

# КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311(075.8)

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕРІЗУ ПРОВІДІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПІДПРИЄМСТВ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ ЗА УМОВОЮ ЕКОНОМІЧНОСТІ

Ю.Ф.Романюк, М.І.Петрова

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003  
e-mail: feivt@nungedu.ua

*Розрахована економічна густина струму для кабельних ліній напругою 6-10 кВ і повітряних ліній напругою 110 кВ за критеріями мінімуму дисконтованих витрат та максимуму дисконтованого прибутку з врахування сучасних економічних умов. Проаналізована залежність економічної густини струму від вартості електроенергії, форми графіків електричних навантажень і норми дисконту.*

Ключові слова: електричні мережі, лінії електропередавання, економічна густина струму

*Рассчитана экономическая плотность тока для кабельных линий с напряжением 6-10 кВ и воздушных линий с напряжением 110 кВ по критериям минимума дисконтных затрат и максимума дисконтной прибыли с учетом современных экономических условий. Проанализирована зависимость экономической плотности тока от стоимости электроэнергии, формы графиков электрических нагрузок и нормы дисконта.*

Ключевые слова: электрические сети, линии электропередачи, экономическая плотность тока

*It is estimated maximum economic loading of cable lines 6-10 kV, open-wire lines 110 kV according to the criteria of the discounted charges minimum and the discounted income maximum taking into account present economic condition. It is analyzed dependence of current economic density on electricity price, electric loadings graph forms and discount charges norm.*

Keywords: electric lines, lines of electricity transmissions, current economic density

Спорудження та експлуатація ліній електропередавання нафтогазових підприємств пов'язані зі значними капіталовкладеннями, витратами провідникових матеріалів і втратами потужності та електроенергії в електричних мережах. Тому основною умовою вибору перерізу проводів ліній є умова економічної ефективності капітальних вкладень.

Ефективність капіталовкладень в будівництво електричних мереж під час порівняння варіантів раніше оцінювалося *терміном окупності* додаткових капітальних витрат за рахунок економії витрат на експлуатацію

$$T_{ок} = \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1}. \quad (1)$$

Значення  $T_{ок}$  порівнювали з нормативним терміном окупності  $T_n$ , який приймали рівним 8 років. З врахуванням  $T_n$  рівняння (1) можна записати у вигляді

$$\frac{K_1}{T_n} + C_1 \geq \frac{K_2}{T_n} + C_2. \quad (2)$$

Таким чином, за економічний критерій під час порівняння можливих варіантів мережі приймали зведені розрахункові витрати

$$Z = p_n K + C, \quad (3)$$

де  $p_n = 1/T_n$  – величина, обернена до терміну окупності, яку називали нормативним коефіцієнтом ефективності капітальних вкладень. Оптимальним вважали варіант, який відповідав мінімуму зведених розрахункових витрат  $Z = \min$ .

Переріз проводів високовольтних електричних мереж, починаючи з 50-х років минулого століття, вибирають за економічною густиною струму  $j_e$  (А/мм<sup>2</sup>), нормовані значення якої були визначені за умовою мінімальних розрахункових витрат (3) з врахуванням середньої вартості електроенергії, питомої вартості ліній і витрат на їх експлуатацію. При цьому не враховувалися інфляційні процеси, рівень ліквідності обладнання, ступінь ризику інвесторів.

Нормовані значення  $j_e$ , наведені в ПУЕ [1] залежно від конструкції лінії, матеріалу проводів і часу використання найбільшого наванта-

ження, фактично не переглядалися, і на даний час є значно завищеними у зв'язку із суттєвим подорожчанням електроенергії. Крім того, потрібно враховувати теперішні умови реформування та реорганізації енергетичної галузі України, за яких значення економічної густини струму слід визначити окремо для її різних структурних підрозділів (регіональних енергетичних систем, енергопостачальних компаній та споживачів) залежно від купівельної вартості електроенергії.

У даний час актуальним є завдання вибору перерізу проводів ліній електричних мереж з урахуванням економічної ефективності інвестицій в енергетиці [1]. Економічну ефективність інвестицій під час порівняння об'єктів електричних мереж визначають за дисконтованими витратами на їх спорудження та експлуатацію або за дисконтованим чистим прибутком від транспортування та реалізації електроенергії (чи частини загальних надходжень від реалізації продукції, що відноситься на електричні мережі).

Для динамічних задач сумарні дисконтовані витрати на спорудження та експлуатацію ліній розраховують за формулою

$$B_{oc} = \sum_{t=1}^{T_e} \frac{(B_{et} + B_{emp})}{(1+E)^t} + \sum_{t=1}^{T_0} \frac{(K_t - L_t)}{(1+E)^t}, \quad (4)$$

де:  $B_e$  – вартість витрат на технічне обслуговування та ремонт лінії;

$B_{втр}$  – вартість витрат електроенергії;

$K$  – капітальні вкладення на спорудження лінії;

$L$  – ліквідаційна вартість демонтованого обладнання (у випадку реконструкції лінії);

$T_e$  – розрахунковий час експлуатації лінії;

$T_0$  – тривалість будівництва лінії;

$E$  – норма дисконту, яка визначається з врахуванням відсоткової ставки Національного банку України для довготермінових вкладів, інфляційних процесів, ступеня ризику інвесторів, рівня ліквідності обладнання.

Для статичних задач при  $T_0=1$ ,  $T_e \rightarrow \infty$  і  $B_{et} + B_{втр} = \text{const}$

$$B_{oc} = \frac{B_e + B_{втр}}{E} + (K - L). \quad (5)$$

Річні витрати на технічне обслуговування й ремонт лінії

$$B_e = \frac{\alpha_e}{100} K, \quad (6)$$

де  $\alpha_e$  – норма витрат на технічне обслуговування та ремонт лінії, %.

Вартість спорудження 1 км лінії

$$K_0 = a + bF, \quad (7)$$

де:  $a$  – питомі капітальні вкладення в одиницю довжини лінії, що не залежать від перерізу (витрати на виконання проектних робіт, підготовку проєкт, будівництва доріг, осушення боліт тощо), грн/км;

$b$  – частина питомих капітальних вкладень, пропорційна перерізу проводів (вартість металу, опор, арматури), грн/(км·мм<sup>2</sup>);

$F$  – переріз проводів (жил кабеля) лінії, мм<sup>2</sup>.

Вартість спорудження лінії довжиною  $l$

$$K = K_0 l. \quad (8)$$

Вартість втрат електричної енергії в лінії

$$B_{втр} = 3 I_{нб}^2 \frac{\rho l}{EF} \tau U_{ex} 10^{-3}, \quad (9)$$

де:  $I_{нб}$  – струм лінії в режимі найбільших навантажень, А;

$\rho$  – питомий активний опір проводів лінії, Ом·мм<sup>2</sup>/км;

$\tau$  – час найбільших втрат потужності, год;

$U_{ex}$  – закупівельна вартість електричної енергії на вході в електричну мережу, грн/кВт·год.

Сумарні дисконтовані витрати (5) на спорудження та експлуатацію ліній електропередавання з врахуванням залежностей (6)-(9) можна виразити у вигляді

$$B_{oc} = 3 I_{нб}^2 \frac{\rho l}{EF} \tau U_{ex} 10^{-3} + (a + bF) l \left( \frac{\alpha_e}{100E} + 1 \right) = B_{\Delta W} + B_k. \quad (10)$$

Перша складова дисконтованих витрат  $B_{\Delta W}$  у виразі (10) характеризує вартість втрат електричної енергії залежно від перерізу проводів і квадратично зменшується зі збільшенням останнього. Друга складова  $B_k$  пропорційно зростає зі збільшенням перерізу і характеризує зміну капітальних вкладень та витрат на ремонт і технічне обслуговування ліній залежно від перерізу.

Економічний переріз проводів  $F_e$ , який відповідає мінімуму дисконтованих витрат  $B_{oc}$ , визначимо, продиференціювавши функцію (10) за  $F$  і прирівнявши похідну  $dB_{oc}/dF$  до нуля. При цьому одержимо

$$F_e = I_{нб} \sqrt{\frac{3 \rho \tau U_{ex} 10^{-3}}{\left( \frac{\alpha_e}{100E} + 1 \right) b}}. \quad (11)$$

Економічному перерізу проводів  $F_e$  згідно з виразом (11) відповідає економічна густина струму

$$j_e = \frac{I_{нб}}{F_e} = \sqrt{\frac{\left( 1 + \frac{\alpha_e}{100E} \right) b}{3 \rho \tau U_{ex} 10^{-3}}}. \quad (12)$$

З виразу (12) видно, що економічна густина струму залежить від матеріалу проводів ( $\rho$ ), вартості електричної енергії ( $U_{ex}$ ), капітальних вкладень ( $b$ ), витрат на експлуатацію ( $\alpha_e$ ) і форми графіка електричних навантажень ( $\tau$ ).

Економічну густину струму можна визначити також за дисконтованим чистим прибутком від транспортування та реалізації електроенергії, який для статичних задач описується виразом

$$\Pi_{oc} = \frac{W(\Pi_{вix} - \Pi_{ex})(1-p)}{E(1+k)} - (a + bF)l \times \left(1 + \frac{\alpha_e}{100E}(1-p) - \frac{\alpha_p p}{100E}\right) - \frac{3I_{нб}^2 \rho l \tau \Pi_{ex}(1-p)10^{-3}}{FE} \quad (13)$$

де:  $W$  – кількість переданої споживачу електроенергії за рік, грн/кВт·год;

$\Pi_{вix}, \Pi_{ex}$  – відповідно вартість електроенергії на виході та вході в електричну мережу, якою здійснюється транспортування енергії, грн/кВт·год;

$k$  – ставка податку на додану вартість, в.о;

$p$  – ставка податку на прибуток, в.о;

$\alpha_p$  – норма витрат на реновацію, %.

Економічний переріз проводів  $F_e$  визначимо, продиференціювавши функцію (13) за  $F$  і прирівнявши похідну  $d\Pi_{oc}/dF$  до нуля. У результаті одержимо

$$F_e = I_{нб} \sqrt{\frac{3\rho\tau\Pi_{ex}(1-p)10^{-3}}{b\left(E + \frac{\alpha_e(1-p)}{100E} - \frac{\alpha_p p}{100E}\right)}} \quad (14)$$

Економічному перерізу проводів  $F_e$ , визначеному згідно з виразом (14), відповідає економічна густина струму

$$j_e = \frac{I_{нб}}{F_e} = \sqrt{\frac{b\left(E + \frac{\alpha_e(1-p)}{100E} - \frac{\alpha_p p}{100E}\right)}{3\rho\tau\Pi_{ex}(1-p)10^{-3}}} \quad (15)$$

Згідно з (15) економічна густина струму залежить від матеріалу проводів ( $\rho$ ), вартості електричної енергії ( $\Pi_{ex}$ ), капітальних вкладень ( $b$ ), витрат на експлуатацію ( $\alpha_e$ ), норми відрахувань на амортизацію ( $\alpha_p$ ), форми графіка електричних навантажень ( $\tau$ ) і ставки податку на прибуток ( $p$ ).

У результаті проведеної роботи були розраховані значення економічної густини струму за критеріями мінімуму дисконтованих витрат і максимуму дисконтованого прибутку для різних вихідних умов.

У таблицях 1 і 2 зведені результати розрахунку економічної густини струму, визначеної за критерієм мінімуму дисконтованих витрат для кабельних ліній напругою 6 кВ з алюмінієвими й мідними проводами залежно від вартості електроенергії і часу використання найбільшого навантаження за норми дисконту  $E=0,2$ .

Очевидно, що зі збільшенням вартості електроенергії та часу використання найбільшого навантаження  $T_{нб}$  економічна густина струму зменшується, тобто переріз проводів потрібно збільшувати з метою зменшення втрат електричної енергії. Причому, фактичні усереднені значення  $j_e$  знаходяться в межах (0,5 – 0,6) А/мм<sup>2</sup> для алюмінію і (1 – 1,2) А/мм<sup>2</sup> для міді, тобто є значно меншими від нормованих в ПУЕ зна-

чень. При переході на мідь економічна густина струму збільшується приблизно удвічі, тобто переріз жил кабелів можна вибирати удвічі меншим.

**Таблиця 1 – Залежність економічної густини струму для кабельної лінії напругою 6 кВ від вартості електроенергії**

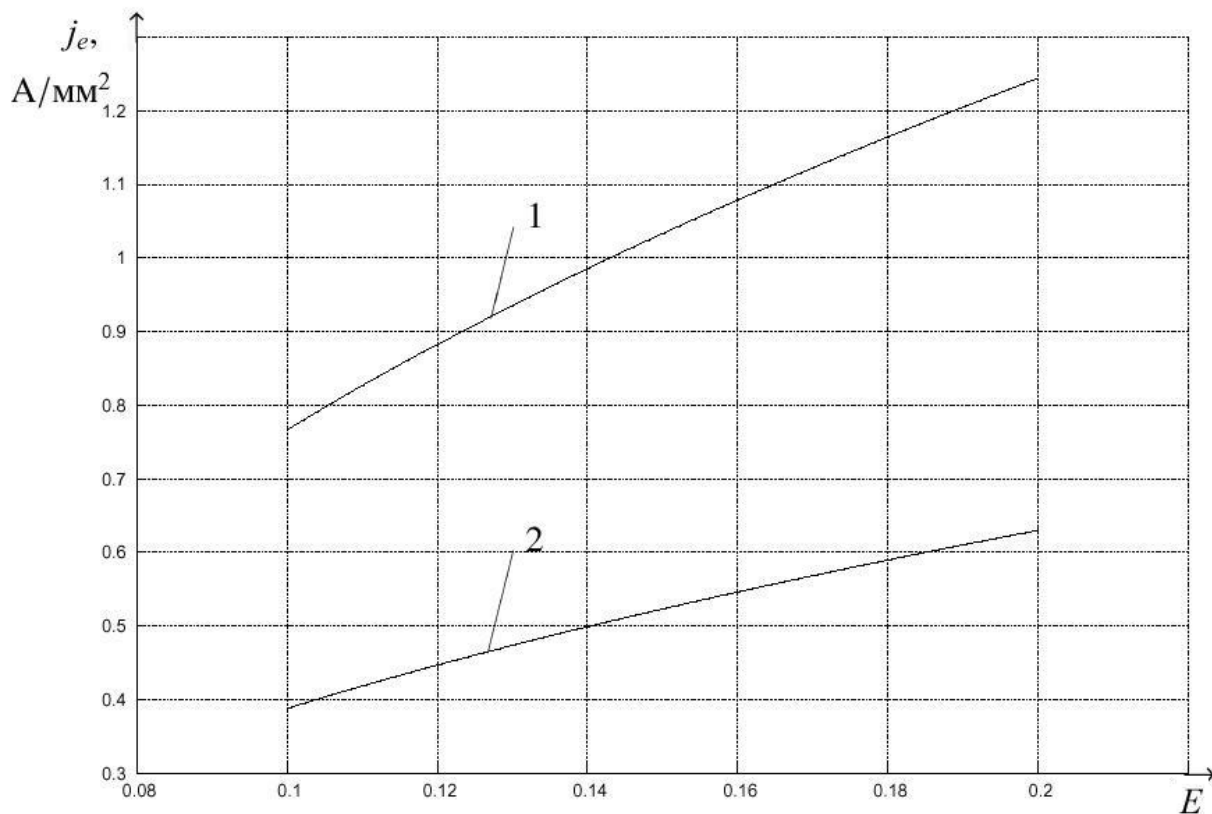
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	Економічна густина струму, А/мм <sup>2</sup>	
	Алюміній	Мідь
0,1	1,232	2,433
0,2	0,871	1,721
0,3	0,711	1,405
0,4	0,616	1,217
0,5	0,551	1,088
0,6	0,503	0,993
0,7	0,466	0,920
0,8	0,436	0,860
0,9	0,411	0,811
1	0,390	0,770

**Таблиця 2 – Залежність економічної густини струму для кабельної лінії напругою 6 кВ від часу використання найбільшого навантаження**

$T_{нб}$ , год	Економічна густина струму, А/мм <sup>2</sup>		
	Алюміній	Мідь	
1000	1,304	0,957	2,575
1650	1,011		1,995
2300	0,825		1,629
3000	0,689		1,36
3500	0,616	0,552	1,217
3650	0,597		1,179
4300	0,527		1,041
5000	0,468		0,924
5050	0,464	0,372	0,917
6200	0,393		0,775
7400	0,338		0,668
8700	0,294		0,580

У таблиці 3 наведені результати розрахунку економічної густини струму для повітряної лінії напругою 110 кВ залежно від часу використання найбільшого навантаження. Усереднене значення  $j_e$  в діапазоні зміни  $T_{нб}$  від 3500 год до 5000 год дорівнює приблизно 0,5 А/мм<sup>2</sup>, тобто удвічі менше від нормованого ПУЕ значення у цьому діапазоні.

На рисунку 1 зображено графік залежності  $j_e = f(E)$ , з аналізу якого видно, що зі збільшенням норми дисконту (інфляції коштів) потрібно збільшувати густину струму для того, щоб зменшити переріз проводів і капітальні вкладення на спорудження лінії, так як у результаті знецінювання коштів зменшується економія витрат на експлуатацію, зведена до початкової вартості.



1 – з мідними проводами; 2 – з алюмінієвими проводами

Рисунок 1 – Графік залежності економічної густини струму від норми дисконту для кабельної лінії напругою 6 кВ

Таблиця 3 – Залежність економічної густини струму для повітряної лінії напругою 110 кВ зі сталевалюмінієвими проводами від часу використання найбільшого навантаження

$T_{нб}$ , год	Економічна густина струму, А/мм <sup>2</sup>	
1000	1,091	0,801
1650	0,845	
2300	0,690	
3000	0,576	0,462
3500	0,515	
3650	0,500	
4300	0,441	
5000	0,391	0,311
5050	0,388	
6200	0,328	
7400	0,283	
8700	0,246	

Аналогічні розрахунки були проведені за критерієм максимуму дисконтованого прибутку, причому результати розрахунку економічної густини струму  $j_e$  для однакових вихідних умов практично збігаються.

**Висновки.** 1. Потрібно переглянути і уточнити наведені в ПУЕ нормовані значення економічної густини струму з врахуванням сучасних економічних умов та реструктуризації енергетичної галузі.

2. За умовою економічності слід вибирати переріз проводів ліній усіх напруг, включаючи мережі напругою до 1000 В, з врахуванням технічних обмежень.

3. Одержані результати розрахунків можуть бути використані під час проектування та реконструкції електричних мереж нафтогазових підприємств.

**Література**

1 Правила улаштування електроустановок. – Харків: Форт, 2009. – 708 с.  
 2 ГКД-340000002-97. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику. – К. : Минэнерго Украины, 1997. – 103 с.

Стаття поступила в редакційну колегію 12.01.10  
 Рекомендована до друку професором В. С. Костишиним