

# Аналіз зміни техніко-економічних показників електричної мережі з рівномірно-розподіленим навантаженням

В.О.Перепечений

кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
Харків, Україна

**Анотація** – В статті проаналізовані зміни техніко-економічних показників мережі з рівномірно-розподіленим уздовж ліній навантаженням. Це обумовлено тим, що при спорудженні або реконструкції електричних мереж середньої й низької напруги, необхідно враховувати ріст навантажень у перспективі, а також пристосувати вже існуючі мережі до зрослих рівнів електроспоживання. Основні проблеми проектування пов'язані із труднощами планування розвитку мереж при зростанні навантаження. При оптимізації параметрів електричних мереж в основному вирішують завдання вибору параметрів схем електропостачання при заданих статичних рівнях навантаження.

Розглянуто методику визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками. Проведення цих досліджень було здійснено на підставі розгляду двох можливих шляхів підвищення пропускної здатності мережі: періодичним нарощуванням пропускної здатності ліній заміною перерізів або додаванням нових ланцюгів і періодичним збільшенням числа трансформаторних підстанцій. Критерієм при порівнянні варіантів з різним початковим розміщенням трансформаторних підстанцій стали сумарні наведені до початкового моменту витрати за розрахунковий період, тобто за такий період, при збільшенні якого не одержуємо зміни результату. Розглянуто, як змінюються відносні річні витрати з ростом навантаження при різних варіантах вибору початкового радіусу дії мережі. Визначено радіус дії мережі з рівномірно розподіленим по довжині навантаженням. Розглянуто методику визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками. Проведення цих досліджень було здійснено на підставі розгляду двох можливих шляхів підвищення пропускної здатності мережі: періодичним нарощуванням пропускної здатності ліній заміною перерізів або додаванням нових ланцюгів і періодичним збільшенням числа трансформаторних підстанцій.

**Ключові слова:** трансформаторна підстанція, електричні мережі, щільність навантаження, щорічні розрахункові витрати, розміщення трансформаторних підстанцій, підвищення пропускної здатності мережі.

## I. ВСТУП

При проектуванні електричних мереж першочерговим завданням проектувальника є вибір розміщення трансформаторних підстанцій [1]. Початкове розміщення трансформаторних підстанцій визначає схему мережі й подальший її розвиток при збільшенні навантаження.

У літературі [2-4] питання про початкове розміщення трансформаторних підстанцій при зміні навантажень у часі освітлено мало, а на практиці вирішується на основі

емпіричних рекомендацій без достатнього аналізу техніко-економічних показників.

Завданням дослідження є аналіз зміни техніко-економічних показників мережі з рівномірно-розподіленим навантаженням шляхом визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками.

Мета – оптимізація електричної мережі шляхом визначення радіусу дії з урахуванням змін навантаження у часі.

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розглянемо методику визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками. При цьому припустимо, що з ростом навантажень пропускна здатність мережі збільшується тільки шляхом збільшення числа трансформаторних підстанцій, переріз же проводів ліній і їхнє число приймається постійними. Таким чином, розглядаються незалежно два можливих шляхи підвищення пропускної здатності: періодичне нарощування пропускної здатності ліній заміною перерізів або додаванням нових ланцюгів і періодичне збільшення числа трансформаторних підстанцій. Методичні результати, проведеного аналізу крім того, що вони можуть бути застосовані при проектуванні мереж для деяких окремих випадків, де розглянемо більш окремий випадок розвитку мережі, коли її пропускна здатність збільшується шляхом комбінування зміни перерізів проводів зі збільшенням числа трансформаторних підстанцій.

Критерієм при порівнянні варіантів з різним початковим розміщенням трансформаторних підстанцій є сумарні наведені до початкового моменту витрати за розрахунковий період, тобто за такий період, при збільшенні якого не одержуємо зміни результату.

Виконання методичних і принципових питань розглянемо для теоретичних випадків. Розглядається нескінченно довгу лінію, що має рівномірно-розподілене навантаження (fig. 1). Щільність навантаження, розподіленої уздовж лінії, міняється в часі:

$$\sigma_t = \sigma_0 k_t, \quad (1)$$

де  $\sigma_0$  – початкова щільність навантаження;

$\sigma_t$  – щільність навантаження в t-му року;

$k_t$  – кратність приросту навантажень за  $t$  років.

$$a_{\text{П}} = (p_{\text{ам}} + p_{\text{н}})K_{\text{П}} \quad (3)$$

Лінія має незмінний за довжиню  $l$  у часі переріз  $F$ . Для виводу деяких залежностей розглянемо коли переріз є економічним у будь-який момент часу, а також для будь-якої ділянки лінії.

Випадок з постійним перерізом проводів лінії й змінним в часі числом трансформаторних підстанцій і випадок з економічним в будь-який момент часу перерізом проводів при одночасній зміні числа трансформаторних підстанцій є крайніми, між якими перебувають практично оптимальний варіант, коли мережа працює з постійним перерізом тільки протягом деяких відрізків часу й розвиток мережі з ростом навантажень відбувається шляхом спільного збільшення числа трансформаторних підстанцій і періодичних замін перерізів проводів.

У цьому випадку шуканим параметром мережі  $X$  є радіус дії  $R$ , тобто половина відстані між трансформаторними підстанціями (fig. 1).

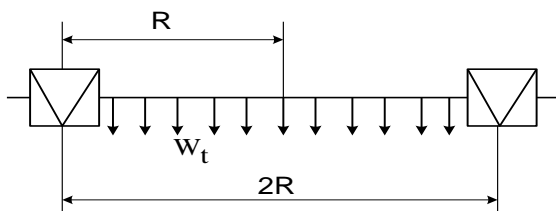


Fig. 1. Розрахункова схема для визначення оптимального радіусу дії розподільної мережі

У відомому діапазоні потужностей однотипних трансформаторних підстанцій ми можемо визначити витрати на підстанції з деяким наближенням у вигляді виразу:

$$Z_{\text{П}} = a_{\text{П}} + b_{\text{П}}W_{\text{П}}, \quad (2)$$

де  $a_{\text{П}}$  – незалежна від потужності підстанції частина витрат;

$b_{\text{П}}$  – залежні від потужності витрати в підстанцію на 1 кВА її потужності.

При допущенні лінійної залежності витрат у підстанції від потужності приходимо до висновку, що змінні витрати на трансформацію не залежать від кількості підстанцій, у той час як постійна складова витрат залежить від числа підстанцій. Тому при виборі радіусу дії нами враховується тільки постійна складова витрат у підстанції  $a_{\text{П}}$ , яка надалі приймається постійною.

Величина постійної  $a_{\text{П}}$  й змінної  $b_{\text{П}}$  частини витрат у підстанції може бути визначена графо-аналітично. Для цього необхідно побудувати сімейство залежностей річних витрат від завантаження трансформатора для діапазону шкали, що цікавить нас, номінальних потужностей трансформаторів і замінити огинаючу цього сімейства прямою лінією. Точка перетинання отриманої прямої з віссю ординат визначить величину незалежної від потужності частини витрат  $a_{\text{П}}$ .

У першому наближенні величина  $a_{\text{П}}$  може бути визначена також за виразом:

де  $K_{\text{П}}$  – вартість підстанції даного типу.

Уточнення величини витрат у підстанції мало впливає на результат. Приймається також, що довжина живильної мережі не змінюється зі збільшенням числа трансформаторних підстанцій, а установка додаткових трансформаторних підстанцій може бути здійснена в будь-якому місці лінії без додаткових витрат для лінії.

У нашому аналізі будемо розглядати величину щорічних розрахункових витрат на 1 км лінії:

$$Z = \frac{a_{\text{П}}}{2R} + Z_{\text{л}}, \quad (4)$$

де  $Z_{\text{л}}$  – частина витрат на 1 км лінії, рівна відповідно до виразу:

$$Z_{\text{л}} = a_{\text{л}} + b_{1\text{л}}F + \frac{b_{2\text{л}}W^2}{F}. \quad (5)$$

де  $W$  – середньоквадратичне навантаження лінії

$$W = \frac{R_w}{k_p}, \quad (6)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт розподілу навантажень уздовж лінії.

Для рівномірно-розподіленого навантаження  $k_p = \sqrt{3}$ .

Змінну частину щорічних витрат у мережу, обумовлену виразом (4), можна також представити у вигляді узагальненого виразу:

$$Z = A_x + B_x W^2 \quad \text{та} \quad Z = A_x x^\alpha + B_x x^{-\beta}$$

У цьому випадку коефіцієнти, що входять у ці узагальнені рівняння визначаються в такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned} A_x &= \frac{a_{\text{П}}}{2R}; & B_x &= \frac{b_{2\text{л}}}{F} \cdot \frac{R^2}{k_p^2}; \\ A_w &= \frac{w^2}{k_p^2} - \frac{b_{2\text{л}}}{F}; & B_x &= \frac{a_{\text{П}}}{2}; \\ \alpha &= 2; & \beta &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Розглядаючи вираз (4), бачимо, що він складається із двох частин – витрат у трансформаторні підстанції й витрат в електричні лінії. При скороченні радіусу дії знижуються витрати, пов'язані із втратами енергії в проводах ліній. Однак, при цьому зростає частина витрат, пов'язана із вкладеннями в трансформаторні підстанції. Очевидно, що при постійній щільності навантаження величина річних витрат, залежно від величини радіусу дії мережі, має оптимум. Величина радіусу дії, що відповідає оптимуму річних витрат, називається оптимальним радіусом дії  $R_{\text{опт}}$ .

Вважаючи, що оптимальне значення якого-небудь параметра мережі  $X_{\text{опт}}$  визначається в найбільш загальній формі за виразом:

$$X_{\text{опт}} = \left( \frac{B_w \beta}{A_w \alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha + \beta}} \quad (8)$$

З урахуванням залежності (7) величина оптимального радіусу дії може бути визначена за виразом:

$$R_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{a_{\text{ТП}}}{2b_{\text{л}}} \cdot \frac{k_p^2 \cdot W_{(F) \text{опт}}}{\sigma^2}} \quad (9)$$

де  $W_{(F) \text{опт}}$  – оптимальне навантаження, що відповідає перерізу проводів лінії  $F$ .

Якщо задано радіус дії  $R$ , подібним же чином може бути визначена щільність навантаження, при якій цей радіус дії буде оптимальним. Величину цієї щільності навантаження назвемо оптимальною щільністю:

$$\sigma_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{1}{R^3} \cdot \frac{a_{\text{ТП}}}{2b_{\text{л}}} \cdot k_p^2 \cdot W_{(F) \text{опт}}} \quad (10)$$

У такий спосіб також, як це мало місце для перерізу проводів  $F$  і відповідних навантажень  $W_{(F) \text{опт}}$ , величини  $R_{\text{опт}}$  і  $\sigma_{\text{опт}}$  і  $R$  є взаємопов'язані.

Радіус дії буде оптимальним тільки при одному значенні щільності навантаження. Витрати при цьому навантаженні досягають мінімального значення  $3_{\text{мін}}$ .

Мінімальне значення витрат визначиться підстановкою величини  $R_{\text{опт}}$  у виразі (4):

$$3_{\text{мін}} = \sqrt[3]{\frac{b_{\text{л}} \cdot a_{\text{ТП}}^2}{4 \cdot k_p^2 \cdot W_{(F) \text{опт}}} \cdot 1,5^3 \sigma^2} + a_{\text{л}} + 0,5 \cdot b_{\text{л}} \cdot W_{(F) \text{опт}} \quad (11)$$

Другий і третій член виразу (11) при заданому перерізі, не залежать ні від радіуса дії, ні від щільності навантаження. Зміна витрат у мережу при рості навантажень у часі й збереженні радіусу дії постійним, будемо характеризувати залежністю відносних річних витрат:

$$3_* = \frac{3}{3_{\text{мін}}} \quad (12)$$

За базисну величину приймається значення мінімальних річних витрат для залежної від радіусу дії й навантаження частини витрат – перший член виразу (11), що відповідають оптимальному значенню радіусу дії мережі при кожному значенні навантаження.

З урахуванням виразу (7) може бути отримана наступна залежність відносних річних витрат від навантаження:

$$3_* = \frac{3}{3_{\text{мін}}} = \frac{1}{3} \left[ 2 \left( \frac{\sigma_{\text{опт}}}{\sigma} \right)^{2/3} + \left( \frac{\sigma}{\sigma_{\text{опт}}} \right)^{4/3} \right] \quad (13)$$

Для залежності відносних витрат у лінії, у нашому випадку ця залежність є універсальною й не залежить від варіюваних показників, закону росту навантажень і їх абсолютних величин, а залежить тільки від кратності щільності навантажень стосовно оптимальної щільності. Графічно ця залежність показана на fig. 2, крива 2.

Аналогічним шляхом можуть бути отримані залежності для річних витрат, оптимальних радіусів дії й оптимальних навантажень для інших теоретичних випадків, коли переріз проводів лінії в будь-який момент часу, а також для кожної ділянки лінії є економічним  $F = f(t, l)$ , і коли переріз проводів лінії в будь-який момент часу є економічним, але однаковим для всіх ділянок лінії  $F = f(t)$ .

Залежності відносних витрат від навантаження наведені на fig. 2.

Оптимальний радіус дії при сталості перерізу проводів лінії зворотно пропорційний величині  $\sqrt[3]{\sigma^2}$ , у той час як для випадків, коли переріз змінюється у часі й у кожний момент є економічним, оптимальний радіус дії зворотно пропорційний величині  $\sqrt{\sigma}$ .

Постійна частина мінімальних витрат для випадку  $F = \text{const}$  у порівнянні з випадками  $F = f(t)$  й  $F = f(t, l)$  збільшується на величину  $0,5 \cdot b_{\text{л}} \cdot W_{(F) \text{опт}}$ .

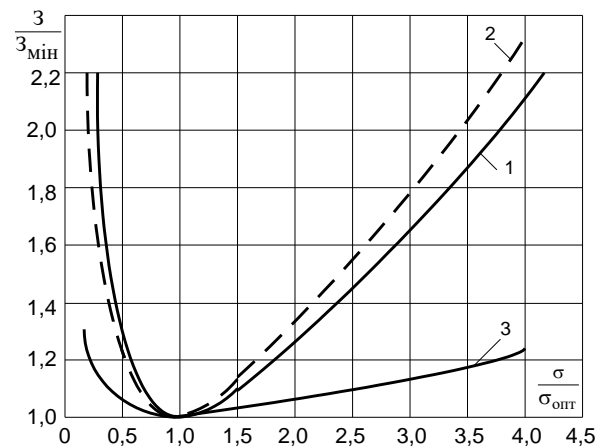


Fig. 2. Універсальні залежності відносних щорічних витрат від кратності навантаження:

1 – для лінії з постійним перерізом проводів; 2 – для мережі, зображеної на fig. 1, при постійному перерізі проводів; 3 – для тієї ж мережі, коли переріз проводів економічний при всіх навантаженнях

Величина  $W_{(F) \text{опт}}$  пропорційна перерізу при однаковому матеріалі проводів. У випадку  $F = \text{const}$  змінна складова питомих витрат зворотно пропорційна величині  $\sqrt[3]{W_{(F) \text{опт}}}$ . Сталість перерізу за довжиною приводить до необхідності враховувати розподіл навантажень по лінії за допомогою коефіцієнта  $k_p$ .

### III. ВИСНОВКИ

Практично, незважаючи на зміну навантажень у часі, необхідно протягом певного періоду мати постійне значення радіусу дії мережі. При цьому витрати при постійному перерізі проводів прямо пропорційні квадрату щільності навантаження, а при економічному значенні перерізу в кожний момент ці витрати прямо пропорційні щільності навантаження в першому ступені. Радіус дії є оптимальним тільки при одному значенні щільності навантаження, при інших же значеннях щільності навантаження за період маємо перевищення витрат над відповідними мінімальними значеннями. Залежність відносини змінної частини річних витрат до мінімальних витрат у всіх розглянутих випадках має універсальний характер і не залежить від вартісних показників.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Зорин В.В., Тисленко В.В. Системы электроснабжения общего назначения. – Чернигов: ЧГТУ, 2005. – 341 с.341
- [2] Мисриханов М.Ш. О технико-экономическом сравнении вариантов электроустановок при проектировании / М.Ш. Мисриханов, К.В. Мозгалев, Б.Н. Неклепаев, А.В. Шунтов // Электрические станции.– 2004. – №2. – с.2-8.
- [3] Зорин В.В. Многоцелевая оптимизация динамики развития распределительных электрических сетей / В.В. Зорин, Л.Д. Третьякова, Х. Басам // Энергетика и электрификация. 1991. № 3. С. 5-10.
- [4] Методы расстановки питающих центров для электроснабжения осваиваемых территорий городов. Mori Sadao, Shibata Kunio // Denki qokkai zasshi = J.Inst.Elec.Eng.Jap. – 2002/ - 122 № 6. – С.567-570. – яп.
- [5] Козлов В.А. Электроснабжение городов 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1998. – 264 с.
- [6] Говоров Ф.П. Оптимизация схем и параметров распределительных электрических сетей / Ф.П. Говоров, В.Ф. Говоров, В.А. Перепеченый // Збірник наукових праць Донецького технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика". Випуск 50. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – 190 с.

## Analysis of the change of technological and economic indicators of electric network equilibriumly distributed loading

V. Perepechenyi

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
Kharkiv, Ukraine

The article analyzes the changes in the technical and economic indicators of the network with uniformly distributed along the load lines. This is due to the fact that when constructing or reconstructing medium and low voltage electrical networks, it is necessary to take into account the growth of loads in the future, as well as to adapt the existing networks to the increased levels of electricity consumption. The main design problems are related to the difficulty of planning the development of networks with increasing load. When optimizing the parameters of the power grids, the problem of choosing the parameters of the power supply circuits at the given static load levels is basically solved.

The method of determining the initial placement of transformer substations by economic indicators is considered. These studies were carried out on the basis of considering two possible ways to increase the capacity of the network: by periodically increasing the capacity of the lines by replacing the sections or adding new circuits and periodically increasing the number of transformer substations. The criterion for comparing variants with different initial placement of transformer substations is the cumulative reduced to the initial moment of the cost for the billing period, that is, for such a period, when we do not increase the result change. Consideration is given to how the relative annual costs with increasing load vary with different choices of the initial radius of the network. The radius of the network with uniformly distributed load length is determined. The method of determining the initial placement of transformer substations by economic indicators is considered. These studies were carried out on the basis of considering two possible ways to increase the capacity of the network: by periodically increasing the capacity of the lines by replacing the sections or adding new circuits and periodically increasing the number of transformer substations.

*Keywords: transformer substation, electrical networks, load density, annual estimated costs, placement of transformer substations, increase of network capacity.*