

**В. В. ЧЕРКАШИНА, В. М. БАКЛИЦЬКИЙ**

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА БАЗІ КРИТЕРІАЛЬНОГО МЕТОДУ**

Запропоновано вдосконалені техніко-економічних моделей повітряних ліній 35–750 кВ відповідно Закону України «Про ринок електричної енергії». Актуальність і складність проблеми, що розглядається, обумовлена тим, що перехід до ринкових відносин передбачає наявність приватної власності, де територія під електромережевий об'єкт, в тому числі й для траси повітряних ліній, є товаром і повинна враховуватися у формуванні вартості даного об'єкту. У зв'язку з цим виникла необхідність перегляду дисконтованих витрат в проектуванні ліній для приведення їх у відповідність з ринковими відносинами. Розроблення нової техніко-економічної моделі повітряних ліній 35–750 кВ виконувалося з урахуванням розмірів і вартості земельних ділянок під трасу ліній, що дозволяє провести передпроектний аналіз оптимального варіанту проектування об'єкту електричних мереж. Розраховано питому частину вартості земельної ділянки у вартості 1 км повітряних ліній різних класів напруги. Визначено складові вдосконаленої техніко-економічної моделі повітряних ліній 35–750 кВ, а саме питому частину складових витрат в загальній вартості 1 км повітряних ліній різних класів напруги. Представлено графічне відображення узагальнених моделей інвестиційних вкладень у повітряні лінії 35–750 кВ. В представлених дослідженнях враховано те, що під час побудови техніко-економічних моделей практично неможливо передбачити усі внутрішні часто стохастичні її зв'язки, елементи яких не можуть бути виражені однозначно, що призводить до неповноти вихідної інформації. Спираючись на цей факт, в статті для аналізу розроблених техніко-економічних моделей ліній застосовано критеріальний метод, який дозволяє прийняти рішення в умовних одиницях як при повній так і при неповній та невизначеній вихідній інформації. Реалізуючи кожне рівняння розробленої техніко-економічної моделі повітряних ліній 35–750 кВ критеріальним методом отримано співвідношення складових в оптимальному варіанті проектування ліній у відповідному класі напруги, що дозволяє визначити стратегію розвитку проектування об'єкту електричних мереж і сформулювати обмеження в умовах неповноти вихідної інформації.

**Ключові слова:** критеріальний метод, напруга, неповнота вихідної інформації, повітряна лінія, проектування, техніко-економічна модель.

**В. В. ЧЕРКАШИНА, В. М. БАКЛИЦЬКИЙ**

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НА БАЗЕ КРИТЕРИАЛЬНОГО МЕТОДА**

Предложено усовершенствованные технико-экономических моделей воздушных линий 35–750 кВ в соответствии с Законом Украины «О рынке электрической энергии». Актуальность и сложность рассматриваемой проблемы обусловлена тем, что переход к рыночным отношениям предусматривает наличие частной собственности, где территория под электросетевой объект, в том числе и под трассы воздушных линий, является товаром и должна учитываться в формировании стоимости данного объекта. В связи с этим возникла необходимость пересмотра дисконтированных затрат в проектирование линий для приведения их в соответствие с рыночными отношениями. Разработка новой технико-экономической модели воздушных линий 35–750 кВ выполнялось с учетом размеров и стоимости земельных участков под трассу линии, что позволяет провести предпроектный анализ оптимального варианта проектирования объекта электрических сетей. Рассчитано долевое участие стоимости земельного участка в общей стоимости 1 км воздушных линий различных классов напряжения. Определены составляющие усовершенствованной технико-экономической модели воздушных линий 35–750 кВ, а именно основная часть составляющих затрат в общей стоимости 1 км воздушных линий различных классов напряжения. Представлено графическое отображение обобщенных моделей инвестиционных вложений в воздушные линии 35–750 кВ. В представленных исследованиях учтено то, что во время построения технико-экономических моделей практически невозможно предсказать все внутренние часто стохастические ее связи, элементы которых могут быть выражены однозначно, что приводит к неполноте исходной информации. Опираясь на этот факт, в статье для анализа разработанных технико-экономических моделей линий применен критеріальний метод, который позволяет принять решение в условных единицах, как при полной, так и при неполной и неопределенной исходной информации. Реализуя каждое уравнение разработанной технико-экономической модели воздушных линий 35–750 кВ критеріальним методом получено соотношение составляющих в оптимальном варианте проектирования линий в соответствующем классе напряжения, что позволяет определить стратегию развития проектирования объекта электрических сетей и сформировать ограничения в условиях неполноты исходной информации.

**Ключевые слова:** критеріальний метод, напряжение, неполнота исходной информации, воздушная линия, проектирование, технико-экономическая модель.

**V. V. CHERKASHINA, V. M. BAKLITSKY**

## **IMPROVEMENT OF TECHNICAL AND ECONOMIC MODELS OF OVERHEAD LINES TRANSMISSION BASED ON CRITERIONAL METHOD**

Improved technical and economic models of 35–750 kV overhead lines in accordance with the Law of Ukraine "On the Electricity Market" are proposed. The urgency and complexity of the problem is due to the fact that the transition to market relations presupposes the presence of private property, where the area under the grid facility, including the route of overhead lines, is a commodity and should be taken into account in shaping the value of this facility. In this regard, there is a need to review the discounted costs in the design of lines to bring them into line with market relations. The development of a new technical and economic model of 35–750 kV overhead lines was carried out taking into account the size and cost of land under the route of the line, which allows for a feasibility study of the optimal design option for the electrical network. The specific part of the land area in the cost of 1 km of overhead lines of different voltage classes is calculated. The components of the improved technical and economic model of 35–750 kV overhead lines are determined, namely the specific part of the component costs in the total cost of 1 km overhead lines of different voltage classes. A graphical representation of generalized models of investments in 35–750 kV overhead lines is presented. The presented studies take into account that during the construction of technical and economic models it is almost impossible to predict all its internal often stochastic connections, the elements of which

© В. В. Черкашина, В. М. Баклицький, 2020

cannot be expressed unambiguously, which leads to incomplete source information. Based on this fact, in the article for the analysis of the developed technical and economic models of lines the criterion method which allows to make decisions in conditional units both at full and at incomplete and indefinite initial information is applied. Implementing each equation of the developed technical and economic model of 35–750 kV overhead lines by the criterion method the ratio of components in the optimal design of lines in the corresponding voltage class is obtained, which allows to determine the development strategy of electrical networks and to form restrictions in incomplete source information.

**Keywords:** criterion method, voltage, incomplete source information, overhead line, design, technical and economic model.

**Постановка проблеми.** Принцип взаємозв'язку економічного аналізу з рішенням технічних питань – актуальний напрямок розвитку проектування повітряних ліній (ПЛ) згідно Закону України «Про ринок електричної енергії» [1]. Зміни форм господарювання привели до зміни відображення оцінки ефективності транспортування та розподілення потужності й електроенергії. Ринкові відносини передбачають нові підходи під час аналізу дисконтованих витрат в проектування, будівництво та обслуговування ПЛ. Дані умови й обґрунтовують необхідність приведення у відповідність з [1] моделей і методів техніко-економічного аналізу ПЛ електропередач.

Актуальність і складність проблеми обумовлена й тим, що існуючий раніше підхід до проектування [2] не враховував деяких факторів, які впливають на загальні інвестиції в електромережеві об'єкти.

Так, капітальні витрати в проектування 1 км ПЛ мали питомі нормативи, які склалися з:

- витрат на підготовку території під об'єкт;
- витрат на монтаж обладнання;
- витрат на будівництво тимчасових будівель та споруд і на інші роботи;
- вартості проектно-дослідних робіт;
- резерву на непередбачені витрати [2].

Перехід до ринкових відносин обумовив наявність приватної власності, де територія під електромережевий об'єкт, в тому числі й для траси ПЛ, є товаром і повинна враховуватися у формуванні вартості даного об'єкту. У зв'язку з цим виникла необхідність перегляду дисконтованих витрат в проектування ПЛ для приведення їх у відповідність з ринковими відносинами.

**Аналіз публікацій.** Для аналізу техніко-економічних моделей електроенергетичних об'єктів застосовують два класи моделей [3–6].

До першого класу належать оціночні математичні моделі. Суть даних моделей виражається у можливості детального врахування індивідуальних особливостей конкретного об'єкту оптимізації, у простоті характеру зменшення параметрів об'єкта та їх функціонального зв'язку. Реалізація оціночних моделей можлива за допомогою алгоритмів та програмного розрахунку для визначеної кінцевої множини попередньо намічених рішень. Практика використання оціночних моделей показала їхню достатню ефективність при розгляді системи математичних моделей, що дозволяє в остаточному підсумку зробити принципові висновки. Незважаючи на певні переваги оціночних моделей, вони мають ряд недоліків. Основним недоліком є можливість вибору не оптимального варіанту, тому що можливість оцінки порівнюваних варіантів досить низька для того, щоб із заданою точністю вибрати найкраще рішення з усієї множини припустимих

рішень. Тому оціночні моделі вимагають ретельного мотивування вибору можливих варіантів порівняння.

До другої категорії моделей, з точки зору формування і математичного апарату, відносяться оптимізаційні моделі. У цьому випадку одна модель включає в себе опис усієї множини допустимих рішень. Можливості застосування таких моделей досить великі, але реалізація їх трудомістка і не завжди доступна, що служить певним поштовхом для автоматизації методів обчислення, що дозволяють з достатнім ступенем точності вирішити ці завдання.

Принцип побудови і реалізації техніко-економічної моделі передбачає спільне використання оціночних та оптимізаційних моделей. Для цього за допомогою оптимізаційної моделі вибираються варіанти, що лежать поблизу оптимального рішення. Після чого за допомогою оціночної моделі йде пошук найкращого варіанту з попередньо намічених рішень.

Після побудови техніко-економічної моделі необхідно знайти метод її реалізації. Вибір того чи іншого методу реалізації залежить від класу функції і обмежень, які присутні в конкретному завданні. На сьогоднішній день, найбільш розробленим є метод лінійного програмування. Основною перевагою даного методу є те, що він ефективний в реалізації завдань з великим числом змінних.

Нарівні з методом лінійного програмування існують й інші методи математичного аналізу [6–8]. Це пов'язано з тим, що в більшості випадків детальна розробка техніко-математичних моделей виявила нелінійний характер основних економічних зв'язків об'єкту, що досліджується.

Під час побудови техніко-економічної моделі практично неможливо врахувати всі її внутрішні, часто стохастичні зв'язки, але оскільки інформація про такі зв'язки часом не повна і найчастіше невизначена, то формалізація завдання оптимальності вимагає врахування додаткових критеріїв. Усе це справедливо і для розвитку проектування ПЛ електропередачі, де за наявності головного критерію – мінімуму дисконтованих витрат – діють й інші додаткові критерії. При цьому одним із шляхів реалізації багатокритеріальних завдань є рішення за критерієм економічності та заміною додаткових критеріїв системою обмежень на змінні техніко-економічного функціоналу [5, 6].

Для аналізу техніко-економічних моделей, що представляють собою функції мети багатьох змінних і відносяться до певного підкласу, найбільш ефективним є критеріальний метод [9].

**Мета статті.** Вдосконалити техніко-економічні моделі ПЛ електропередачі й проаналізувати їх критеріальним методом для вибору оптимального варіанту проектування ліній відповідно Закону України «Про ринок електричної енергії».

**Основні матеріали досліджень.** Завдання техніко-економічного аналізу мають три складові:

- вибір критеріїв оптимальності;
- побудова математичної моделі;
- пошук методу реалізації математичної моделі.

В залежності від умов задачі вибирається критерій оптимальності. Якщо ставиться задача пошуку оптимальних техніко-економічних зв'язків, то одним із головних критеріїв є мінімум дисконтних витрат [10]:

$$B(x) \rightarrow \min, x \in X.$$

Побудова техніко-економічної моделі – це завдання, яке може бути сформульоване в термінах: мета; засоби; результат.

Формалізація мети зводиться до мінімізації деякої функції (в даному випадку – мінімуму дисконтних витрат), яка складається з безлічі усіх результатів і набуває дійсного значення. Ця функція носить назву функція мети.

Техніко-економічна модель є формальним описом складових її елементів: мети, засобів, а також зв'язку між засобами і результатами. Засоби і результати – це множини, такі як  $X$  – множина альтернатив та  $A$  – множина результатів.

Основні залежності результатів ( $A$ ) від альтернатив ( $X$ ) умовно підрозділяються на:

- кожна альтернатива призводить до єдиного результату, тобто є функціональною залежністю вихідних даних від альтернатив;
- кожна альтернатива може привести до безлічі результатів, кожен з яких має певну вірогідність появи;
- кожна альтернатива може привести до одного із декількох результатів (умова невизначеності).

**Визначення складових техніко-економічних моделей ПЛ.** Існуюча техніко-економічна модель дисконтованих витрат 1 км ПЛ має вигляд [11]:

$$B = B_1 + B_2 = (E + p)(a + vF) + (3I^2 \rho \tau \beta) / F, \quad (1)$$

де  $B_1$  – інвестиційна складова техніко-економічної моделі ПЛ (інвестиційні вкладення);

$B_2$  – технічна складова техніко-економічної моделі ПЛ (експлуатаційні витрати);

$p$  – коефіцієнт відрахувань на амортизацію, ремонт та обслуговування лінії  $p = p_a + p_{\text{рем}} + p_{\text{обсл}}$ ;

$a$  – постійна складова вартості, яка не залежить від перерізу проводу, грош. од. / км;

$v$  – коефіцієнт подорожчання, що враховує зміну вартості спорудження 1 км лінії в залежності від перерізу проводу, грош. од. / (км мм<sup>2</sup>);

$F$  – переріз проводу, мм<sup>2</sup>;

$I$  – максимальний струм лінії при нормальному режимі, А;

$\rho$  – питомий опір провідникового матеріалу, Ом мм<sup>2</sup> / км;

$\tau$  – час максимальних витрат;

$\beta$  – питома вартість витрат електроенергії, грош. од. / (кВт год);

$E$  – реальна відсоткова ставка, що визначається як

$$E = [(E_{\text{ном}} + 100) / (i + 100) - 1] \cdot 100, \quad (2)$$

де  $E_{\text{ном}}$  – номінальна відсоткова ставка, %;

$i$  – темп інфляції.

В умовах ринкових відносин інвестиційна складова ( $B_1$ ) на 1 км ПЛ складається з відрахування плати за кредит і амортизаційних відрахувань [11].

Ця залежність з урахуванням інфляції в умовах ринкової економіки для різних класів напруги складає:

$$B_1 = \left( \frac{E_{\text{ном}} + 100}{\alpha + 100} - 1 \right) \times \left( 1 + \left[ \left( \frac{E_{\text{ном}} + 100}{\alpha + 100} \right)^{T_{\text{сл}}} - 1 \right]^{-1} \right) K_i, \quad (3)$$

де  $B_1$  – інвестиційна складова на 1 км ліній, грош. од.;

$E_{\text{ном}}$  – номінальна відсоткова банківська ставка, %;

$\alpha$  – темп інфляції;

$T_{\text{сл}}$  – нормативний термін служби обладнання, рік;

$K_i$  – вартість ПЛ  $i$ -го класу напруги.

Вартість ПЛ різного класу напруги залежить від конструкції об'єкта і складається з базових показників вартості ПЛ (без ПДВ), які враховують всі витрати виробничого призначення і відповідають середнім умовам будівництва та нормативного тиску по механічній міцності до 600 Па.

Для одержання загальної вартості ПЛ до базисних показників додаються також:

- витрати на будівництво тимчасових будівель та споруд;
- вартість проектно-дослідних робіт та авторського нагляду;
- витрати на інші роботи [12, 13].

Площа відведення земельної ділянки та її вартість для проходження ПЛ приймається з урахуванням класу напруги ліній, їх конструкції, розрахункових значень площі відводу під опори ПЛ, розмірів траси ПЛ та оціночної вартості землі та розраховується згідно з нормативними документами і враховує особливості місцевості, по якій проходить траса ліній [11–14].

Враховуючи вищевказане, у табл. 1 представлені розраховані середні значення складових вартості в загальній вартості 1 км ПЛ різних класів напруги.

Площа земельної ділянки для 1 км ПЛ приймається з урахуванням класу напруги ПЛ, конструктивного виконання об'єкта, розрахункових значень площі відводу під опори ПЛ, розмірів траси ПЛ та оціночної вартості землі. Вартість земельної ділянки розраховується згідно з нормативними документами та враховує особливості місцевості, по якій проходить ПЛ [11–14].

У табл. 2 представлені розраховані значення вартості земельної ділянки для 1 км ПЛ, що виконано на одно- та дволанцюгових опорах. Для визначення вартості земельної ділянки (табл. 2) були прийняті середні умови будівництва, тобто не враховувалося ускладнення обставин (лісові масиви, гірська місцевість тощо).

Таблиця 1 – Питома частина складових витрат у загальній вартості 1 км ПЛ 35–750 кВ, умов.од.

Призначення витрат	Клас напруги, кВ			
	35	110	330	750
Базисний показник вартості	76	78	81	82
Витрати на будівництво тимчасових будівель і споруд	2,5	2,5	2,5	3,0
Вартість проектно-дослідницьких робіт і авторського нагляду	7,5	7,5	7,5	8,0
Інші роботи і витрати	3,0	3,0	3,0	3,0
Витрати на відведення земельної ділянки	11	9	6	4

Таблиця 2 – Питома частина вартості земельної ділянки у вартості 1 км ПЛ різних класів напруги, умов.од.

Призначення витрат	Клас напруги, кВ; види опор							
	35		110		330		750	
	Сталеві	Залізобетонні	Сталеві	Залізобетонні	Сталеві	Залізобетонні	Сталеві	Сталеві
На відведення земельної ділянки для 1-ланцюгової ПЛ	11	13	9	11	6	7	4	
На відведення земельної ділянки для 2-ланцюгової ПЛ	10	9	8	6	4	–	–	

Для коректної постановки задачі і проведення її техніко-економічного аналізу доцільно замінити модель (1) моделями, які не містять постійної складової в явному вигляді. Один із шляхів переходу від існуючих розрахункових моделей до нових розрахункових моделей можливий при заміні частини моделі апроксимованим виразом з достатньою мірою точності, причому до цієї частини моделі повинна увійти і постійна складова. Апроксимація як окремих складових, так і цілих виразів, що входять у функцію, виконується на множині  $D = (x_i: x_j, x_{min} \leq x_j \leq x_{max})$ , яка є областю визначення початкової функції [6, 9].

Отже, для побудови нової розрахункової моделі ПЛ складову моделі (1) замінено нелінійними апроксимуючим виразом:

$$K_i = a_i F^{b_i}, \quad (4)$$

де  $a_i$  – коефіцієнт апроксимації, що залежить від типу опор, конструкції лінії, класу напруги;

$F$  – переріз, змінна величина, мм<sup>2</sup>;

$b_i$  – показник апроксимованого виразу, отриманий з певною мірою точності методом найменших квадратів.

Якщо вартість електропередачі для різних класів напруги представити апроксимуючим виразом (4), тоді інвестиційна складова (3) техніко-економічної моделі ПЛ (1), грош.од., матиме вигляд

$$B_1 = \left( \frac{E_{\text{НОМ}} + 100}{\alpha + 100} - 1 \right) \times \left( 1 + \left[ \left( \frac{E_{\text{НОМ}} + 100}{\alpha + 100} \right)^{T_{\text{сл}}} - 1 \right]^{-1} \right) a_i F^{b_i}, \quad (5)$$

Отримана розрахункова модель інвестиційної складової техніко-економічної моделі 1 км ПЛ носить приблизний характер, який залежить від заданої міри точності моделі, сукупності дійсних точок, що зумовлюють витрати в ПЛ.

Графічне відображення узагальнених моделей інвестиційних вкладень у ПЛ для різних класів напруги представлено на рис. 1–3.

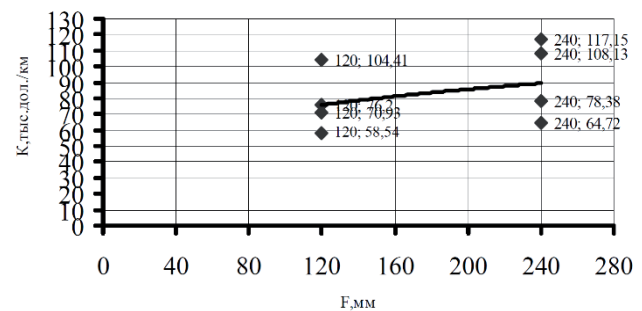


Рисунок 1 – Узагальнена модель інвестиційних вкладень у ПЛ 35–110 кВ

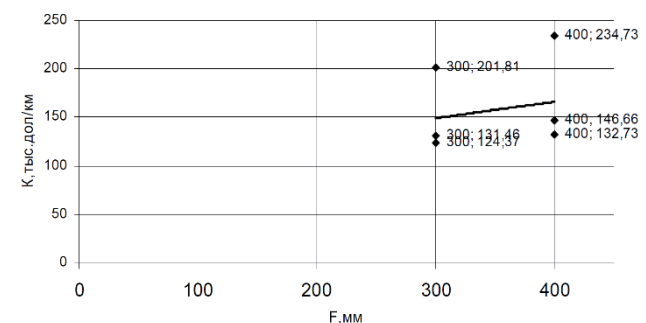


Рисунок 2 – Узагальнена модель інвестиційних вкладень у ПЛ 330 кВ

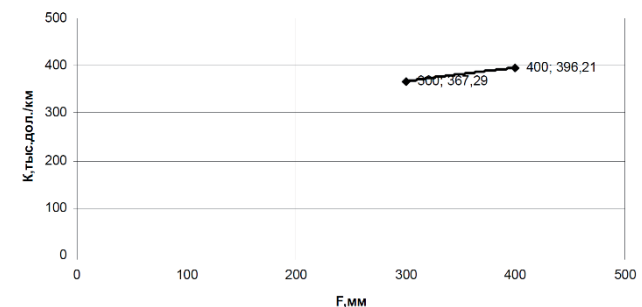


Рисунок 3 – Узагальнена модель інвестиційних вкладень у ПЛ 750 кВ

**Застосування критеріального методу для аналізу вдосконалених моделей ПЛ.** Техніко-економічна модель ПЛ 35–750 кВ представляє собою суму доданків (1), в загальний вираз якої входить як постійна складова, так і змінна.

В якості інструменту дослідження таких моделей в електроенергетиці обирається критеріальний метод, що



дозволяє вести аналіз при неповній вихідній інформації. Можливою реалізацією критеріального методу є рішення по одному з критеріїв і заміна додаткових критеріїв системою обмежень. У кожному конкретному випадку виділення обмежень та побудова системи «головного критерію» пов'язано з умовами завдання, з тактикою і методикою його реалізації [9–11].

Вибір напрямку залежить від виду підкласу, до якого відноситься функція мети. Зазвичай техніко-економічні завдання в енергетиці описуються за допомогою поліноміальних рівнянь декількох змінних з урахуванням технічних вимог до цих змінних. У 70-х роках минулого століття у Московському енергетичному інституті (МЕІ) розроблено метод критеріального програмування, що базується на теорії подібності та дозволяє мінімізувати поліном вигляду [9]:

$$Y_{(x)} = \sum_{i=1}^{m_1} A_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ij}}, x_j \geq 0 \quad (6)$$

де  $A_i$  – позитивні узагальнені константи, які мають детермінований або ймовірнісний характер в залежності від умов завдання і представляють вхідну інформацію про об'єкт;

$x_j$  – параметри оптимізації, позитивні змінні;

$\alpha_{ij}$  – показники ступеня, дійсні числа;

$m_1$  – число доданків в поліномі;

$n$  – число незалежних параметрів.

Обмеження, які накладаються на окремі змінні  $x_j$  і на їхні комплекси, представляються у вигляді аналогічних (6) поліномів:

$$q_k(x) = \sum_{i=m_{k+1}}^{m_{k+1}} A_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ij}} \leq 1. \quad (7)$$

В деяких випадках сформувані обмеження дуже складно, а іноді і зовсім неможливо, що викликає певні труднощі під час аналізу досліджуваного об'єкта.

Необхідною умовою існування такого мінімуму функції з урахуванням всіх обмежень є вимога канонічності функції.

Алгоритми критеріального програмування дозволяють знайти оптимальні і кількісні економічні зв'язки об'єкта як при заданій, так і неповній вихідній інформації. Окрім цього, перевагою даного методу є те, що нарівні з визначенням оптимальних значень функції мети і параметрів оптимізації можливо оцінити стійкість функції до зміни параметрів в межах точки мінімуму, дослідити чутливість рішення задачі до зміни вихідної інформації [11, 12].

Для використання алгоритмів критеріального методу техніко-економічну модель (1) записуємо для відповідного класу напруги в критеріальній формі:

$$B_*^{35} = \pi'_1 F_*^{\beta^{35}} + \pi'_2 F_*^{-1} \quad (8)$$

$$B_*^{110} = \pi'_1 F_*^{\beta^{110}} + \pi'_2 F_*^{-1} \quad (9)$$

$$B_*^{330} = \pi''_1 F_*^{\beta^{330}} + \pi''_2 F_*^{-1} \quad (10)$$

$$B_*^{750} = \pi'''_1 F_*^{\beta^{750}} + \pi'''_2 F_*^{-1} \quad (11)$$

де  $\pi'_1, \pi'_2, \pi''_1, \pi''_2, \pi'''_1, \pi'''_2$  – критерій подібності для певного класу напруги і конструкції ПЛ;

$\beta^{35}, \beta^{110}, \beta^{330}, \beta^{750}$  – узагальнені коефіцієнти

апроксимації певного класу напруги і конструкції ПЛ;

$F_*$  – переріз проводу відповідно до класу напруги,

умов. од.

Реалізуючи кожне рівняння розробленої техніко-економічної моделі (8–11) критеріальним методом проаналізовано техніко-економічні моделі ПЛ 35–750 кВ включно і отримано співвідношення в оптимальному варіанті для ПЛ у відповідному класі напруги (табл. 2).

Таблиця 2 – Співвідношення складових в техніко-економічних моделях ПЛ 35–750 кВ в оптимальному варіанті

Клас напруги	Значення критерію подібності для класу напруги і конструкції ПЛ
35 кВ	$\pi'_1 = 0,82; \pi'_2 = 0,18$
110 кВ	$\pi''_1 = 0,8; \pi''_2 = 0,2$
330 кВ	$\pi'''_1 = 0,73; \pi'''_2 = 0,27$
750 кВ	$\pi'''_1 = 0,79; \pi'''_2 = 0,21$

Під час проектування ПЛ електропередачі, окрім економічної ефективності, необхідно враховувати їх технічні характеристики. Не економічні критерії в задачах проектування ПЛ часту мають вирішальне значення. Тому, аналізуючи техніко-економічні показники при виборі пріоритетного напрямку проектування ПЛ, необхідно виконати зіставлення інвестиційних вкладень у ПЛ з економічним еквівалентом підвищення пропускної здатності. Відповідно з цим було проаналізовано вплив складових ( $\pi'_1, \pi''_1, \pi'''_1$ ) техніко-економічних моделей ПЛ на еквівалент пропускної здатності ( $P_n$ ) ліній різних класів напруги в оптимальному варіанті.

Результати дослідження впливу інвестиційної складової техніко-економічних моделей ПЛ відносно еквіваленту пропускної здатності ліній різних класів напруги в оптимальному варіанті представлено на рис. 4.

#### Висновки.

1. Вдосконалено техніко-економічні моделі ПЛ 35–750 кВ врахуванням розмірів і вартості земельних ділянок, що дозволяє провести аналіз оптимального варіанту проектування ліній.

2. Проведено аналіз інвестиційної складової розробленої техніко-економічної моделі ПЛ 35–750 кВ, що дозволило визначити питому частину складових витрат в загальній вартості 1 км ліній.

3. Проаналізовано критеріальним методом розроблені техніко-економічні моделі ПЛ 35–750 кВ і

отримано співвідношення складових в оптимальному варіанті проектування ПЛ при мінімумі дисконтованих витрат, що дозволяє визначити стратегію розвитку проектування ПЛ і сформулювати обмеження в умовах неповноти вихідної інформації.

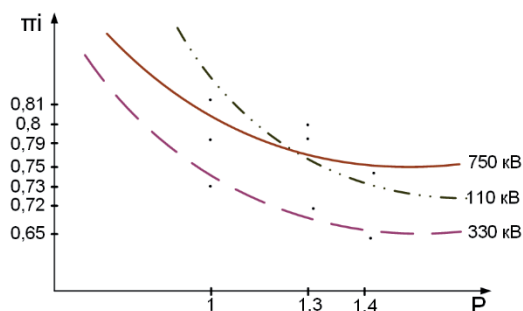


Рисунок 4 – Залежність складової техніко-економічних моделей ПЛ відносно еквіваленту пропускної здатності ліній різних класів напруги в оптимальному варіанті

### Список літератури

1. Про ринок електричної енергії України: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. *Відомості Верховної Ради*. 2017. №27–28. Ст. 312.
2. *Сборник нормативов удельных капитальных вложений в строительство воздушных линий электропередачи 35–750 кВ. Руководящие материалы*. Минэнерго СССР, 1986. 30 с.
3. Dantzig G. B., Thapa M. N. *Linear Programming 1. Introduction*. New York: Springer-Verlag, 1997. 435 p.
4. Dantzig G. B., Thapa M. N. *Linear Programming 2. Theory and Extensions*. New York: Springer-Verlag, 2003. 448 p.
5. Aspray W. *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*. Cambridge: MIT Press, 1990. 376 с.
6. Лежнюк П. Д. *Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом*: монографія. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. 131 с.
7. Ляшенко И. Н., Карагодова Е. В., Черникова Н. В., Шор Н. З. *Линейное и нелинейное программирование*. Киев: Вища школа, 1975. 372 с.
8. Solopov R. V. Criterion Complex Optimization in Electric-Power Systems. *Russian Electrical Engineering*. 2017. Vol. 88, № 5. P. 280-284. doi: 10.3103/S1068371217050133
9. Черемисин Н. М., Черкашина В. В. *Критеріальний метод аналізу техніко-економічних задач в електричних сетях и системах*. Харьков: Факт, 2014. 88 с.
10. Черемисин М. М., Мороз О. М., Черкашина В. В., Мірошник О. О. *Економічні розрахунки в інженерній діяльності на прикладах задач електроенергетики*. Харків: ФОП Панов А. М., 2018. 228 с.
11. Бондаренко В. О., Черемисин М. М., Черкашина В. В. *Системний підхід передпроектної оцінки повітряних ліній в умовах ринкових відносин*. Харків: Факт, 2013. 260 с.
12. ГКД 340.000.002-97. *Визначення економічної ефективності капіталовкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми та електричні мережі*. Київ: Міненерго України, 1997. 54 с.
13. ГД 34.20.178:2005. *Проектування електричних мереж напругою 0,4-110 кВ. Рекомендації*. Київ: Міністерство енергетики та палива України. 2005. 48 с.

14. ДБН В.2.5-16-99. *Інженерне обладнання зовнішніх мереж. Визначення розмірів земельних ділянок для об'єктів електричних мереж*. Київ: Держбуд України, 1999. 24 с.

### References (transliterated)

1. Pro rynek elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy [On the Electricity Market]: Law of Ukraine on 13.04.2017 № 2019 VIII. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*. 2017. № 27–28. Art. 312.
2. *Sbornik normativov udel'nykh kapital'nykh vlozheniy v stroitel'stvo vozdushnykh liniy elektroperedachi 35–750 kV. Rukovodyashchie materialy* [Collection of standards for specific capital investments in the construction of 35-750 kV overhead transmission lines. Guidance materials]. Minenergo of USSR, 1986. 30 p.
3. Dantzig G. B., Thapa M. N. *Linear Programming 1. Introduction*. New York: Springer-Verlag, 1997. 435 p.
4. Dantzig G. B., Thapa M. N. *Linear Programming 2. Theory and Extensions*. New York: Springer-Verlag, 2003. 448 p.
5. Aspray W. *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*. Cambridge: MIT Press, 1990. 376 c.
6. Lezhnyuk P. D. *Analiz chutlyvosti optimal'nykh rishen' v skladnykh sistemakh kryterial'nyim metodom: monohrafiya* [Sensitivity analysis of optimal solutions in complex systems using the criterion method: monograph]. Vinnytsia, Universum-Vinnytsya Publ., 2003. 131 p.
7. Lyashenko I. N., Karagodova E. V., Chernikova N. V., Shor N. Z. *Lineynoe i nelineynoe programmirovaniye* [Linear and non-linear programming]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 1975, 372 p.
8. Solopov R. V. Criterion Complex Optimization in Electric-Power Systems. *Russian Electrical Engineering*. 2017. Vol. 88, № 5. P. 280-284. doi: 10.3103/S1068371217050133
9. Cheremisin M. M., Cherkashyna V. V. *Kriterial'nyy metod analiza tekhniko-ekonomicheskikh zadach v elektricheskikh setyakh i sistemakh* [Criterion-based method for analysing technical and economic problems in electricity networks and systems]. Kharkiv, Fakt Publ., 2014, 88 p.
10. Cheremisin M. M., Moroz O. M., Cherkashyna V. V., Miroshnyk O. O. *Ekonomichni rozrakhunky v inzheneriyi diyal'nosti na prykladakh zadach elektroenerhetyky* [Economic calculations in engineering activities using examples from the electricity sector]. Kharkiv, FOP Panov A. M. Publ., 2018, 228 p.
11. Bondarenko V. O., Cheremisin M. M., Cherkashyna V. V. *Sistemnyy pidkhid peredproektynoi otsinky povitryanykh liniy v umovakh rynkovykh vidnosyn* [A systematic approach to pre-project evaluation of overhead lines under market conditions]. Kharkiv, Fakt Publ., 2013, 260 p.
12. HKD 340.000.002 97. *Vyznachennya ekonomichnoyi efektyvnosti kapitalovkladen' v enerhetyku. Metodyka. Enerhosystemy ta elektrychni merezhi* [Industry Document 340.000.002 97. Determination of the economic efficiency of investment in the energy sector. Methodology. Power systems and electric networks]. Kyiv, Minenergo of Ukraine, 1997, 54 p.
13. HID 34.20.178:2005. *Proektuvannya elektrychnykh merezh napruhooyu 0,4-110 kV. Rekomendatsiyi* [Industry Document 34.20.178:2005. Design of electrical networks with a voltage of 0.4-110 kV. Recommendations]. Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2005, 48 p.
14. DBN V.2.5-16-99. *Inzhenerne obladnannya zovnishnykh merezh. Vyznachennya rozmiriv zemel'nykh dilyanok dlya ob'ektiv elektrychnykh merezh* [State Standard V.2.5-16-99. Engineering equipment for external networks. Determining the size of land plots for electric grid objects]. Kyiv, Derzhbud of Ukraine, 1999, 24 p.

Надійшла (received) 16.12.2020

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Черкашина Вероніка Вікторівна (Черкашина Вероника Викторовна, Cherkashyna Veronika Viktorivna)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com.

**Баклицький Владислав Миколайович (Баклицький Владислав Николаевич, Bakliysky Vladyslav Mykolayovych)** – інженер-проектувальник ТОВ «Схід-Електросервіс», Харків, Україна; e-mail: vlad95415@outlook.com.