

## УЧЕТ ДИСКРЕТНОСТИ ШКАЛЫ СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Бондаренко В. Е., Барбашов И. В., Черкашина В. В.

*Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"*

*Проанализирована и обоснована на примере воздушных линий 10 кВ необходимость учета дискретности шкалы сечений проводов при оптимизации параметров технико-экономической модели для проектирования экономически целесообразных значений параметров линий с учетом перспективы их развития.*

**Постановка проблемы.** В настоящее время электрическая сеть (ЭС) должна быть оптимально спроектирована, что подразумевает экономически целесообразно с учетом технических параметров её объектов, в том числе и воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Следовательно, необходимо учитывать как будут изменяться параметры ВЛ с течением времени, динамика процесса изменения которых зависит от темпов и роста нагрузки.

Проектирование ВЛ требует выбора экономически целесообразных значений параметров, полученных в результате реализации технико-экономических моделей, отражающих специфику и перспективу развития. Кроме того, актуальны вопросы экономической устойчивости и чувствительности решения подобных задач, позволяющие делать определенные отступления от полученного оптимального варианта, а так же учитывать изменения экономически целесообразных параметров во времени, что заранее предопределяет стратегию и тактику развития ВЛ.

Одним из критериев выбора оптимального варианта проектирования ВЛ является минимум дисконтных затрат. Учитывая данный критерий, а так же наиболее целесообразные параметры оптимизации, и проектируется ВЛ.

**Цель статьи.** Исследовать влияние дискретности шкалы сечений проводов при оптимизации параметров технико-экономической модели воздушных линий для проектирования экономически целесообразных значений параметров линий с учетом перспективы их развития.

**Основные материалы исследования.** Для проведения комплексного анализа при проектировании ВЛ с учетом перспективы их развития строятся технико-экономические модели, реализация которых дает полную картину поведения параметров оптимизации.

В рамках комплексного анализа ВЛ возможно использовать методы динамического и линейного программирования, позволяющие отыскивать оптимальный план развития ВЛ. Трудность решения задачи обусловлена тем, что динамическое программирование малоэффективно в реализации модели, содержащей более трех параметров оптимизации. Линейное программирование реализует линейные модели, что заведомо искажает действительную функциональную связь внутри объекта оптимизации, так как линейные модели линеаризуют все существующие нелинейные зависимости [1, 2].

С появлением методов критериального программирования стал возможным анализ нелинейных технико-экономических моделей ВЛ [3, 4].

Прежде чем реализовать технико-экономические модели ВЛ необходимо проанализировать параметры, характеризующие и определяющие тот или иной вариант. В качестве такого параметра на сегодня преимущественно используется экономическая плотность тока ВЛ [5].

Анализ параметров ВЛ был выполнен на примере ВЛ 10 кВ нескольких районов ЭС Восточной части Украины, считая появление плотности тока на участке линии случайной величиной. Полученные результаты оформлены в виде статистического ряда и представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Рейтинг статистического анализа ВЛ 10 кВ

$l_i$	$0 \div 0,1$	$0,1 \div 0,2$	$0,2 \div 0,3$
$m_i$	5	24	18,5
$P_i^*$	0,038	0,180	0,140
$l_i$	$0,6 \div 0,7$	$0,7 \div 0,8$	$0,8 \div 0,9$
$m_i$	8	11	6
$P_i^*$	0,060	0,083	0,045
$l_i$	$0,3 \div 0,4$	$0,4 \div 0,5$	$0,5 \div 0,6$
$m_i$	23,5	20,5	10,5
$P_i^*$	0,170	0,155	0,080
$l_i$	$0,9 \div 1,0$	$1,0 \div 1,1$	$1,1 \div 1,2$
$m_i$	3	2	1
$P_i^*$	0,023	0,015	0,007

где  $l_i$  – интервал значений плотности тока;  
 $m_i$  – число наблюдений в данном интервале;  
 $P_i^*$  – соответствующая частота появлений.

Логарифмически нормальное распределение определяется двумя параметрами:  $j_0$  и  $\delta_z$ . Величина  $\lg j_0$  представляет собой математическое ожидание случайной величины  $Z = \lg I$ , а  $\delta_z$  ее среднеквадратическое отклонение. Зная параметры распределения,

была определена вероятность попадания случайной величины  $P_i$  на участок от  $\alpha$  до  $\beta$  по выражению:

$$P_i(\alpha < j > \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - \tilde{m}}{\delta}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \tilde{m}}{\delta}\right), \quad (1)$$

где  $\tilde{m} = \lg j_0 = -0,483$  – математическое ожидание случайной величины  $P_i$ ;

$\delta = \delta_z = -0,2880$  – среднеквадратическое отклонение случайной величины  $P_i$ ;

$\beta = \lg j_{i+1}$ ;  $\alpha = \lg j_i$  – границы участка попадания случайной величины  $P_i$ ;

$j_i$  – граничное значение плотности тока по интервалам [5].

Результаты расчета (1) в виде статистического ряда представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты статистического анализа ВЛ 10 кВ

$l_i$	0 ÷ 0,1	0,1 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,3
$P_i$	0,067	0,156	0,205
$l_i$	0,6 ÷ 0,7	0,7 ÷ 0,8	0,8 ÷ 0,9
$P_i$	0,076	0,045	0,031
$l_i$	0,3 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,5	0,5 ÷ 0,6
$P_i$	0,165	0,134	0,080
$l_i$	0,9 ÷ 1,0	1,0 ÷ 1,1	1,1 ÷ 1,2
$P_i$	0,022	0,018	0,013

Для проверки гипотезы был использован критерий Пирсона ( $\chi$ )

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(P_i - P_i^*)^2}{P_i^*}, \quad (2)$$

где  $\chi^2$  – критерий Пирсона;

$P_i$  – вероятность попадания случайной величины на интервале;

$P_i^*$  – соответствующая частота появления случайной величины;

$N$  – совокупность случайных чисел;

$k$  – число интервалов [7].

Используя (2) было выявлено, что данная гипотеза не противоречит реальным данным представленным в табл. 1., поскольку оценка математического ожидания плотности тока равна  $\lg j_0 = -4368$ , а значение  $\tilde{j} = 0,365$  А/мм<sup>2</sup>.

Исходя из нормального закона распределения плотности тока, был определен интервал значения плотности тока. Оказалось, что этот интервал достаточно велик (0,1 ÷ 1,2) А/мм<sup>2</sup>, поэтому считать полученное значение за интервал экономической устой-

чивости невозможно, так как практически любое значение плотности тока из этого интервала будет экономически целесообразным, что заведомо неверно. Поскольку значение интервала получилось в результате неодновременности начала эксплуатации сетей, то, чтобы за оптимальный параметр принимать экономическую плотность тока, значение её должно быть выдержано по всем участкам сети, что практически невозможно из-за дискретности шкалы сечений проводов, а также из-за тока нагрузки, меняющегося от участка к участку.

Проведенные исследования подтвердили необходимость учитывать дискретность шкалы сечений проводов в оптимизации технико-экономических моделей ВЛ для проектирования экономически целесообразных значений параметров ВЛ с учетом перспективы их развития.

В качестве основного параметра оптимизации было выбрано сечение проводов. Кроме того, предполагается равномерное распределение нагрузки по площади.

Для реализации этой задачи была усовершенствована технико-экономическая модель дисконтных затрат ( $Z_i$ ) ВЛ, основное отличие которой заключается в изменении аналитической связи инвестиций в ВЛ с сечением провода ( $F$ ):

$$Z_i = (E + p)(a + vF) + (3I^2 \rho \tau \beta) \times F^{-1}, \quad (3)$$

где  $E$  – банковская ставка, %;

$p$  – коэффициент отчислений на амортизацию, ремонт и обслуживание линии;

$a$  – постоянная составляющая стоимости 1 км ВЛ, зависящая от типа опор, конструктивного исполнения ВЛ, класса напряжения, денежные единицы (д.е)/км;

$v$  – коэффициент удорожания, учитывающий изменение стоимости 1 км ВЛ в зависимости от сечения провода, нормируемого в соответствующем классе напряжения, д.е/(км·мм<sup>2</sup>);

$F$  – сечение провода, мм<sup>2</sup>;

$I$  – максимальный ток линии, А;

$\rho$  – удельное сопротивление проводникового материала, Ом·мм<sup>2</sup>/км;

$\tau$  – время максимальных потерь, ч/год;

$\beta$  – удельная стоимость потерь электроэнергии, д.е/(кВт·ч) [6].

В виду того, что технико-экономические модели ВЛ с точки зрения теории подобия являются подобными, от отношение предыдущих дисконтных затрат к последующим в рамках одного параметрического ряда будут – тождественны, что является необходимым условием построения параметрического ряда сечений проводов ВЛ:

$$\frac{Z_{i+1}}{Z_i} = \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} \equiv \text{idem}, \quad (4)$$

где  $r_i$  – активное сопротивление  $i$ -го провода;

$K_i$  – инвестиционные вложения в  $i$ -ю линию.

Согласно теории подобия в первом приближении для поиска оптимального параметрического ряда автором был использован критериальный метод [3, 4], который позволил уйти от неопределенности исходной информации. Для этого технико-экономическая модель ВЛ (1) была записана в критериальной форме:

$$Z = \pi_1 F_*^{0,25} + \pi_2 F_*^{-1} \quad (5)$$

и проанализирована для обоснования изменения аналитической связи инвестиций с сечением провода  $F_*$  в относительных единицах:

$$F_* = \left( \frac{\pi_1 F_2}{\pi_2 F_1} \right)^{0,8}, \quad (6)$$

где  $\pi_1=4/5$ ,  $\pi_2=1/5$ - критерии подобия, определенные из систематических процедур критериального метода [3, 4, 6].

Анализ критериальным методом показал, что в зависимости от погрешности исходной информации можно получить в первом приближении коэффициент нарастания шкалы параметрического ряда сечений проводов ВЛ задавая тем либо иным значением. Результаты исследований представлены в табл. 3

Таблица 3 – Результаты обоснования коэффициента нарастания шкалы параметрического ряда сечений проводов ВЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7
К	1.34	1.58	0.17
$\delta, \%$	8	9	10
К	1.83	2.09	2.23

Как показали исследования, при обосновании коэффициента нарастания шкалы параметрического ряда сечений проводов ВЛ значительную роль играет погрешность эксплуатационных характеристик и наиболее приемлемый коэффициент  $K \approx 2$ .

Для оценки статических характеристик распределения относительного значения сечений проводов для ВЛ 10 кВ было принято допущение, что значение сечения на каком то интервале ваирования – величина случайная. Поэтому для оценки статистических характеристик была сделана "выборка" из "генеральных совокупностей". Для этой цели использовалась методика планирования эксперимента, которая позволяет сделать ограниченное число опытов по определенному плану [7].

В данном эксперименте реализованы два сочетания уровней каждого фактора (верхний и нижний), кодированные значения факторов равны + и -. Был проведен полный факторный эксперимент типа  $2^k$ . Общее число опытов  $N=2^k$ , где  $k$  – число факторов, влияющих на сечение проводов.

На основании матриц статистических совокупностей значений сечений проводов для ВЛ 10 кВ были построены статистические ряды для распределения случайной величины сечения проводов при условии, что параметры варьируются в следующих пределах:  $10 \text{ кВ} - P = (0,46 \div 1,54)$ ;  $\mu = (0,72 \div 1,28)$ ;  $\kappa = (0,5 \div 1,5)$ ;  $\cos\varphi = (0,99 \div 1,01)$ .

Для определения интервала попадания относительного сечения проводов ВЛ 10 кВ было принято предположение, что закон изменения плотности распределения сечения достаточно близок к нормальному закону на концах доверительных интервалов. Интервал был оценен с достаточно большой вероятностью  $P = 0,95$  при погрешности  $\delta$  от  $\pm 5$  до  $\pm 10$ . Результаты анализа представлены в табл. 4

Таблица 4 – Определения интервала попадания относительного сечения проводов ВЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7
$l_i$	$0,73 \div 1,27$	$0,67 \div 1,33$	$0,60 \div 1,4$
$\delta, \%$	8	9	10
$l_i$	$0,55 \div 1,45$	$0,48 \div 1,52$	$0,41 \div 1,58$

Гипотеза была проверена с использованием критерия Пирсона (2). Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты проверки гипотезы по критерию Пирсона для ВЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7
$\chi^2$	9.6	9.7	10.1
$P(\chi^2)$	0.537	0.564	0.463
$\delta, \%$	8	9	10
$\chi^2$	10.2	10.3	9.5
$P(\chi^2)$	0.472	0.481	0.525

Оценка математического ожидания данного распределения равна 1, так как математическое ожидание параметров входящих в (5) равно 1.

Оценка дисперсии  $\bar{D}_F$  расчетов равна:

$$\bar{D}_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( F_{1*} - \bar{m}_F \right)^2 \quad (7)$$

где  $F_{1*}$  – сечение провода в относительных единицах;

$\bar{m}_F$  – математическое ожидание.

Результаты определения оценки дисперсии (7) в зависимости от погрешности эксплуатационных характеристик представлены в табл. 6

Таблица 6 – Результаты определения оценки дисперсии в зависимости от погрешности эксплуатационных характеристик для ВЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7
$D$	0.02159	0.031456	0.04341
$\delta, \%$	8	9	10
$D$	0.05761	0.07425	0.09354

При проверке гипотезы с использованием критерия Пирсона (табл. 5) и оценки дисперсии (табл. 6) выявлено, что разрабатываемая гипотеза не противоречит реальным данным.

Известно так же, что сечение провода является основным элементом ВЛ, выбирается при проектировании и влияет на пропускную способность ЭС, что отражается на регламенте реконструкции объекта из за изменения темпов и роста нагрузки.

В дальнейших исследованиях, используя теорию подобия и полученный коэффициент при заданном характере нагрузки, было выявлено, что срок до необходимой реконструкции увеличивается в 2 раза, является относительно подобной величиной [8] и имеет вид:

$$t = 0,625 \frac{\ln F}{\ln(1+q)} \quad (8)$$

В данном выражении время  $t$  определяет интервал от начала эксплуатации до первой реконструкции, которая обусловлена изменением пропускной способности ВЛ, зависящей от сечения провода ( $F$ ) и заданного темпа изменения нагрузки ( $q$ ).

Таким образом, влияние дискретности шкалы сечений проводов отражается и на регламенте реконструкции, которая связана с изменением пропускной способности ЭС.

**Выводы.** Для обоснования влияния дискретности шкалы сечений проводов при оптимизации параметров технико-экономической модели для проектирования экономически целесообразных значений параметров линий с учетом перспективы их развития автором на примере воздушных линий 10 кВ:

- показана нецелесообразность использования экономической плотности тока, как основного параметра оптимизации технико-экономической модели воздушных линий;

- предложено в качестве основного параметра оптимизации технико-экономической модели воздушных линий сечение проводов и получен критериальным методом коэффициент нарастания шкалы параметрического ряда сечений проводов;

- построены статистические ряды для распределения случайной величины сечения проводов;

- проведена проверка гипотезы с использованием критерия Пирсона и определена оценка дисперсии в

зависимости от погрешности эксплуатационных характеристик;

- проанализировано изменение регламента реконструкции сети в следствии оптимизации параметрического ряда сечений проводов воздушных линий.

#### Список использованных источников.

1. Беллман Р. Динамическое программирование. / Р. Беллман – М.: Изд-во иностр.лит., 1960 – 400 с
2. Химельбау Д. Нелинейное программирование. / Д. Химельбау – М: "Мир", 2007 – 267 с
3. Лежнюк П. Д. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод. / П. Д. Лежнюк, С. В. Бевз.– Вінниця: ВДТУ, 1999.– 177с.
4. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом. / П. Д. Лежнюк. Монографія. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. - 131 с.
5. Блок В. М. Электрические сети и системы. / В. М. Блок - М.: Высш.шк.,1986. – 430 с.
6. Бондаренко В. О. Системний підхід передпроектної оцінки повітряних ліній в умовах ринкових відносин. / В. О. Бондаренко, Н. М. Черемісін, В. В. Черкашина. Монографія– Харків:Факт, 2013. – 259с.
7. Kevin Lee, M. Hashem Pesaran and Ron Smith. Growth and convergence in a multy-country empirical stochastic Solow model. Journal of applied econometrics, 1997, vol. 12, p.357-392.
8. Черкашина В. В. Фактор времени в стратегии усовершенствования электрических сетей // Электротехніка і Електромеханіка. – 2014. – № 3. – С. 65–68.

#### Анотація

#### ОБЛІК ДИСКРЕТНОСТІ ШКАЛИ ПЕРЕРІЗІВ ПРОВІДІВ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ МОДЕЛІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Бондаренко В. О., Барбашов І. В., Черкашина В. В.

*Проаналізовано та обґрунтовано на прикладі повітряних ліній 10 кВ необхідність врахування дискретності шкали перерізів проводів при оптимізації параметрів техніко-економічної моделі для проектування економічно доцільних значень параметрів ліній з урахуванням перспективи їх розвитку.*

#### Abstract

#### ACCOUNTING DISCRETE SCALE SECTION OF THE WIRE IN THE OPTIMIZATION OF PARAMETRS TECHNICAL- ECONOMIC MODELS OVERHEAD POWER LINES

B. Bondernko, I. Barshov, V. Cherkashina

*Analyzed and the necessity of incorporating the discrete scale wires with cross sections to optimize the technical and economic models of overhead lines 10 kV for the design of cost-effective value from the perspective of line parameters of their development.*