

**П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; Н. М. Черемисин, к. т. н., проф.,
В. В. Черкашина, к. т. н., доц.**

УНИФИКАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ В УСЛОВИЯХ РЫНКА ДВУСТОРОННИХ ДОГОВОРОВ И БАЛАНСИРУЮЩЕГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Показано одно из направлений развития воздушных линий электропередач в условиях рынка двусторонних договоров и балансирующего рынка электроэнергии за счет оптимизации параметрических рядов сечения проводов.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, сечения проводов, критерильный метод.

Введение. Развитие конкурентных отношений в электроэнергетической отрасли Украины связано с внедрением модели рынка двусторонних договоров и балансирующего рынка электроэнергии (РДДБ), что значительно расширяет возможности поставщиков, потребителей и производителей электроэнергии. Модель РДДБ состоит из сегментов, обеспечивающих реализацию конкурентных отношений между его участниками. Условия РДДБ требуют нового научного осмысления прежде всего при создании научной платформы в направлении развития электрических сетей (ЭС) [1, 2]. Перспективным изменением в данном направлении является методология поиска оптимальных решений, которая обосновывает рациональную структуру и формирует параметрические ряды электросетевого оборудования.

Постановка проблемы. Основой рациональной структуры для воздушных линий (ВЛ) является уровень стандартизации и унификации параметрического ряда сечений проводов, который отражает возможность использования типовых конструктивных решений при проектировании, типовых технологических процессов, типового оборудования при изготовлении и ремонте ВЛ.

Практика проектирования и строительства ВЛ приводит к расширению использования унифицированных (стандартизованных) элементов ВЛ. Эффективность унификации в наибольшей степени проявляется при системном подходе в организации проектирования и строительства ВЛ. Очевидно, что такой подход обеспечивает:

- сокращение сроков разработки и сооружения ВЛ за счет использования ограниченного числа опор, фундаментов, марок проводов, изоляции и арматуры;
- проведение качественного контроля надежности при их изготовлении;
- уменьшение ошибок персонала при строительстве и эксплуатации ВЛ;
- сокращение эксплуатационного запаса отдельных элементов ВЛ;
- снижение стоимости сооружения ВЛ за счет конкуренции между отдельными изготовителями элементов ВЛ [3].

Таким образом, чтобы выработать рекомендации по созданию научной платформы в направлении развития ВЛ, необходимо выявить целесообразное сокращение отдельных типоразмеров элементов, из которых она состоит. К таким элементам, прежде всего, следует отнести опоры и провода ВЛ. Задача по сокращению типоразмеров опор в определенной мере решена, а сечения проводов ВЛ нормируют по ПУЭ Украины [4], но отсутствует технико-экономическое обоснование выбора сечений проводов, что в условиях РДДБ является актуальным.

Цель статьи – показать одно из направлений развития ВЛ в условиях РДДБ за счет оптимизации параметрических рядов сечения проводов; сформировать критерий оптимальности параметрических рядов сечений проводов и предложить рекомендации по

унификации ВЛ.

Анализ публикаций. Как показывает анализ информационных источников, оптимизация электросетевого оборудования на принципах унификации, в том числе и параметрического ряда сечений проводов, является актуальной для мировой электроэнергетики.

Первые работы в этом направлении были проведены еще в 80-х годах прошлого столетия [5]. На современном этапе в стратегию развития электроэнергетики многих стран заложены принципы унификации. Так, в комплексную программу модернизации электроэнергетики России до 2030 года заложен принцип унификации и типизации, в том числе унификации ряда оборудования, технологических решений и комплектации [3]. Такой подход реализован и в ряде стран дальнего зарубежья. Он основан на сокращении числа марок выпускаемых проводов. В качестве базисного сечения для различных классов напряжения используют одно сечение, которое с учетом коэффициента нарастания шкалы удовлетворяет номенклатуре сечений по пропускной способности. Так, в Великобритании в линиях напряжением 132-275-400 кВ используют провода сечением АС 175 мм², АС 400 мм². В Германии для линий 110-220-400 кВ применяют одну марку сталеалюминиевого провода сечением АС 560/50 мм² (для ВЛ 220 – 400 кВ по два провода в фазе). В Италии для широкого применения рекомендуют только три сечения проводов для ВЛ 132-380 кВ – 128/21 мм², 265/43 мм², 520/66 мм². В Чехии в сетях 110 кВ и выше применяют три марки проводов АС 240 мм², АС 450 мм², АС 670 мм². Во Франции при сооружении ВЛ напряжением 225 – 400 кВ широко используют стандартное сечение провода 570 мм² [1 – 6].

Основные материалы исследования. При поиске оптимальных решений, которые обосновывают рациональную структуру и формируют параметрические ряды электросетевого оборудования, была проведена работа и получены рекомендации по унификации шкалы сечений проводов. В ее основу положено утверждение, что ВЛ имеет экономические интервалы мощности только в том случае, если выполняется ограничение, обеспечивающее различимость отдельных вариантов по их экономическому признаку. Условия существования экономических интервалов имеют вид:

$$\frac{r_i}{r_{i+1}} > 1, \quad \frac{K_{i+1}}{K_i} > 1, \quad \frac{K_i - K_{i-1}}{K_{i+1} - K_i} < \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}}, \quad (1)$$

где r_i – активное сопротивление i -го провода; K_i – инвестиционные вложения в i -ю линию.

Критерии (1) отражают только техническую сторону и определяют необходимые условия существования экономических интервалов мощности. Поскольку ВЛ – это объект технико-экономического характера, то необходимо выполнение определенных ограничений, отражающих экономические связи унифицированного объекта. К таким требованиям следует отнести условие различимости двух вариантов электропередачи, выполненных проводами различных сечений. Таким образом, если предположить, что существует экономический интервал i -го сечения, то должно выполняться условие равноэкономичности:

$$\frac{Z_{i+1}}{Z_i} \geq 1 + \varepsilon, \quad (2)$$

где Z_i – дисконтные затраты в ВЛ; ε – допустимая величина, определяющая зону равноэкономичности.

Условие (2) является не только необходимым, но и достаточным для i -го провода, невыполнение которого противоречит условию существования экономического интервала мощности с позиции равноэкономичности для i -го сечения (см. рис. 1).

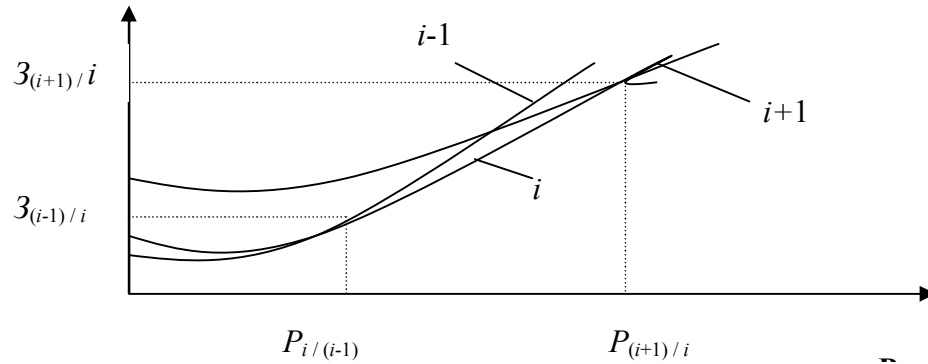


Рис. 1. Экономические интервалы мощности для проводов сечением F_i, F_{i+1}, F_{i-1}

Известно, что при анализе технико-экономических показателей ВЛ в условиях РДДБ одним из главных критериев оптимальных технико-экономических связей является минимум дисконтных затрат [5]:

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

В практике построения и реализации технико-экономических моделей не существует общепринятой концепции. В каждом конкретном случае построение расчетной модели и метод ее решения тесно взаимосвязаны. Кроме того, при решении общей проблемы оптимальности необходимо учитывать характер исходной информации, достоверность которой бывает низкой, что и приводит к неопределенности исходной информации [5 – 7].

Исходя из вышеизложенного, расчетную модель дисконтных затрат в 1 км ВЛ можно представить как

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

где Z_1 – инвестиционная составляющая технико-экономической модели ВЛ (инвестиционные вложения); Z_2 – техническая составляющая технико-экономической модели ВЛ (эксплуатационные расходы); 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·мм²); F – сечение провода, мм²; I – максимальный ток линии, А; ρ – удельное сопротивление проводникового материала, Ом·мм²/км; τ – время максимальных потерь, ч / год; β – удельная стоимость потерь электроэнергии, д. е. / (кВт·ч).

Инвестиционные вложения в условиях РДДБ включают в стоимость ВЛ стоимость земельного участка, а также выплаты по кредитам, амортизационные отчисления и учитывают инфляцию. Для разных классов напряжения в общем виде Z_1 можно представить как

$$Z_1 = \left(\frac{E_{ном} + 100}{\alpha + 100} - 1 \right) \left(1 + \left[\left(\frac{E_{ном} + 100}{\alpha + 100} \right)^{T_{сл}} - 1 \right]^{-1} \right) K_i, \quad (4)$$

где $E_{ном}$ – номинальная банковская ставка, %; α – темп инфляции; $T_{сл}$ – нормативный срок службы, год; K_i – стоимость 1 км ВЛ i -го класса напряжения с учетом стоимости земельного участка, д. е. /км [7].

Учитывая вышеизложенное, в точке $P_{\frac{i+1}{i}}$ значения дисконтных затрат в ВЛ, выполненную проводом i -го сечения, совпадают со значениями дисконтных затрат в ВЛ, выполненную $(i+1)$ сечением провода (см. рис. 1), правомерны следующие выражения:

$$\begin{aligned} z_{\frac{i+1}{i}} &= p_n \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{r_i - r_{i+1}}, \\ z_{\frac{i}{i-1}} &= p_n \frac{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i}{r_{i-1} - r_i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отношение выражений (5) представляет собой:

$$\frac{z_{\frac{i+1}{i}}}{z_{\frac{i}{i-1}}} = \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} = \text{idem}. \quad (6)$$

Выражение (6) используем в соотношении (2):

$$\frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} \geq 1 + \varepsilon \quad (7)$$

или

$$\frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \geq \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} (1 + \varepsilon). \quad (8)$$

Полученный критерий отражает не только техническую, но и экономическую основу построения унифицированных ВЛ.

Приведенные выше рассуждения могут быть использованы при отработке методов ограничений на основе уже существующей унификации. При этом следует помнить, что удовлетворение критериев ведет к наиболее правильному решению вопроса унификации ВЛ.

Условие различимости двух вариантов ВЛ, обусловленное границами равноэкономичности, в определенной мере зависит от шкалы тех сечений проводов, которыми выполнены эти линии. С другой стороны, если не учитывать ограничения по равноэкономичности, то два варианта выполненных смежными сечениями провода будут экономически равноценными, поскольку коэффициент нарастания такой шкалы неоправданно низок.

Обоснование решения подобного рода зависит от применяемого метода, математического аппарата, а также от характера и точности описания объекта. В условиях неполноты исходной информации при анализе электросетевых объектов необходимо использовать обобщающие методы, базирующиеся на основе теории подобия, математического программирования и моделирования. К одному из таких направлений относится и критериальный метод, разработанные алгоритмы которого позволяют количественно описать оптимальные технико-экономические связи объекта как при известной, так и неполной исходной информации.

В качестве инструмента исследований был применён данный метод, позволяющий в определённой мере обосновать параметрический ряд сечений проводов. Использована также математическая модель ВЛ, приемлемая для условий РДДБ, основное отличие которой заключается в изменении аналитической связи инвестиционных вложений в ВЛ и сечений провода. Задача сформулирована достаточно корректно с сохранением физической сущности объекта [5].

Таким образом, математическую модель дисконтных затрат в ВЛ можно представить как:

$$3 = 3_1 + 3_2 = (A-1) \left(1 + [A^{T_{ca}} - 1]^{-1} \right) K_{I10} + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}, \quad (9)$$

где $A = \frac{E_{ном} + 100}{\alpha + 100}$.

При определенной погрешности (9) можно представить одной общей моделью:

$$3 = A_1 F^{0,25} + A_2 F^{-1}, \quad (10)$$

Критериальный метод анализа обобщенной технико-экономической модели (10) показал, что в точке минимума

$$3_0 = \left(\frac{A_1}{\pi_1} \right)^{\pi_1} \left(\frac{A_2}{\pi_2} \right)^{\pi_2}, \quad (11)$$

где π_1 и π_2 – критерий подобия, $\pi_1=4/5$, $\pi_2=1/5$, которые могут быть получены из систематических процедур критериального метода [5].

Значение экономически целесообразных параметров функции (10) определяют из условия

$$F_0 = \left(\frac{\pi_1 A_2}{\pi_2 A_1} \right)^{0,8}. \quad (12)$$

Выполним следующие преобразования: введем обобщенную постоянную $A'_2 = A_2/p^2$ и запишем (11) в относительной форме при условии, что базисное значение обобщенных констант совпадает с действительным значением этих констант A_i , т. е. $A_i = A'_2 = 1$.

Тогда

$$3 = (A_1)^{\pi_1} (A_2 P^2)^{\pi_2} \quad (13)$$

или

$$3 = P^{0,4}. \quad (14)$$

Аналогично для (12)

$$F = \left(\frac{A \cdot P^2}{A} \right)^{0,8} \quad (15)$$

или

$$F = P^{1,6}. \quad (16)$$

Из (14) и (16) можно записать

$$F = 3^4. \quad (17)$$

В общем случае формирование допустимой области существования решения зависит от погрешности исходной информации δ , точность которой и определит значение ε . Результаты такой оценки :

$\delta, \%$	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8	± 9	± 10
F	1.14	1.28	1.45	1.56	1.66	1.77	1.89	2.05	2.20	2.60.

Таким образом, при обосновании коэффициента нарастания шкалы значительную роль играет погрешность эксплуатационных характеристик. Из практики известно, что точность инженерных расчетов составляет не менее 10%. Следовательно, наиболее приемлемый

коэффициент нарастания шкалы сечений проводов в этом случае должен быть не менее 2 – 2,5. Наиболее простой путь получить такой коэффициент нарастания – исключение промежуточных стандартных значений шкалы сечений проводов.

Ввиду того, что ЭС представляют сложную динамическую систему, вопрос унификации таких сетей в определенной степени должен решать и вопросы реконструкции. При этом вопрос унификации ВЛ в значительной степени влияет на срок реконструкции, под которым понимают время замены проводов одних сечений проводами больших сечений с целью увеличения пропускной способности ВЛ и улучшения качества электрической энергии [5, 6].

Покажем, что время реконструкции связано со шкалой сечений проводов, применяемой при сетевом строительстве. Известен закон изменения мощности в относительной форме.

$$P = P_0(1 + q)^t, \quad (18)$$

где q – среднее значение прироста нагрузки.

Воспользовавшись выражением (16) и (18), запишем

$$P(1 + q)^t = F^{0,625}. \quad (19)$$

Полученное выражение показывает, как быстро при заданном характере нагрузки происходит изменение относительного значения сечения провода. При этом если в качестве базисного сечения F_0 принять значение сечения провода, приходящееся на год строительства и ввода в эксплуатацию ВЛ, а в качестве последующего сечения взять сечение провода на период реконструкции ВЛ, то отношение

$$\frac{F_2}{F_0} = F \quad (20)$$

представляет собой не что иное как коэффициент нарастания шкалы сечений.

Пусть имеем две разные шкалы сечений, характеризующихся коэффициентами F_1 и F_2 .

Как в первом, так и во втором случае примем темпы роста нагрузки одинаковыми. Тогда согласно (20)

$$P(1 + q)^{t_1} = F^{0,625} \quad (21)$$

и

$$P(1 + q)^{t_2} = F^{0,625}. \quad (22)$$

Отношения (21) и (22) можно записать в виде

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\ln F_2}{n F_1} = idem. \quad (23)$$

В данном выражении время t определяет интервал от начала эксплуатации до первой реконструкции. Полученное выражение не зависит от темпов роста нагрузки и определяется только выбранной шкалой сечений проводов. Кроме того, из (22) и (23) можно определить время реконструкции, которое обусловлено пропускной способностью ВЛ и заданным темпом нагрузки q . При этом считаем, что $P_0 = 1$, так как относится к началу эксплуатации

ВЛ. Тогда

$$t_0 = 0,625 \frac{\ln F}{\ln(1 + q)}. \quad (24)$$

В результате расчета сроков реконструкции для шкал сечений проводов с коэффициентом $F_2 = 2$ получено среднее значение отношения времен, равное 2.

Таким образом, в качестве основы для унификации ВЛ необходимо использование унифицированной шкалы сечений, позволяющей свести к минимуму число реконструкций.

Полученные характеристики унификации шкалы сечений ВЛ научно обосновывают основу методики унификации. При этом из нескольких вариантов ВЛ необходимо выбрать такой, который удовлетворит условие экономической целесообразности выбираемого объекта с учетом надежности, ремонтпригодности, дополнительных инвестиционных вложений при реконструкции и т. д. Задача упрощается, если анализ всевозможных вариантов производить целенаправленно. Для этого необходимо выбрать базис. Например, в качестве базисной можно использовать ВЛ с сечением из унифицированной шкалы, которое наиболее часто встречается в существующих ВЛ.

Задача формирования базиса унификации сводится к исследованиям сечений проводов ВЛ в зависимости от климатических и нагрузочных характеристик. Рядом проектных институтов проведены исследования с целью получения относительных частот нагрузок ВЛ на основании статистической обработки. При этом полученные результаты показали, что наиболее приемлемым является коэффициент нарастания шкалы сечений проводов, близкий к 2 [5]. Приняв данную информацию за основу, было получено значение сечений проводов для разных классов напряжения.

Рассмотрим вышеизложенное на примере формирования шкалы сечений для ВЛ 110 кВ. Известно, что массовая электрификация страны происходила в 70-х годах прошлого столетия и критерии выбора оптимального варианта были несколько иными. Данный фактор был принят ко вниманию при формировании базового варианта для исследования. Шкала сечений построена из расчета, что $K_n \geq 2$ и используется одно сечение для заданного класса напряжения. Возможные оптимальные решения при такой постановке задачи приведены в таблице с учетом перераспределения длин ВЛ.

Таблица

Варианты распределения длин ВЛ сечением 70мм², 120мм², 240мм² и дисконтные затраты по вариантам

№ варианта исследования	Распределение длин ВЛ по сечениям, %			З, %
	70мм ²	120мм ²	240мм ²	
1 (базовый)	38	35	27	100
2	38	21	41	99,5
3	38	0	62	99,9
4	24	0	76	99,6
5	9	0	91	99,9
6	0	0	100	100
7	24	49	27	98,1
8	9	64	27	97,0
9	0	73	27	96,6
10	24	35	41	97,6
11	9	29	62	97,2
12	0	24	76	98,0
13	0	9	91	99,8
14	0	38	62	96,8
15	0	58	42	96,1
16	9	49	42	96,5
17	24	14	62	98,3
18	9	14	77	98,5

Из таблицы видно, что все варианты являются равноэкономичными, но с точки зрения реконструкции, увеличения пропускной способности ВЛ, снижения потерь электроэнергии и

повышения надежности ЭС вариант 6 является оптимальным, что соответствует [4]. Проведенные исследования технико-экономически обосновывают выбор сечений проводов в условиях РДДБ и могут быть использованы при разработке нормативной документации Украины.

Выводы. В статье показано одно из направлений развития ВЛ в условиях РДДБ за счет оптимизации параметрических рядов сечения проводов. Сформирован критерий оптимальности параметрических рядов сечений проводов и предложены рекомендации по унификации ВЛ, что позволит свести к минимуму число реконструкций, увеличить пропускную способность ВЛ, снизить потери электроэнергии и повысить надежность ЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон України про засади функціонування ринку електричної енергії України [Електронний ресурс // Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/663-18>.
2. Кириленко О. В. Балансуючий ринок електроенергії і його математична модель / О. В. Кириленко, І. В. Блінов, Є. В. Парус // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 36 – 43.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/aboutminen/energostategy/>.
4. Правила устройства электроустановок. // Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 704 с.
5. Будзко И. А. Унификация воздушных линий электропередачи / И. А. Будзко, Ю. Н. Астахов, Н. М. Черемисин // Электричество. – 1982. – № 2. – С. 1 – 11.
6. Файбисович Д. Л. Предложения по унификации сечений проводов воздушных линий напряжением 110 – 750 кВ / Д. Л. Файбисович // Энергетик. – 2003. – № 3. – С. 21 – 22.
7. Выбор приоритетного направления в проектировании воздушных линий электропередачи в условиях рыночных отношений / Н. М. Черемисин, В. В. Черкашина // Сборник трудов VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов”. – Россия. Благовещенск: АГУ – 2011. –Т.1.– С. 105 – 110.

Лежнюк Пётр Демьянович – д. т. н., проф., заведующий кафедрой электрических станций и систем.

Винницкий национальный технический университет.

Черемисин Николай Михайлович – к. т. н., профессор кафедры электроснабжения сельского хозяйства.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства.

Черкашина Вероника Викторовна – к. т. н., доцент кафедры передачи электрической энергии, cherk34@rambler.ru.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».