, збільшення частки нелінійного навантаження у складі побутової техніки призвели до значного звантаження розподільних електричних мереж потоками реактивної потужності;

- другою причиною є недосконалість законодавства, зокрема, з введенням методики [3] із споживачів зняті обмеження щодо споживання реактивної потужності, а суттєвої економічної зацікавленості в КРП у них не з'явилося. За оцінками експертів, за 15 років з балансу ЕМ випала величезна кількість КУ, спровокувавши значне збільшення втрат електроенергії як в системоутворюючих, так і в розподільчих електричних мережах України.

Фактичне оснащення мереж компенсуючими пристроями складає 0,10...0,15 квар/кВт, тоді як оптимальний рівень компенсації згідно [1] становить близько 0,6 квар/кВт, а на думку автора – 0,6...0,8 квар/кВт при оптимальному їх розміщенні в обґрунтованих місцях електричних мереж. Така ситуація зберігається і в сучасних умовах, котрим характерні, з одного боку, зменшення електричного навантаження і зменшення споживання електричної енергії внаслідок спаду виробництва, а з іншого боку, через незначне

підключення компенсуючих пристроїв - різке зниження їх встановленої потужності та рівнів компенсації.

Сучасна структура і функції ЕК різних форм власності та стан відносин між ними і споживачами обумовлюють два рівні розв'язання задачі компенсації реактивної потужності в електричних мережах:

– чинні нормативні методики [3, 4] стимулюють споживачів до забезпечення належного обліку реактивної енергії на власних енергетичних об'єктах та розв'язання задачі компенсації реактивної потужності з метою зменшення її споживання з мереж обласних ЕК;

– обласні ЕК розв'язують задачу компенсації реактивної потужності у власних мережах з метою зниження в них втрат електроенергії, котра закуповується у генеруючих компаній і продається споживачам. Зменшення величини втраченої електроенергії в розподільних мережах безпосередньо збільшує прибутки компаній, які доцільно інвестувати на забезпечення надійного електропостачання споживачів якісною електроенергією.

Вирішення задачі зниження технологічних витрат електроенергії доцільно розглядати як в структурі технічних, так і в структурі організаційно-режимних заходів.

Першочерговими *технічними заходами* є обґрунтування місць встановлення і оптимізація потужності засобів компенсації реактивної потужності в мережах ЕК. Вирішення такого завдання для системи електропостачання сприяє:

- зменшенню технологічних втрат електроенергії в мережах;
- зменшенню навантаження мереж;
- збільшенню пропускної здатності цих мереж, що є особливо важливим в періоди максимуму навантаження;
- регулюванню напруги у вузлах навантаження.

**Мета досліджень** – оптимізація параметрів конденсаторних установок в розподільчій електричній мережі.

**Матеріали та методика досліджень.** Оцінку ефективності запропонованої методики для обласних енергокомпаній розглянемо на прикладі розв'язання першочергової задачі обґрунтування місця встановлення і визначенні оптимальної потужності КУ в електричній мережі.

Як приклад, розглядається схема мережі (рис.1), яка включає районну трансформаторну підстанцію (РТП) напругою 35...110/10 кВ, п'ять відхідних ліній електропередачі напругою 10 кВ із споживчими трансформаторними підстанціями закритого типу (ЗТП) напругою 10/0,4 кВ.

Обґрунтування місця встановлення конденсаторних батарей доцільно проводити в два етапи:

\* спочатку визначаються місця технологічно можливого розміщення, підключення і експлуатації КУ в електричній мережі, наприклад, розподільний пристрій (РП) 10 кВ РТП-35...110/10 кВ, розподільні пристрої 10 і 0,4 кВ ЗТП, електрощитові напругою 0,38 кВ виробничих приміщень, тощо;

\* другим етапом, в разі необхідності (наприклад, багатоваріантності задачі, або обмеження коштів на енергоощадний захід), є визначення економічного варіанту розміщення КУ у характерних місцях електричної мережі за допомогою показників ефективності компенсації реактивної потужності.

**Результати досліджень.** Критерієм оптимізації потужності КУ прийнято функцію приведених затрат  $Z$ , яка містить дві складові:

- 1) затрати на КУ власника електричних мереж – вартість КУ та їх монтажу, щорічні амортизаційні та експлуатаційні відрахування;
- 2) економічний ефект від компенсації реактивної потужності – зниження втрат електроенергії в мережі власника.

Доцільність застосування критерію приведених затрат для оптимізації потужності КУ підтверджує ряд публікацій [1,5] і той факт, що обидві складові цього критерію відносяться до одного суб'єкта – обласних ЕК.

В умовах становлення ринкових економічних відносин за впровадження енергоощадних заходів необхідно враховувати додаткові затрати, пов'язані з оплатою за використання кредитних коштів в період впровадження і нормативного строку окупності капіталовкладень. Представляється обґрунтованим введення у функцію приведених затрат коефіцієнта  $e$ , котрий враховує ці додаткові затрати.

При розв'язанні задачі оптимізації потужності КУ враховується те, що напруга у вузлах навантаження приймається незмінною, вплив КУ на режим напруги в мережі не враховується – це критерій задачі оптимізації режимів роботи КУ, вартість КУ і втрати електроенергії в КУ приймаються залежними від їх потужності та класу напруги та залежать від їх потужності і класу напруги.

Для вирішення задачі оптимізації потужності КУ, яка принципово відрізняється від задачі обґрунтування енергоощадних заходів, доцільно скористатися функцією приведених затрат  $Z$  на компенсацію реактивної потужності в розглядуваній мережі, адаптованою до сучасних економічних умов.

Рішенню такої задачі буде відповідати мінімум цієї функції, котра для об'єктивної оцінки ефективності капіталовкладень в конденсаторні установки  $K$  в ринкових умовах повинна враховувати додаткову оплату за використання кредиту.

$$Z = E \cdot \kappa_{\text{мон}} \cdot K + \delta W \cdot c \cdot Q_{k_{\text{сум}}} + \delta W \cdot c, \quad (1)$$

де  $E$  – сумарний коефіцієнт  $E = e \cdot \alpha + E_a + E_{np}$ ;  $e$  – номінальна норма дисконту, прирівняна до відсоткової ставки за використання банківського кредиту за курсом НБУ;  $E_a$ ,  $E_{np}$  – нормативні коефіцієнти відрахувань на амортизацію і поточний ремонт ( $e=0,18$  в.о.,  $E_a=0,075$  в.о.,  $E_{np}=0,008$  в.о.);  $\kappa_{\text{мон}}$  – коефіцієнт, що враховує затрати на встановлення і монтаж КУ (в розрахунках

приймалось  $k_{мон}=1,2$ );  $Q_{к сум}$  – сумарна потужність підключених до мережі КУ, кВАр;  $\delta w$  – питомі втрати електроенергії в конденсаторах, кВт·г/кВАр:

$$\delta w = \Delta p \cdot t_k ; \quad (2)$$

$\Delta p$  – частка втрат потужності в КУ, що становить 0,2...0,4 % потужності КУ;  $t_k$  – тривалість роботи конденсаторних батарей протягом року, год;  $\delta W$  – зниження втрат електроенергії внаслідок компенсації реактивної потужності в електричній мережі, кВт·г;  $c$  – вартість активної електроенергії для власника мережі, прийнята 0,95 грн/кВт·г.

Для розрахунків ефективності компенсації реактивної потужності доцільно вартість конденсаторних установок  $K$  апроксимувати аналітичною залежністю від їх потужності:

$$K = a + b \cdot Q_{к сум} , \quad (3)$$

де  $a, b$  – коефіцієнти апроксимації (для конденсаторних установок напругою 0,4 кВ  $a_n=8661, b_n=124,7$  і напругою 10 кВ –  $a_c=38050, b_c=21,53$ ).

Розрахунки показують несуттєву різницю (менше  $\pm 5$  %) між вартістю конденсаторних установок, визначеною за апроксимуючою залежністю і їх фактичною вартістю.

Записавши рівняння (1) для розрахункової схеми розподільчої мережі з урахування обґрунтованих місць підключення КУ здійснюється його диференціювання за невідомими  $Q_k$ . Мінімум функції приведених затрат (1) визначається шляхом розв'язання системи  $t$  рівнянь з  $t$  числом невідомих величин потужностей КУ  $Q_k$ , розв'язавши яку, отримаємо вираз (4) для розрахунку оптимальних потужностей КУ напругою 0,38 кВ для підключення до шин 0,4 кВ ТП-10/0,4 та вираз (5) для визначення потужності КУ для встановлення в розподільчому пристрої 10 кВ РТП –(110...35)/10 кВ.

$$Q_{kn_t} = Q_t - 500 \cdot U^2 \cdot \left[ \frac{|\delta w_n - \delta w_c|}{R_{nt} \cdot \tau_n} + \frac{E \cdot |b_n - b_c|}{R_{nt} \cdot c \cdot \tau_n} \right] ; \quad (4)$$

$$Q_{kc} = Q_c - \sum_t Q_t - \frac{500 \cdot U^2}{\tau_n} \cdot \left( \sum_t \frac{1}{R_{nt}} \right) \cdot \left[ \left| \delta w_c - \delta w_n \right| + \frac{E}{c} \cdot \left| b_c - b_n \right| \right] - \frac{500 \cdot U^2}{R_c \cdot \tau_c} \cdot \left( \frac{b_c \cdot E}{c} + \delta w \right) \quad (5)$$

де  $\tau_c, \tau_n$  – час максимальних втрат активної потужності в мережах системи і споживача, год.

Обґрунтування технічних рішень та оцінку ефективності енергозберігаючих проектів ряд методик [1–5] пропонує проводити з використанням таких показників, як чистий дисконтований прибуток ЧДП, індекс прибутковості ІП, термін окупності  $T_{ок}$  та інших. Тому після вибору потужності і типу КУ ефективність їх роботи, як і порівняння з іншими енергоощадними заходами, оцінюється вище названими показниками.

Враховуючи незначні затрати часу і коштів на виконання монтажно-налагоджувальних робіт при розумній енергоощадній політиці власника розподільних мереж, конденсаторні установки в мережах всього району і тим більше в зоні однієї РТП напругою 35...110/10 кВ доцільно і можливо встановлювати протягом короткого терміну (декількох місяців). Допускаючи термін використання інвестицій  $K_t$  на компенсацію реактивної потужності менший року, для постійної норми дисконту  $e=18\%$  чистий дисконтований прибуток ЧДП визначається за формулою:

$$ЧДП_t = \sum_{t=1}^T (P_t - B_t) \cdot \frac{1}{(1+e)^t} - K_t \cdot k_{мон} . \quad (6)$$

Прибуток  $P_t$  (грн) від компенсації реактивної потужності в електричній мережі на кроці  $t$  визначається як вартість різниці втрат електроенергії до  $\Delta W_t$  і після  $\Delta W k_t$  компенсації:

$$P_t = (\Delta W_t - \Delta W k_t) \cdot c . \quad (7)$$

Витрати на обслуговування і поточний ремонт КУ, амортизаційні витрати та витрати на відшкодування втрат електроенергії в конденсаторах  $B_t$  (грн) визначаються за формулою:

$$B_t = K_t \cdot (Ea + Enp) + \delta w \cdot c \cdot Q_{к_{сум}} . \quad (8)$$

Індекс прибутковості  $III$  компенсації реактивної потужності визначається як відношення суми приведених ефектів до величини капіталовкладень в КУ:

$$III_t = \frac{1}{K \cdot K_{мон}} \cdot \sum_{t=1}^T (P_t - B_t) \cdot \frac{1}{(1+e)^t} \quad (9)$$

У тих випадках, коли термін впровадження енергоощадного заходу (термін освоєння інвестицій на встановлення КУ) більше року, необхідно вирішувати якісно нову задачу згідно теорії приведення різночасових затрат [5].

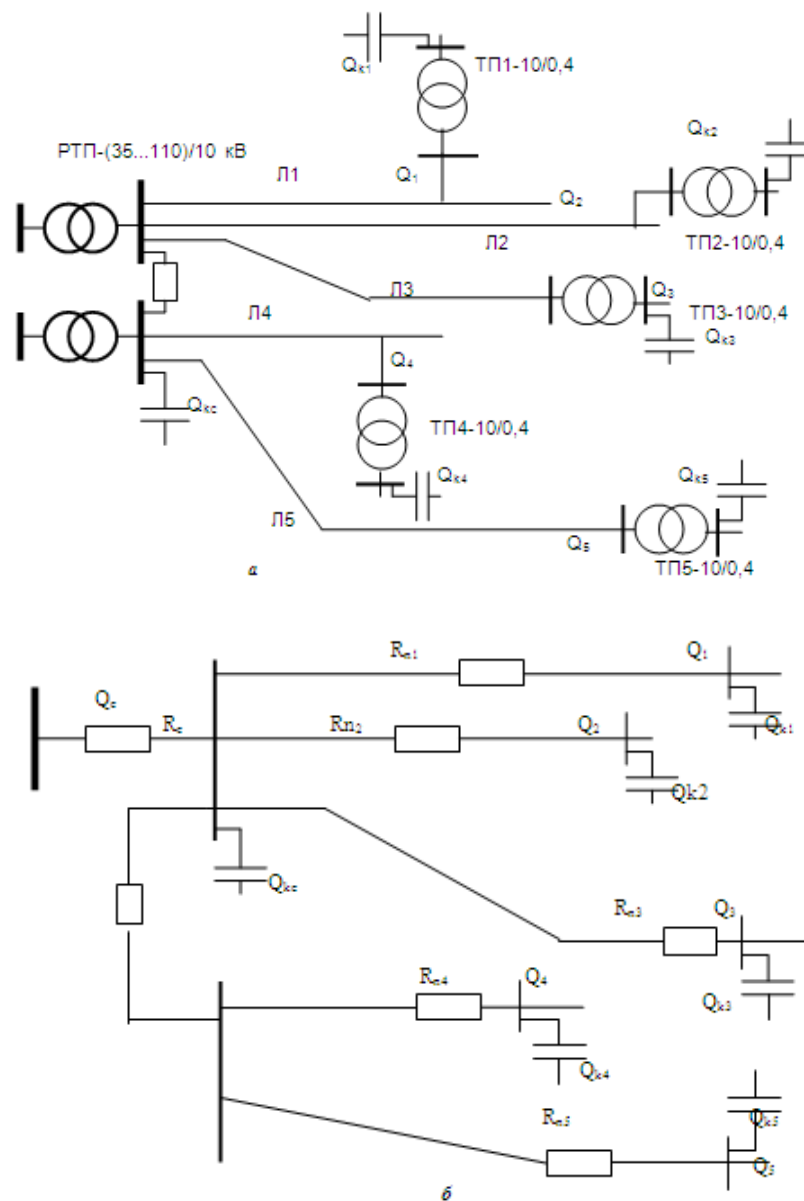


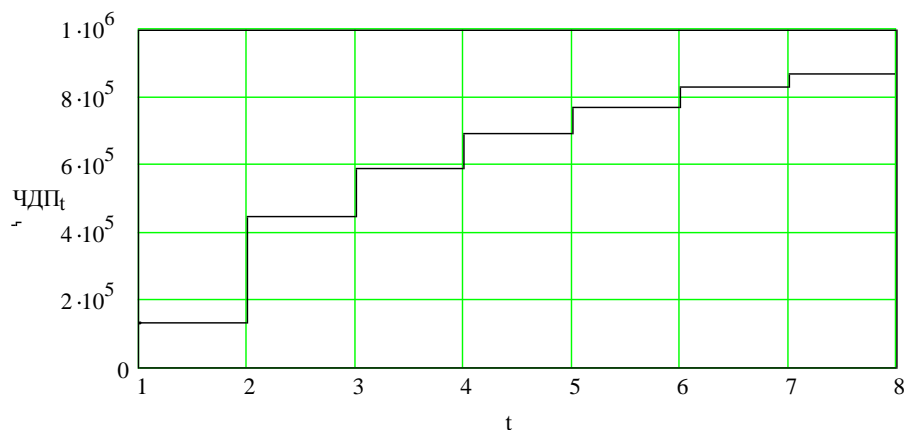
Рис.1. Пояснювальна (а) та розрахункова (б) схема розподільної мережі



Згідно наведеної методики визначені оптимальні потужності КУ на шинах 10 кВ РТП 35/10 кВ та на шинах 0,4 кВ споживчих ЗТП-10/0,4 кВ у кожній з п'яти ліній електропередавання 10 кВ (рис.1) з активними опорами ділянок мережі  $R_{n1}=7,18$  Ом,  $R_{n2}=2,53$  Ом,  $R_{n3}=5,45$  Ом,  $R_{n4}=5,9$  Ом,  $R_{n5}=7,54$  Ом і  $R_c=3,33$  Ом та реактивними навантаженнями мережі  $Q_1=1285$  кВАр,  $Q_2=1288$  кВАр,  $Q_3=781$  кВАр,  $Q_4=403$  кВАр,  $Q_5=535$  кВАр і  $Q_c=7434$  кВАр.

Оптимальні потужності КУ для встановлення в РП 10 кВ РТП 35/10 кВ та в РП 0,4 кВ споживчих ЗТП-10/0,4 кВ в кожній лінії 10 кВ мають значення:  $Q_{к1}=1168$  кВАр,  $Q_{к2}=953$  кВАр,  $Q_{к3}=626$  кВАр,  $Q_{к4}=260$  кВАр,  $Q_{к5}=423$  кВАр і  $Q_c=3892$  кВАр.

При встановленні в мережі КУ зі стандартними потужностями, відмінними від їх оптимальних величин, перевищення приведених затрат до 1 %: на шинах 10 кВ РТП - дві КУ потужністю  $Q_{фс1}=1950$  кВАр; на шинах 0,4 кВ ЗТП №1 - дві КУ потужністю по  $Q_{фк1}=600$  кВАр; на шинах 0,4 кВ ЗТП №2 - КУ потужністю  $Q_{фк2}=450$  кВАр і  $Q_{фк2}=500$  кВАр; на шинах 0,4 кВ ЗТП №3 - КУ потужністю  $Q_{фк3}=300$  кВАр і  $Q_{фк3}=330$  кВАр; на шинах 0,4 кВ ЗТП №4 - дві КУ потужністю по  $Q_{фк4}=130$  кВАр; на шинах 0,4 кВ ЗТП №5 - КУ потужністю  $Q_{фк5}=200$  кВАр і  $Q_{фк5}=230$  кВАр.



**Рис.2. Зміна чистого дисконтованого прибутку протягом розрахункового періоду експлуатації КУ**

Зниження річних втрат електроенергії в розглядуваній електричній мережі внаслідок компенсації реактивної потужності складає  $\delta W = 6,435 \cdot 10^6$  кВт·год, при значеннях  $\tau_n = 3000$  год/рік, а  $\tau_c = 3500$  год/рік.

Після оптимізації параметрів КУ доцільно розв'язувати якісно іншу задачу оптимізації їх режимів роботи.

Для визначення терміну окупності приймаємо до уваги незмінність зовнішніх умов: затрати  $K_{\text{раз}}$  здійснюються на початку поточного періоду (при  $t=1$ ); протягом всього строку впровадження проекту відсоткова ставка за кредит залишається незмінною. Тоді на кожному  $t$ -ому періоді підприємство буде виконувати заплановані заходи, внаслідок чого величина "чистий прибуток + амортизаційні відрахування" буде незмінною. Згідно (10) термін окупності визначаємо без урахування періоду освоєння капіталовкладень  $T_0 = 0,18$  року:

$$T_{\text{ок1}} := \frac{-\ln \left[ 1 - K_{\text{раз1}} \cdot k_{\text{мон}} \cdot \frac{e}{P_1 + K_{\text{кб1}} \cdot E_a} \right]}{\ln(1 + e)} \quad (10)$$

## Висновки

Завдання оптимальної компенсації реактивної потужності в електричних мережах обласних енергетичних компаній доцільно вирішувати шляхом мінімізації цільової функції приведених витрат, адаптованої до сучасних ринкових умов економіки.

Оптимальна міра компенсації реактивної потужності (відношення потужності КУ до потужності реактивного навантаження) в різних точках електричної мережі може змінюватися в межах від 0,45 до 0,98 в.о.

Економічний ефект від компенсації реактивної потужності в електричній мережі лише однієї РТП напругою 35...110/10 кВ (рис.1) підтверджують чистий дисконтований дохід ЧДП та термін окупності  $T_{\text{ок}}$  [5]: ЧДП протягом восьмилітнього нормативного терміну окупності змінюється від  $1,48 \cdot 10^5$  до  $2,08 \cdot 10^6$  грн. (рис. 2), а термін окупності КУ рівний 0,18 років.

Зміна розрахункових параметрів електричній мережі і параметрів режиму її роботи істотно не впливає на значення показників ефективності компенсації реактивної потужності.

Ефективність конденсаторних установок підвищується при їх додатковому використанні в пристроях плавлення льоду на проводах повітряних ліній електропередачі та в пристроях автоматичного включення резервної лінії для збільшення пропускної здатності взаємно резервованих ліній електропередавання.

Крім того, компенсація реактивної потужності в розподільних мережах суттєво покращує режим її роботи за напругою, що не завжди вдається забезпечити регуляторам підстанцій (типу РПН, ПБЗ).

Після оптимізації параметрів конденсаторних установок доцільно розв'язувати якісно іншу задачу оптимізації їх режимів роботи.

### **Список літератури**

1. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / Ковалко М. П., Денисюк С. П.; відпов.ред. Шидловський А. К. – К.: УЕЗ, 1998. –506 с.

2. Омельчук А. О. Компенсація реактивної потужності як фактор керування режимами передачі електроенергії у сільські регіони / А. О. Омельчук // *Енергетика и электрификация*. – 2000. – №8. – С. 40-43.

3. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами // *Офіційний вісник України*. – 2002. – №6. – С. 286-298.

4. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача): СОУ-Н МПЕ 40.1.20.510.:2006. – К.: ОГП «ГРІФРЕ», 2006. – 70 с.

5. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі: ГКД 340.000.002-97. – К.: Міненерго України, 1997. – 54 с.

**СНИЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСХОДОВ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СЕТЯХ**

*А. А. Омельчук*

**Аннотация.** Приводится методика обоснования мощности регулируемых конденсаторных установок в определенных местах распределительной электрической сети 0,38...10 кВ районной трансформаторной подстанции и оценки экономической эффективности компенсации реактивной мощности в этой сети.

**Ключевые слова:** *экономичность, компенсация реактивной мощности, затраты электроэнергии, конденсаторные установки*

**THE TECHNOLOGICAL COST OF ELECTRIC POWER CUTTING IS  
IN DISTRIBUTIVE ELECTRIC NETWORKS**

*A. Omelchuk*

**Annotation.** A method over of ground of power of the managed condenser settings is brought in the certain places of distributive electric network of 0,38...10 кВ of district transformer substation and estimation of economic efficiency of indemnification of reactive-power in this network.

**Keywords:** *economy, indemnification of reactive-power, expense of electric power, condenser settings*