

**В.Е.Бондаренко** докт.техн.наук, **В.В.Черкашина** (НТУ «ХПИ», Харьков), **Н.М.Черемисин**, канд.техн.наук (ХНТУСХ им. проф. П.Василенко, Харьков)

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНЫХ ОТНОШЕНИЙ И АНАЛИЗ ИХ КРИТЕРИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ**

*Проанализированы составляющие инвестиционных вложений в проектирование и строительство воздушных линий (ВЛ) электропередачи с учетом рыночных отношений, что позволило сформировать технико-экономические модели ВЛ электропередачи, которые могут быть использованы в предпроектной практике для выбора приоритетного направления при проектировании электросетевого объекта в условиях неполноты исходной информации. Критериальным методом проведен анализ сформированных технико-экономических моделей ВЛ электропередачи с целью выработки стратегии инвестиционных вложений для развития ВЛ электропередачи соответствующего класса напряжения.*

*Проаналізовано складові інвестиційних вкладень у проектування та будівництво повітряних ліній (ПЛ) електропередачі з врахуванням ринкових відносин, що дозволило сформулювати техніко-економічні моделі ПЛ електропередачі, які можуть бути використані у передпроектній практиці для вибору пріоритетного напрямку при проектуванні електромережевого об'єкта в умовах неповної вихідної інформації. Критеріальним методом проведено аналіз сформованих техніко-економічних моделей ПЛ електропередачі з метою застосування стратегії інвестиційних вкладень для розвитку ПЛ електропередачі відповідного класу напруги.*

**Введение.** До 2020 года в Украине намечается значительный объем ввода в эксплуатацию новых электросетевых объектов, который направлен на обеспечение надежного электроснабжения потребителей, транзита мощности из избыточных районов энергосистемы в дефицитные, дальнейшего развития противоаварийного управления, связи, телемеханики, автоматизированного учета электроэнергии для реализации устойчивой и надежной работы энергосистемы Украины с энергообъединениями России и стран Европы. Переход к рыночным отношениям в корне изменил экономические и юридические отношения процесса проектирования и эксплуатации воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Особенно это наблюдается в продолжительности реализации проектов из-за согласования с собственниками земельных участков территорий под электросетевые объекты.

Успешное решение поставленных задач возможно только при наличии современной методологии проектирования, которая может быть реализована за счет новых научных направлений и технических решений в электросетевом хозяйстве. Одним из таких направлений является разработка и внедрение новых современных методик и технических решений, направленных на обеспечение повышения экономической эффективности транспорта электрической энергии.

**Постановка проблемы.** Организация надежного и качественного транспорта электрической энергии в условиях рыночных отношений является одной из важных задач, которая связана с решением как технических, так и экономических вопросов. Одним из направлений решения технических вопросов повышения эффективности транспорта электрической энергии является усовершенствование конструкций ВЛ электропередачи, тесно связанное с проблемой снижения инвестиционных вложений в проектирование и строительство ВЛ электропередачи, что также отражается на эффективности транспорта электрической энергии.

Изменение форм хозяйствования естественно привели к изменению оценки эффективности транспорта электрической энергии. Рыночные отношения предполагают новые подходы при анализе инвестиционных вложений в ВЛ, что и обосновывает необходимость приведения к современным рыночным условиям моделей и методов технико-экономического обоснования предпроектного решения по сооружению ВЛ электропередачи.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Актуальность и сложность данной проблемы обусловлена еще и тем, что существующий ранее подход не учитывал некоторые факторы, которые влияют на общие инвестиционные вложения в электросетевые объекты. Так, капитальные затраты на проектирование и строительство 1 км ВЛ электропередачи имели удельные нормативы на рас-

ходы для подготовки территории под объект и монтаж оборудования; затраты на строительство временных зданий и сооружений и на другие работы; стоимость проектно-исследовательских работ и резерв на непредвиденные расходы [11].

Известно, что при обработке предпроектных решений целесообразно руководствоваться системой иерархически построенных и взаимосвязанных технико-экономических моделей разных функциональных уровней. При этом оценка выбора приоритетного направления осложняется еще неполнотой исходной информации и многокритериальностью [2,4,6].

Задачи технико-экономического анализа имеют три составляющие: выбор критериев оптимальности; составление математической модели; отыскание метода реализации математической модели. В зависимости от условий задачи может быть выбран критерий оптимальности. Если ставится задача нахождения оптимальных технико-экономических связей в условиях рыночных отношений, то одним из главных критериев является минимум дисконтных затрат [5].

При построении расчетной модели ВЛ практически невозможно учесть все ее внутренние, зачастую стохастические связи, но так как информация о таких связях порой не полная и чаще всего неопределенная, формализация задачи оптимальности требует учета дополнительных критериев. В данной статье для решения подобного рода задач использован критериальный метод анализа технико-экономических моделей [1,4,5,6].

**Цель статьи.** Проанализировать составляющие инвестиционных вложений в проектирование и строительство ВЛ электропередачи с учетом стоимости земельных участков под электросетевой объект, что позволит сформировать технико-экономические модели ВЛ электропередачи в условиях рыночных отношений, которые могут быть использованы в предпроектной практике для выбора приоритетного направления при проектировании электросетевого объекта в условиях неполноты исходной информации. Используя критериальный метод, выполнить анализ сформированных технико-экономических моделей ВЛ электропередачи с целью выработки стратегии инвестиционных вложений для развития ВЛ электропередачи соответствующего класса напряжения.

**Основные материалы исследования.** В практике построения и реализации технико-экономических моделей не существует общепринятой концепции. В каждом конкретном случае построение расчетной модели и метод ее реализации тесно взаимосвязаны.

Принцип построения и реализации технико-экономической модели предусматривает совместное использование как оценочных, так и оптимизационных моделей. Для этого с помощью оптимизационной модели выбираются варианты, лежащие вблизи оптимального решения. После чего с помощью оценочной модели ведется поиск приоритетного решения из предварительно намеченных вариантов [1,5,6].

Большие трудности при решении поставленной задачи возникают при учете исходной информации, достоверность которой зачастую бывает не полной, а порой и отсутствует совсем, что и приводит к неопределенности исходной информации [4]. В этом случае целесообразно выбирать такой метод анализа, который бы это учитывал.

При анализе технико-экономических моделей ВЛ электропередачи с учетом современных рыночных отношений одним из главных критериев оптимальных технико-экономических связей является минимум дисконтных затрат [1,5]

$$Z(x) \rightarrow \min, \quad x \in X. \quad (1)$$

Технико-экономическую модель ВЛ для определения дисконтных затрат (3) в 1 км ВЛ электропередачи можно представить как

$$Z = Z_1 + Z_2 = (E + p)(a + vF) + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}, \quad (2)$$

где  $Z_1$  – инвестиционная составляющая технико-экономической модели ВЛ;  $Z_2$  – техническая составляющая технико-экономической модели ВЛ;  $E$  – реальная процентная ставка;  $p$  – коэффициент отчислений на амортизацию, ремонт и обслуживание линии;  $a$  – постоянная составляющая стоимости 1 км ВЛ, зависящая от типа опор, конструктивного исполнения ВЛ электропередачи, класса напряжения, денежные единицы (д.е) / км;  $v$  – коэффициент удорожания, учитывающий изменение стоимости 1 км ВЛ электропередачи в зависимости от сечения провода, нормируемого в зависимости от класса 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).

В условиях рыночных отношений инвестиционная составляющая, в отличие от существующих  $Z_1$ , включает стоимость 1 км линии, выплаты по кредитам, амортизационные отчисления, а также учитывает инфляцию. При этом для разных классов напряжения в общем виде  $Z_1$  можно представить как

$$Z_1 = \left( \frac{E_{ном} + 100}{\alpha + 100} - 1 \right) \left( 1 + \left[ \left( \frac{E_{ном} + 100}{\alpha + 100} \right)^{T_{сн}} - 1 \right] \right) K_i, \quad (3)$$

где  $E_{ном}$  – номинальная процентная банковская ставка, %;  $\alpha$  – темп инфляции;  $T_{сн}$  – нормативный срок службы оборудования, год;  $K_i$  – стоимость 1 км ВЛ  $i$ -го класса напряжения, д.е./км [5].

Стоимость ВЛ электропередачи разного класса напряжения зависит от конструктивного исполнения объекта и состоит из базисных показателей стоимости ВЛ (без НДС), которые учитывают все расходы производственного назначения и соответствуют средним условиям строительства. Для получения стоимости 1 км ВЛ электропередачи к базисным показателям прилагаются также затраты на строительство временных зданий и сооружений; стоимость проектно-исследовательских работ и авторского надзора, расходы на другие работы [7].

Поскольку переход к рыночным отношениям обусловил наличие частной собственности, то одним из существенных факторов, который влияет на стоимость ВЛ электропередачи, являются расходы на отвод земельного участка под электросетевой объект. А поскольку ВЛ электропередачи занимают протяженную территорию [3], то в силу сложности учета стоимости отдельных участков ВЛ электропередачи целесообразно в первом приближении принять среднее значение стоимости земельных ресурсов в Украине [12]. Стоимость отвода земельного участка для ВЛ электропередачи принимается с учетом класса напряжения ВЛ, конструктивного исполнения объекта, расчетных значений площади отчуждения под опоры ВЛ, размеров трассы ВЛ, оценочной стоимости земли и учитывает особенности местности, по которой проходит трасса ВЛ электропередачи [8,10,12].

В табл. 1 приведены средние значения составляющих в стоимости 1 км ВЛ разных классов напряжения, %.

**Таблица 1**

Назначение расходов	Напряжение, кВ		
	110	330	750
Базисный показатель стоимости	78	81	83
Затраты на строительство временных зданий и сооружений	2,5	2,5	3,0
Стоимость проектно-исследовательских работ и авторского надзора	7,5	7,5	8,0
Прочие работы и затраты	3,0	3,0	3,0
Затраты на отвод земельного участка (усредненное значение)	9	6	3

Для определения затрат на отвод земельного участка для 1 км ВЛ электропередачи разных классов напряжения и различного конструктивного исполнения были приняты средние условия строительства, то есть не учитывались осложнения обстоятельств (лесные массивы, горная местность). Причем, как видно из табл. 1, составляющая стоимости отвода земельного участка под трассу ВЛ электропередачи изменяется в зависимости от класса напряжения, и с учетом протяженности объекта [3] будет иметь разные стоимости согласно [12], что и является определяющим фактором, свидетельствующим о необходимости учета этой составляющей при анализе инвестиционных вложений в проектирование и строительство ВЛ электропередачи.

Расчеты составляющих инвестиционных вложений (стоимостные показатели) в 1 км ВЛ электропередачи разных классов напряжения и различного конструктивного исполнения в условиях рыночных отношений были проведены в соответствии с ПУЭ Украины [8]. При этом полная стоимость 1 км ВЛ электропередачи рассчитывается с учетом коэффициента инфляции на конец года, а также учитывает резерв на непредвиденные расходы [7,9,11].

Стоимость 1 км (тыс.дол./км) ВЛ электропередачи разных классов напряжения и различного конструктивного исполнения с учетом типа опор и всех составляющих, входящих в полную стоимость объекта, представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, стоимость 1 км ВЛ электропередачи зависит от ряда факторов, которые в той или иной степени влияют на полную стоимость электросетевого объекта. Весомую долю этого влияния составляет как конструктивное исполнение, так и стоимость отвода земельного участка под

ВЛ электропередачи.

Известно, что составляющая инвестиционных вложений в 1 км ВЛ электропередачи, которые входят в технико-экономическую модель ВЛ (2), учитывает стоимость отвода земельного участка под трассу ВЛ, описывается линейным двучленом вида

$$K = a + vF. \quad (4)$$

Таблица 2

U, кВ	Сечение провода, мм <sup>2</sup>	Кол-во цепей	Базисная стоимость		Стоимость без учета отвода земельного участка		Стоимость с учетом отвода земельного участка		Полная стоимость 1 км ВЛ	
			Стальные опоры	ж/б опоры	Стальные опоры	ж/б опоры	Стальные опоры	ж/б опоры	Стальные опоры	ж/б опоры
110	120	1	47.72	38.64	53.93	43.66	58.74	48.47	70.93	58.53
		2	72.27	52.27	81.66	59.10	87.47	63.10	104.40	76.20
	240	1	53.18	43.18	60.10	48.79	64.91	53.60	78.38	64.74
		2	81.59	75.0	92.20	84.74	97.0	89.55	117.15	108.10
330	2x300	1	90.68	85.45	102.47	96.60	108.87	103.0	131.46	124.37
		2	141.59	-	159.99	-	167.07	-	201.73	-
	2x400	1	101.82	91.36	115.06	103.2	121.46	109.6	146.70	132.36
		2	166.36	-	187.99	-	194.39	-	234.73	-
750	5x300	1	258.39	-	294.57	-	304.17	-	367.29	-
	5x400	1	279.41	-	318.52	-	328.12	-	396.21	-

Аппроксимация стоимостных показателей линейным двучленом предполагает наличие постоянной составляющей в технико-экономической модели ВЛ электропередачи. В зависимости от поставленной задачи доля участия постоянной составляющей функции цели может быть различной. В некоторых задачах она составляет всего несколько процентов от общего значения функции, принятой за 100%, а большая часть приходится на переменную часть. В целом ряде других задач она составляет большую часть функции цели, тогда оптимизация только переменной составляющей не оправдывает себя.

Таким образом, для корректной постановки задачи и проведения ее технико-экономического обоснования целесообразно заменить существующие модели (4) моделями, которые не содержат постоянной составляющей в явном виде.

Один из путей перехода от существующих технико-экономических моделей ВЛ к современным технико-экономическим моделям возможен при замене части модели аппроксимированным выражением с достаточной степенью точности, причем в эту часть модели должна войти постоянная составляющая. Аппроксимация как отдельных составляющих, так и целых выражений, входящих в функцию, производится на множестве  $D=(x_i, x_j, x_{\min} \leq x_j \leq x_{\max})$ , где  $x$  – действительные числа. Совокупность действительных точек в заданном множестве можно заменить совокупностью точек, лежащих на прямой, что не устраивает по соображениям появления постоянной составляющей, или совокупностью точек, лежащих на кривой, имеющей постоянную составляющую в неявном виде на данном множестве [1,2,6].

Следовательно, для формирования современной технико-экономической модели ВЛ электропередачи составляющую инвестиционных вложений в 1 км ВЛ электропередачи (2) необходимо заменить нелинейным аппроксимирующим выражением вида

$$K_i = a_i F^{v_i}. \quad (5)$$

Для определения коэффициентов  $a_i$  и  $v_i$  в выражении (5) были использованы стоимостные показатели ВЛ электропередачи для классов напряжений 110–750 кВ включительно.

Для каждого класса напряжения, конструктивного исполнения ВЛ и типа опор были получены значения коэффициентов  $a_i$  и  $v_i$ . Для оптимизации расчетной модели ВЛ электропередачи значение показателя степени  $v_i$  усредняется и заменяется значением показателя степени  $\tilde{v}$  для разных классов напряжения и определяется совокупностью значений  $v_i$ , принадлежащих своему классу напряжения. Исходя из этого значение обобщающих коэффициентов  $\tilde{v}$  составляет: для 110 кВ – 0,24; для 330 кВ – 0,37; для 750 кВ – 0,26.

Значения  $\tilde{\epsilon}$  были получены без учета вероятности появления ВЛ электропередачи представленного конструктивного исполнения, класса напряжения и типа опор. На данном этапе, во-первых, нет таких статистических данных, а во-вторых, это не входило в задачу построения расчетной модели ВЛ электропередачи с определенной степенью точности. Для более точного определения значений  $\tilde{\epsilon}$  необходим углубленный анализ нормативных показателей с учетом долевого участия значения показателей степени, соответствующего расчетному варианту по конструктивному исполнению ВЛ электропередачи, типу опор и классу напряжения.

Исходя из представленного выше, аппроксимирующее выражение (5), которое входит в инвестиционную составляющую технико-экономической модели ВЛ электропередачи, можно записать в зависимости от класса напряжения:  $K_{110} = a_i F^{\tilde{\epsilon}_{110}}$ ;  $K_{330} = a_j F^{\tilde{\epsilon}_{330}}$ ;  $K_{750} = a_k F^{\tilde{\epsilon}_{750}}$ .

Тогда инвестиционную составляющую технико-экономической модели ВЛ электропередачи (2), (д.е.), в общем виде можно представить как

$$Z_1 = (A-1) \left( 1 + [A^{T_{cr}} - 1]^{-1} \right) a_i F^{\tilde{\epsilon}_i}, \quad (6)$$

где  $A = (E_{ном} + 100) / (\alpha + 100)$ .

Полученная инвестиционная составляющая технико-экономической модели ВЛ носит приближенный характер, зависящий от заданной степени точности модели, совокупности действительных точек и учитывает стоимость отвода земельного участка под трассу ВЛ электропередачи.

Таким образом, технико-экономические модели ВЛ электропередачи (2) различного конструктивного исполнения в условиях рыночных отношений в зависимости от класса напряжения будут иметь вид

$$Z = Z_1 + Z_2 = (A-1) \left( 1 + [A^{T_{cr}} - 1]^{-1} \right) K_{110} + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}; \quad (7)$$

$$Z = Z_1 + Z_2 = (A-1) \left( 1 + [A^{T_{cr}} - 1]^{-1} \right) K_{330} + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}; \quad (8)$$

$$Z = Z_1 + Z_2 = (A-1) \left( 1 + [A^{T_{cr}} - 1]^{-1} \right) K_{750} + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}. \quad (9)$$

Сформированные современные технико-экономические модели ВЛ электропередачи с учетом стоимости земельных участков под электросетевой объект в общем виде представляют собой полином

$$Y_{(x)} = \sum_{i=1}^{m_1} A_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ij}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $A_i$  – положительные обобщенные константы, несущие детерминированный или вероятностный характер в зависимости от условий задачи и представляющие собой исходную информацию об объекте;  $x_j$  – параметры оптимизации, положительные переменные;  $\alpha_{ij}$  – показатели степени, действительные числа;  $m_1$  – число слагаемых в полиноме;  $n$  – число независимых параметров [1,4,5].

Для анализа такого рода задач в условиях неполноты исходной информации целесообразно использовать критериальный метод, опирающийся на теорию подобия [1,2].

Обобщенные константы  $A_i$  известны лишь приближенно, поэтому целесообразно вести исследование на критериальных моделях, имеющих вид

$$Y_{*i} = \sum_{i=1}^{n+1} \pi_i \prod_{j=1}^n x_{*j}^{\alpha_{ij}}, \quad (11)$$

где  $\pi_i$  – критерии подобия, определяемые как

$$\pi_i = \frac{A_i}{y_{*i}} \prod_{j=1}^n x_{*j}^{\alpha_{ij}}, \quad i = \overline{1, n+1}, \quad (12)$$

где  $y_{*i}$  – относительная величина переменной части функции.

Определение критериев подобия  $\pi_i$  (12) базируется на условиях ортогональности и нормировки и представляет собой систему уравнений

$$\sum_{i=1}^{m_1} \pi_i = 1, \quad \frac{dy}{dx_j} / x_j = x_{j\bar{0}} = \frac{y_{\bar{0}}}{x_{j\bar{0}}} \sum \alpha_{ij} \pi_i = 0, \quad j = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Исходя из изложенного, сформированные технико-экономические модели (7), (8), (9) можно представить в критериальном виде

$$Z_*^{110} = \pi'_1 F_*^{\tilde{\epsilon}^{110}} + \pi'_2 F_*^{-1}; \quad (14)$$

$$Z_*^{330} = \pi''_1 F_*^{\tilde{\epsilon}^{330}} + \pi''_2 F_*^{-1}; \quad (15)$$

$$Z_*^{750} = \pi'''_1 F_*^{\tilde{\epsilon}^{750}} + \pi'''_2 F_*^{-1}, \quad (16)$$

где  $\pi'_1, \pi'_2, \pi''_1, \pi''_2, \pi'''_1, \pi'''_2$  – критерии подобия для определенного класса напряжения;  $\tilde{\epsilon}^{110}, \tilde{\epsilon}^{330}, \tilde{\epsilon}^{750}$  – обобщенные коэффициенты аппроксимации определенного класса напряжения.

Используя (13) для каждой модели, получим, что в условиях оптимальной стратегии ВЛ в своем классе напряжения независимо от исходной информации имеют место соотношения: для 110 кВ –  $\pi'_1 = 0,81, \pi'_2 = 0,19$ ; для 330 кВ –  $\pi''_1 = 0,73, \pi''_2 = 0,27$ ; для 750 кВ –  $\pi'''_1 = 0,79, \pi'''_2 = 0,21$ .

Полученные значения критериев подобия  $\pi_i$  для ВЛ электропередачи в своем классе напряжения позволяют с достаточной объективностью в оптимальном варианте планировать долю инвестиционной составляющей при технико-экономическом анализе предпроектного решения.

**Выводы.** Проанализированы составляющие инвестиционных вложений в проектирование и строительство ВЛ электропередачи с учетом рыночных отношений, что позволило сформировать технико-экономические модели ВЛ электропередачи, которые могут быть использованы в предпроектной практике для выбора приоритетного направления при проектировании электросетевого объекта в условиях неполноты исходной информации. Критериальным методом проведен анализ сформированных технико-экономических моделей ВЛ электропередачи с целью выработки стратегии инвестиционных вложений для развития ВЛ электропередачи соответствующего класса напряжения.

1. Астахов Ю.Н., Черемисин Н.М., Ильченко Б.М. Критериальный метод и его применение для анализа систем электроснабжения. Учебное пособие. – М.: 1986. – 45 с.
2. Будзко И.А., Астахов Ю.Н., Черемисин Н.М. Унификация воздушных линий электропередачи // Электричество. – 1982. – №2. – С. 1–8.
3. Ватагин М.Ю., Баталов А.Г., Бондаренко Ю.Н. ОЭС Украины 2007 // Энергетика та електрифікація. – 2008. – №6. – С. 3–12.
4. Веников В.А., Астахов Ю.Н., Федосеев А.А. Критериальный анализ энергетических объектов при неполной исходной информации / В кн.: Фактор неопределенности при принятии оптимальных решений в больших системах энергетики. – 1974. – Т.1. – С. 18–22.
5. Черемисин М.М., Романченко В.І. Економічні розрахунки в інженерній діяльності. Навчальний посібник. – Харків, 2006. – 167 с.
6. Черемисин Н.М., Романченко В.І. Критериальный анализ технико-экономических моделей ВЛ в условиях неполноты исходной информации / Сб. науч. трудов: Питання електрифікації сільського господарства. (50 років – ювілейний випуск). – Харьков: ХДТУСГ. – 1998. – С. 21–25.
7. ГКД 340.000.002-97. Опеление экономической эффективности капитальных вложений в энергетику. – Киев, 1997. – 54 с.
8. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Главы 2.4 і 2.5. – Київ. – 2006. – 190 с.
9. Государственный комитет статистики Украины. Индексы инфляции нарастающим итогом с января 1998 года // Ценообразование в строительстве. – 2008. – №12. – 160 с.
10. ДБН В.2.5-16-99. Визначення розмірів земельних ділянок для об'єктів електричних мереж. – Київ, 1999. – 21 с.
11. Сборник нормативов удельных капитальных вложений в строительство воздушных линий электропередачи 35 – 750 кВ. Руководящие материалы / Минэнерго СССР. – 1986. – 30 с.
12. <http://dkzr.gov.ua/> Офіційний сайт Держкомітету по земельним ресурсам.

Надійшла 11.01.2010