

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Первая электропередача большой (по тому времени) мощности была осуществлена русским ученым Доливо-Добровольским в 1891 г. Это была линия переменного трехфазного тока длиной 175 км на напряжение 35 кВ Лауфен-Франкфурт на Майне. Работы Доливо-Добровольского послужили одной из основ создания электрических сетей и систем переменного тока, на которых строится современная электрификация во всех странах мира. В процессе развития традиционных линий электропередач со временем осваивались линии все более высоких номинальных напряжений. В настоящее время находятся в эксплуатации воздушные и кабельные линии электропередачи напряжением от 0,38 до 1150 кВ. Общая протяженность линий электропередач в Украине составляет около 1 млн. км, значительная часть которых израсходовала свой жизненный ресурс и требует серьезной реконструкции и замены.

Неудовлетворительное состояние электрических сетей, особенно распределительных, является причиной заметного возрастания потерь электрической энергии и ухудшения ее качества, снижения уровня надежности электроснабжения и безопасности эксплуатации линий электропередач. Рыночные условия функционирования электроэнергетики требуют гарантированного высокого качества электроснабжения потребителей. В связи с этим следует ожидать в ближайшие годы резкого возрастания объема работ по замене, реконструкции и модернизации линий электропередач всех напряжений. Важное место при этом занимает решение задачи обоснованного выбора сечений проводов и жил кабелей с учетом современных условий. Задача выбора сечений, как показывает опыт, является наиболее массовой, поэтому недостаточная обоснованность и даже небольшие неточности могут приводить к существенным, неоправданным дополнительным затратам [1,2,4].

Правила устройства электроустановок [7] предписывают проводить выбор сечений проводов и сечений жил кабелей в сетях напряжением до 220 кВ включительно по экономическим соображениям в соответствии с нормами экономической плотности тока. Вместе с тем, в ряде публикаций, учебников и даже в руководящих документах [3,8, 9-11] предлагается выбор сечений проводить по допустимым токам исходя из нагрева проводов в нормальных режимах. Такие рекомендации не могут быть признаны правильными, так как в этом случае будет выбрано минимально возможное, а не экономическое сечение и при этом будут иметь место большие потери мощности. В табл.1 приведены кратности увеличения потерь мощности $\delta \Delta P$ (о.е.) линии по отношению к экономически обоснованной величине на примере воздушной линии алюминиевыми проводами при $j_{жк} = 1 \text{ А/мм}^2$ и $T_{жб} = 5000 \text{ ч}$.

Таблица 1

Кратности превышения потерь мощности					
Сечения, F , мм ²	35	50	70	95	120
$I_{дон}$, А	175	210	265	330	390
$\delta \Delta P$ (о.е.)	25,0	17,6	14,4	12,3	10,9

Как видно из табл. 1, выбор сечений проводов по условиям нагрева в нормальном режиме по сравнению с экономическим приведет к увеличению потерь в (11...25) раз, что противоречит современным требованиям по энергосбережению. Нормальный режим - это длительный режим, при котором обеспечивается выполнение требований по надежности и качеству электроэнергии при наиболее высоких экономических показателях. После того как сечение выбрано по экономическим условиям, необходима проверка по техническим условиям нагрева в нормальном режиме и в кратковременном послеаварийном и ремонтном режимах.

Самым простым считается метод выбора сечений по экономической плотности тока.

$$F = \frac{I_p}{j_{жк}}, \quad (1)$$

где F - экономическое сечение провода, жилы кабеля, мм²;

I_p - расчетное значение тока, А;

$j_{жк}$ - нормированное значение экономической плотности тока, А/мм².

Значения экономической плотности тока нормированы в зависимости от материала проводников и изоляции, а также от числа часов использования максимума нагрузки и приведены в ПУЭ [7].

Обладая предельной простотой, метод выбора сечений проводов и жил кабелей по экономической плотности тока имеет ряд серьезных недостатков:

- приведенные в [7] нормы были установлены еще в 50-х годах прошлого столетия и до сих пор не претерпели никаких изменений. К настоящему времени стоимостные соотношения (электрооборудования, стоимость электроэнергии) существенно изменились;
- шкала стандартных сечений носит дискретный характер. При определении сечений по $j_{жк}$ рассматривались затраты как непрерывная функция сечения проводов и это требует найденные экономические сечения округлять до стандартных сечений, т.е. метод не дает однозначных решений;
- предполагается прямолинейная зависимость стоимости сооружения одного километра линий от сечения. В действительности это не так, особенно при использовании унифицированных опор;
- приведенные затраты на покрытие потерь приняты одинаковыми для всех районов и уровней напряжения;
- нормы экономической плотности тока были установлены исходя из того количества цветного металла, которое государство могло ежегодно выделять для нужд строительства линий электропередачи. Учет дефицитности цветных металлов был связан с увеличением экономической плотности тока, что в свою очередь приводило к использованию меньших сечений, к увеличению потерь мощности в линиях. Такой подход противоречит положениям рыночных отношений и политике повсеместного ресурсо- и энергосбережения;
- предложенные единые значения экономической плотности тока действовали на всей территории СССР, утверждая принцип всеобщей уравниловки. Современная экономическая политика, в основу которой заложены требования рыночных отношений и требования ресурсо- и энергосбережения, вынуждают при проектировании линий электропередач учитывать индивидуальные условия в каждом конкретном случае. Ранее заложенные в метод экономической плотности тока принципы противоречат современным подходам.

Учитывая указанные недостатки, метод выбора сечений проводов и жил кабелей по нормированной экономической плотности тока ввиду несоответствия современным условиям и требованиям не может быть рекомендован для практического применения. Для выбора сечений в сетях выше 1000 В (6...220 кВ) следует использовать метод экономических интервалов, который практически свободен от всех перечисленных недостатков-метода нормированных плотностей тока.

В общем случае в основу формирования технико-экономической модели электросетевого объекта положен показатель экономической эффективности, такой как дисконтированные затраты. Каноническая формула дисконтированных затрат имеет вид (2):

$$Z = \sum_{t=1}^{T_c} (K_t + I_{\Sigma t} - K_{ликв}) \cdot (1 + E)^{-t}, \quad (2)$$

где T_c - время сооружения объекта;

T_o - время нормальной эксплуатации;

T_p - расчетный период, $T_p = T_c + T_o$;

$T_{ср}$ - срок службы оборудования;

K_t - капиталовложения в год t ;

$I_{\Sigma t}$ - суммарные эксплуатационные издержки в год t ;

E - норматив дисконтирования (приведения разновременных затрат); $K_{ликв}$ - ликвидационная стоимость демонтируемого оборудования.

Инвестиционный цикл сооружения и эксплуатации линии электропередачи приведен на рис.1.

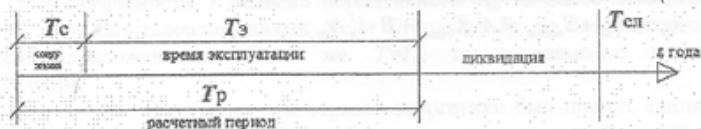


Рис. 1. Инвестиционный цикл ЛЭП

Сущность метода экономических интервалов заключается в анализе изменения затрат Z_i для произвольного сечения F_i в зависимости от тока I и базируется на следующих допущениях [4, 5, 6, 7]:

- линия электропередачи сооружается в течение первого года расчетного периода ($T_c = 1$ год) и единоразовые капиталовложения составляют $K_{от} = K_0$, после чего начинается ее нормальная эксплуатация в течение срока $T_э$ до момента окончания расчетного периода ($T_p = T_p - T_c$);
- ежегодные отчисления от капиталовложений на обслуживание $a_{обсл}$, ремонт и реновацию $a_{рем}$, а также цена электроэнергии C_0 в течение расчетного периода остается постоянной $a_{обсл} = const$, $a_{рем} = const$, $C_0 = const$;
- конфигурация графика нагрузки по линии в течение расчетного периода остается одинаковой ($T_{наб} = const$);
- ущерб от перерывов электроснабжения потребителей и качества электроэнергии в функции затрат не учитываются.

При принятых допущениях выражение составляющих суммарных дисконтированных затрат на сооружение и эксплуатацию 1 км линии будут иметь следующий вид:

Удельные затраты на сооружение:

$$Z_{соор.от} = K_{0бсл.л} \cdot (1+E)^{-1}. \quad (3)$$

Удельные затраты на обслуживание и ремонт за период эксплуатации до окончания расчетного периода:

$$Z_{обсл.от} = \sum_{t=2}^{T_p} K_{0т} \cdot (1+E)^{-t} = K_{0бсл.л} \cdot a_{обсл} \cdot D_{p,э}. \quad (4)$$

Удельные затраты на возмещение потерь электроэнергии при неизменной расчетной нагрузке за период эксплуатации $I_{рл} = I_p$

$$Z_{ном.от} = \sum_{t=2}^{T_p} C_0 \cdot \Delta W_{ит} \cdot (1+E)^{-t} = C_0 \cdot I_p^2 \cdot r_{от} \cdot 10^{-3} \cdot \tau \cdot D_{p,э}. \quad (5)$$

Удельные затраты, пропорциональные ликвидационной стоимости:

$$Z_{ликв.от} = K_{0бсл} \cdot (1 - a_{рем} T_э) \cdot (1+E)^{-T_p}, \quad (6)$$

где $D_{p,э} = \sum_{t=2}^{T_p} (1+E)^{-t}$ - условный дисконтированный период эксплуатации, имеющий размерность времени;

E - норма дисконта при анализе чувствительности оптимальных решений, на современном этапе диапазон изменений можно принять 0,05...1,5;

$K_{0бсл}$ - базовая стоимость сооружения линии.

Таким образом, выражение удельных дисконтированных затрат (на 1 км одноцепной линии) может быть представлено в следующем виде:

$$Z_{0т} = Z_{соор.от} + Z_{обсл.от} - Z_{ликв.от} + Z_{ном.от} = K_{0бсл.л} (1+E)^{-1} + K_{0бсл.л} \cdot K_{деф} \times \\ \times a_{обсл} \cdot D_{p,э} - K_{0бсл.л} \cdot (1 - a_{рем} T_э) \cdot (1+E)^{-T_p} + C_0 \cdot I_p^2 \cdot r_{от} \cdot 10^{-3} \cdot \tau \cdot D_{p,э}$$

Последнее выражение (7) можно записать в виде двух составляющих, первая из которых пропорциональна удельной стоимости сооружения линии, а вторая характеризует удельные

затраты на компенсацию потерь электроэнергии:

$$Z_{oi} = Z_{к.oi} + Z_{ном.oi} = A \cdot K_{обсч.i} + B \cdot I_p^2 \cdot r_{oi}. \tag{8}$$

где

$$A = \left[(1+E)^{-1} + a_{обсч} \cdot D_{p,з} - (1-a_{рем} T_z) \cdot (1+E)^{-T_p} \right]; \tag{9}$$

$$B = 3 \cdot C_0 \cdot \tau \cdot D_{p,з} \cdot 10^{-6}. \tag{10}$$

Выражение в квадратных скобках - это некоторый эквивалентный дисконтирующий множитель $D_{звс}$:

$$D_{звс} = (1+E)^{-1} + a_{обсч} \cdot D_{p,з} - (1-a_{рем} T_z) \cdot (1+E)^{-T_p} \tag{11}$$

Если $K_{oi0+1} > K_{oi}$ и $r_{oi+1} < r_{oi}$, то соответствующее этой точке значение граничного тока определяется из условия равенства затрат:

$$Z_{oi} = Z_{oi+1}. \tag{12}$$

Приравняв выражение затрат для сечения F_i и F_{i+1} , получаем:

$$A \cdot (K_{обсч.i+1} - K_{обсч.i}) = B \cdot (r_{oi} - r_{oi+1}) \cdot I_p^2. \tag{13}$$

Отсюда граничный ток для сечений F_i и F_{i+1} будет равен:

$$I_{p,грит,i+1} = \sqrt{\frac{A \cdot (K_{обсч.i+1} - K_{обсч.i})}{B \cdot (r_{oi} - r_{oi+1})}} = \sqrt{\frac{A}{B}} \cdot \sqrt{\frac{\delta K_{i+1,i}}{\delta r_{oi,i+1}}}. \tag{14}$$

Графическое представление экономических интервалов показано на рис. 2.

Применение методики учета фактора времени, используя формулу сложных процентов (дисконтирование), не вызывает каких-либо принципиальных возражений. Но оно не является необходимым в тех простых случаях, когда годовые издержки эксплуатации остаются неизменными в течение всего срока службы объекта, а дополнительные капиталовложения в объект не производятся, т.к. они вкладываются однократно в течение первого года. В этих случаях оценка экономичности вариантов методом окупаемости по величине полных затрат $Z = (E_n + P_a) \cdot K + И$ даст тот же результат, что и расчеты дисконтированных затрат, основанные на приведении суммы капитальных вложений и текущих затрат, приведенных к одному году [15]. Можно считать, что метод окупаемости или затрат в достаточной мере учитывает разновременность капитальных и текущих затрат [13].

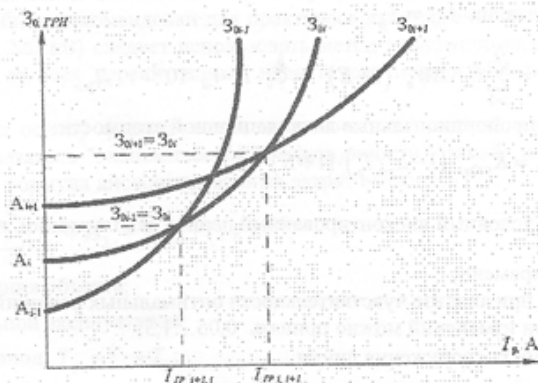


Рис. 2. Зависимость затрат от расчетного тока I_p для трех смежных сечений $F_{i-1} < F_i < F_{i+1}$

При этом следует иметь в виду, что при сопоставлении вариантов по суммарным затратам за весь срок службы объекта (дисконтировании) необходимо амортизационные отчисления исключить из состава текущих затрат. В то же время при использовании метода затрат амортизационные отчисления должны обязательно учитываться.

Нормативный срок окупаемости T_n определяет границу экономической целесообразности проведения капиталовложений. При этом возможны три случая, когда: $T < T_n$, $T > T_n$ и $T = T_n$. Если

фактический срок окупаемости T меньше нормативного T_n , то более экономичным считается вариант с большими капиталовложениями. Если T больше T_n , то более экономичным будет с меньшими капиталовложениями. Если же $T=T_n$, то сравниваемые варианты являются равноэкономичными.

В условиях плановой экономики для отрасли энергетики был принят единый нормативный срок окупаемости, равный 8 годам. Для технических средств новой техники (компьютеры, микропроцессорные приборы и др.) нормативный срок окупаемости принимался равным 3 годам. Обратная величина T_n носит название нормативного коэффициента сравнительной эффективности

$$E_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{8} = 0,12. \text{ В современной рыночной экономике нормативный срок окупаемости и}$$

соответственно нормативный коэффициент эффективности в зависимости от конкретных условий и требований инвестора величины T_n и E_n могут претерпеть изменения как в большую, так и в меньшую сторону.

Кроме приведенных затрат в Украине могут быть использованы и другие критерии экономической эффективности капиталовложений. Окончательное решение принимается на основе анализа результатов расчета одного или нескольких критериев в зависимости от характера решаемой проблемы [14]. К таким критериям относится интегральная дисконтированная прибыль, характеризующая превышение доходов над затратами. Рентабельность инвестиций – отношение прибыли к затратам. Период возвращения капитала – это время, за которое инвестиции возвращаются через доходы.

В качестве примера проведем расчет экономических интервалов кабельной линии 10 кВ с учетом и без учета дисконтирования. Кабельная линия длиной $l=1$ км типа ААШв проложена в траншее в условиях города при следующих исходных данных: $T_p=10$ лет, $T_c=1$ год, $T_n=3000$ час, $E=0,1$, $C_0=0,65$, $a_{обс}=0,008$ о.е./год.

Расчет с учетом дисконтирования

По формуле (5) определяем расчетный дисконтированный период эксплуатации за срок $T_p=10$ лет:

$$D_{рз} = \sum_{t=1}^{10} (1+0,1)^{-t} = \frac{1}{1,1^2} + \dots + \frac{1}{1,1^{10}} = 5,235 \text{ лет.}$$

Тогда эквивалентный дисконтирующий множитель по формуле (11) без учета ликвидной стоимости будет равным:

$$D_{экс} = A_z \cdot (1+0,1)^{-1} + 0,08 \cdot 5,235 = 0,952.$$

Находим число часов максимальных потерь:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_n}{10^4}\right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{3000}{10^4}\right)^2 \cdot 8760 = 1575 \text{ час.}$$

И с учетом τ определяем значение коэффициента B_z по формуле (10):

$$B_z = 3 \cdot 0,65 \cdot 1575 \cdot 5,235 \cdot 10^{-6} = 0,0162 \text{ тыс. грн./А}^2 \cdot \text{Ом.}$$

Находим граничные точки $I_{гр i,i+1}$ экономических интервалов по формуле (14) и значениям параметров КЛ (табл. 2).

Расчет по критерию затрат без учета дисконтирования

Выражение затрат на сооружение 1 км кабельной линии в этом случае имеет вид

$$Z = (E_n + P_a) \cdot K + 3 \cdot I^2 \cdot r \cdot C_0 \cdot \tau \cdot 10^{-6}, \quad (15)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности равный $E_n = 0,12$ о.е.;

P_a – отчисления на амортизацию $P_a = 0,063$ о.е.

Тогда формула для определения значения граничного тока $I_{гр i,i+1}$ будет:

$$I_{гр i,i+1} = \sqrt{\frac{E_n + P_a}{3 \cdot C_0 \cdot \tau \cdot 10^{-6}}} \cdot \sqrt{\frac{K_{i+1} - K_i}{r_{0i} - r_{0i+1}}} = D \sqrt{\frac{\delta K_{i,i+1}}{\delta r_{i,i+1}}}. \quad (16)$$

Результаты расчета приведены в табл. 3.

Анализируя расчетные значения экономических интервалов токов с учетом и без учета дисконтирования (табл. 2 и табл. 3) видим, что они практически совпадают. Это подтверждает предпосылку, что в случае однонаправленных капиталовложений в течение первого года строительства

линии электропередачи и постоянных издержек за срок эксплуатации расчеты могут проводиться по критерию затрат без учета дисконтирования.

Таблица 2

Параметры КЛ и экономические интервалы									
$F_i, \text{мм}^2$	35	50	70	95	120	150	185	240	Характеристика
$C_0, \text{тыс.грн.}$	38	44	51	62	71	89	103	125	Ассоциация («Промкабель»)
$r_0, \text{Ом/км}$	0,89	0,62	0,44	0,326	0,258	0,206	0,167	0,129	
$I_{\text{гр } i,i+1}, \text{А}$	0...36,1	36,1...47,8	47,8...75,3	75,3...88,2	88,2...142,6	142,6...144,9	144,9...182,0	182,0 и более	Экономические интервалы
$j_{\text{эк}}, \text{А/мм}^2$	1,03	1,03...0,96	0,96...1,08	1,08...0,93	0,93...1,19	1,19...0,96	0,96...0,98	0,98	Расчетная экономическая плотность тока

Таблица 3

Экономические интервалы и плотности тока									
$F_i, \text{мм}^2$	35	50	70	95	120	150	185	240	Характеристика
$I_{\text{гр } i,i+1}, \text{А}$	0...36,4	36,4...48,1	48,1...75,8	75,8...88,8	88,8...143,6	143,6...145,9	145,9...183,3	183,3 и более	Экономические интервалы
$j_{\text{эк}}, \text{А/мм}^2$	1,04	1,04...0,96	0,96...1,08	1,08...0,93	0,93...1,2	1,2...0,97	0,97...0,99	0,99 и более	Расчетная экономическая плотность тока

Полученные значения экономических плотностей тока (табл. 2 и табл. 3) в 1,5...1,7 раза ниже, чем значения нормированных экономических плотностей тока, приведенных в ПУЭ. Выбор сечения проводов и жил кабелей по экономическим интервалам позволит в 2...3 раза сократить потери активной мощности в линиях, способствуя решению задач энергосбережения.

Выводы

1. Экономически обоснованный выбор параметров линий электропередачи, прежде всего сечений проводов и жил кабелей, по своей значимости и массовости может быть отнесен к наиболее ответственным задачам. Недостаточное научное обоснование технико-экономической модели задачи и неадекватность модели реальным условиям может приводить к ощутимым погрешностям расчета и значительному ущербу.
2. Нормированные экономические плотности тока, приведенные в ПУЭ, не имеют достаточного научного и методического обоснования. Рекомендуемые значения плотности тока были установлены еще в 50-х годах прошлого столетия и исходные условия, принятые при расчетах, к настоящему времени существенно изменились. Поэтому использование нормированных значений плотности тока при выборе экономических сечений проводов и кабелей не может быть рекомендовано.
3. Метод экономических интервалов позволяет учитывать дискретность шкалы стандартных сечений проводов и жил кабелей и получать однозначные экономические решения. При этом представляется возможность использовать в расчетах не усредненные удельные показатели, а конкретные значения основных составляющих затрат ($K, C_0, T_{\text{м.т}}, E, P_a$ и др.). Метод дает возможность анализировать и получать более достоверные и экономически обоснованные решения индивидуально для каждого расчета и тем самым способствовать решению проблемы

- ресурсо- и энергосбережения в условиях рыночных отношений.
- Расчеты показывают, что значения плотностей тока, соответствующие полученным экономическим интервалам, в 1,5...1,7 раза ниже, чем нормированные по ПУЭ. Таким образом, выбор сечения проводов и жил кабелей по экономическим интервалам позволит сократить потери активной мощности в линиях электропередач напряжением 10...220 кВ в 2...3 раза.
 - Линии электропередачи в распределительных сетях обычно сооружаются при одноразовых капиталовложениях в течение одного года, а эксплуатационные издержки в течение срока эксплуатации принимаются неизменными. Поэтому выбор экономически оправданных сечений проводов и жил кабелей может проводиться по критерию затрат без учета их дисконтирования. Линии с экономическими сечениями при последующей эксплуатации дадут максимизацию прибыли независимо от форм собственности в отрасли.

Литература

- Блок В.М. Выбор оптимальных сечений кабеля с учетом экономических показателей.- Электрические станции. - 1945.- № 9 - 10. - С.8 - 12.
- Веников В.А., Астахов Ю.Н. Экономические интервалы для выбора оптимальных вариантов энергетических объектов и их применение при технико-экономических расчетах электропередач. - Известия АН СССР, Энергетика и автоматика. - 1962. - № 3. - С. 13- 19.
- Соловей О.І., Денисенко М.А. Методичні вказівки до виконання розділу дипломного проекту з спеціальності 7.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання». - К.:НТУУ (КП), 2007. - 82 с.
- Блок В.М. Выбор оптимальных сечений проводов и кабелей по кривым экономических интервалов. - Электричество. - 1975. - № 1. - С.78 - 80.
- Блок В.М. Электрические сети и системы. - М.: Высшая школа. - 1985. - 430с.
- Зуев Э.Н., Ефентьев С.Н. Задачи выбора экономически целесообразных сечений проводов и жил кабелей. - М.: Изд. МЭИ. - 2005. - 87 с.
- Правила устройства электроустановок. - М.: Энергосервис. - 2002. - 606 с.
- Инструкция по проектированию городских и поселковых электрических сетей. - ВС97-83.-М.: 1984.- 56 с.
- Інструкція з проектування електромереж 110-0,38 кВ м. Києва. - Київ: 2001. - 53 с.
- Федоров А.А., Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных предприятий. - М.: Энергия.- 1981.- 360 с.
- Федоров А.А., Старкова Л.Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. - М.: Энергоатомиздат. - 1987. - 235 с.
- Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ Под редакцией С.С. Рокотяна и Н.М. Шапиро. - М.: Энергоатомиздат. - 1985. - 350 с.
- Вааг Л.А., Захаров С.П. Методы экономической оценки в энергетике. - М.: ГЭИ. - 1962. - 272 с.
- Економіка підприємства // Навчальний посібник. - Київ: 2007. - 777 с.
- О технико-экономическом сравнении вариантов электроустановок при проектировании/ Мисриханов и др. - Электрические станции. - 2004. - № 2. - С. 2 - 8.