



УДК 621.31

А.А. Геркусов

АНАЛИЗ МЕТОДИК ДЛЯ ВЫБОРА СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.А. Gerkusov

ANALYSES OF TECHNIQUES TO CHOICE THE SECTION OF WIRES IN OVERHEAD POWER LINES

В работе рассмотрены применяемые методики выбора сечений проводов воздушных линий электропередачи и предложен метод выбора сечений проводов путем обобщения и модернизации экономических интервалов для любых сечений проводов и произвольных значений τ (годовое время максимальных потерь) с учетом потерь электроэнергии на корону и в линейной изоляции воздушной линии.

ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛИНИИ; ВРЕМЯ МАКСИМУМА ПОТЕРЬ; ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА КОРОНУ; ЛИНЕЙНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ; ОПТИМАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ТОКА; АКТИВНОЕ СЕЧЕНИЕ ПРОВОДОВ.

The paper considers techniques to choose the section of wires in overhead power lines and proposes the method of selecting the wire section by generalizing and modernizing economic intervals for any wire sections and arbitrary values τ allowing for power loss for the corona and the linear isolation of the overhead power line.

POWER LINE; ACTIVE LINE RESISTANCE; TIME OF MAX LOSSES; POWER LOSSES FOR CORONA; LINEAR ISOLATION; OPTIMAL CURRENT DENSITY; ACTIVE WIRE SECTION.

Одним из основных элементов электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем электроснабжения (СЭ) являются воздушные и кабельные линии электропередачи (ЛЭП), обеспечивающие транспорт электроэнергии от источников мощности до потребителей. Требования к ЛЭП все время возрастают, причем в первую очередь в отношении повышения надежности, увеличения пропускной способности и одновременно снижения потерь электроэнергии, уменьшения экологического влияния, сокращения полосы отчуждения. Сечение проводов — важнейший параметр линии электропередачи. С увеличением сечения проводов линии возрастают затраты на ее сооружение и отчисления от них. Одновременно уменьшаются потери электроэнергии и стоимость их за год. Выбор экономически обоснованных сечений проводов и длин воздушных линий электропередачи способствует повышению конкурентоспособности энергоснабжающих организаций и снижению издержек на транспорт электроэнергии.

Однако в практике проектирования продолжают использоваться методики, разработанные и установленные более пяти десятилетий назад. Они, естественно, не отражают ни изменившихся стоимостных показателей, ни новых подходов к обоснованию технических решений. Более того, сегодня среди проектировщиков электрических сетей отсутствует консолидированное и научно обоснованное решение относительно конкретно применяемой методики для выбора марки и сечения проводов вновь проектируемых ЛЭП.

Цель настоящей работы — анализ применяющихся в проектировании ЛЭП методик и выработка рекомендаций по внедрению в электросетевое строительство и проектирование разработанной автором методики по выбору сечений проводов и жил кабелей линий электропередач.

Методики выбора сечений проводов ВЛ. Применяемые в настоящее время при проектировании линий электропередачи методы выбора

сечений проводов воздушных линий (ВЛ) по экономической плотности тока или экономическим интервалам основаны на сопоставлении вариантов по критерию минимума приведенных затрат и могут быть использованы при рассмотрении вопроса развития межсистемных связей и основной сети, в частности межсистемных ЛЭП 220–500 кВ, а также других проблем, представляющих межрегиональный или общегосударственный интерес.

Выбор сечений проводов по экономической плотности тока. В основе методики определения сечения проводов по экономической плотности тока — положение о прямолинейности зависимости стоимости сооружения одного км линии от сечения провода, $K(F)$ [1–3]:

$$K(F) = k + k_F F, \quad (1)$$

где k — компонента $K(F)$, не зависящая от сечения провода F ; k_F — коэффициент, определяющий наклон зависимости $K(F) = f(F)$ по отношению к горизонтальной оси. Значение k_F определяется видом линии (воздушная или кабельная), ее номинальным напряжением U_n , значением коэффициента дефлятора, а в случае ВЛ еще и типом, а также материалом опор. Таким образом, k_F концентрирует в себе целую серию факторов, вследствие чего этот коэффициент является достаточно изменчивым показателем.

Кроме того, вводится допущение о равенстве активного r_0 и омического $r_{0\text{ом}}$ сопротивлений:

$$R_0 = r_{0\text{ом}} = \frac{\rho}{F}, \quad (2)$$

где $\rho = 30,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{км}$ — удельное сопротивление алюминия.

При этих двух допущениях выражение для приведенных затрат Z на воздушную линию, включающих в себя долю $(E_n + P_A)$ одновременных капитальных затрат K и ежегодные затраты на потери электроэнергии в линии, примет вид [3, 4]

$$Z = (E_n + P_A)K(F) + \frac{3I_{\text{ср кв}}^2 \rho \tau Z_{\text{эн}}}{F}, \quad (3)$$

где $P_A = 0,028$ — ежегодные отчисления от капитальных вложений на их амортизацию; $I_{\text{ср кв}}$ — расчетный ток в базисном режиме работы линии, А; τ — продолжительность максимальных потерь электроэнергии в линии за год, ч., определяемая по эмпирическому выражению

$$\tau = (0,124 + 10^{-4} T_{\text{нб}})^2 8760; \quad (4)$$

$Z_{\text{эн}}$ — удельные замыкающие затраты на электроэнергию в приемной энергосистеме, связанные с возмещением потерь в линии, коп/кВт·ч в расценках 1984 года [5].

Если условно принять, что F меняется непрерывно, то, подставляя значение $K(F)$ в формулу (3) и приравнявая к нулю производную dZ/dF , после преобразований получаем оптимальные значения F и $J_{\text{эк}}$:

$$\frac{I_{\text{ср кв}}}{F_{\text{опт}}} = J_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{(E_n + P_A)K_F 10^3}{3\rho\tau Z_{\text{эн}}}}. \quad (5)$$

Таким образом, получаются известные выражения для оптимальной (экономической) плотности тока, не зависящие от степени ограничения коронного разряда.

По формуле (5) определяют наивыгоднейшую плотность тока $J_{\text{эк}}$ в проводах ВЛ для различных классов номинального напряжения. Результаты проведенного на ЭВМ расчета $Z_{\text{эн}}$, τ , $J_{\text{эк}}$ сведены в табл. 1.

Из приведенных расчетов видно, что $J_{\text{эк}}$ относительно слабо зависит от номинального напряжения линии, климатических особенностей района и ряда других факторов, что и позволяет оценить значение $J_{\text{эк}}$ без учета зависимости конструктивной части линии от F .

Сильное влияние на $J_{\text{эк}}$ оказывают величины τ и $Z_{\text{эн}}$, причем $Z_{\text{эн}}$ существенно зависит от региона, в котором будет сооружаться новая линия [4].

Выбор сечений проводов методом экономических интервалов. Несмотря на достоинства, метод экономической плотности тока для выбора сечений проводов ВЛ обладает рядом недостатков. Наиболее существенные из них согласно [1, 9] следующие:

1. Стандартная шкала сечений проводов дискретна. При определении сечения по $J_{\text{эк}}$ чаще всего получается величина, лежащая между двумя стандартными значениями. Округление расчетного значения до ближайшего стандартного — в ряде случаев довольно сложная задача.

2. Выражение для экономической плотности получено в предположении линейной зависимости капитальных вложений в ВЛ от ее длины. Линейная зависимость нарушается при переходе к массовому строительству воздушных линий на унифицированных опорах.

Таблица № 1

Значения экономических плотностей тока

$T_{нб},$ ч	$\tau,$ ч	$Z_{эн}$ коп/кВт·ч	Экономическая плотность тока $J_{эк},$ А/мм ² для ВЛ 110–500 кВ, сооружаемых в I-м р-не гололедности на деревянных, стальных и железобетонных опорах					
			110; ст.	110; ж.б.	110; д.	220	330	500
3000	1575	3,25	0,915	0,919	0,796	0,673	0,689	0,712
4000	2405	2,56	0,834	0,838	0,725	0,614	0,628	0,649
5000	3411	2,21	0,753	0,757	0,656	0,555	0,567	0,586
6300	4980	1,91	0,671	0,674	0,584	0,494	0,505	0,522
7000	5948	1,84	0,626	0,628	0,544	0,46	0,471	0,486
7900	7318	1,81	0,569	0,571	0,495	0,419	0,428	0,442

3. При определении значений $J_{эк}$ не учтено влияние на выбор сечений проводов изменения передаваемой мощности с момента ввода линии в эксплуатацию до момента, когда нагрузка достигнет расчетного значения.

4. Методика выбора сечений проводов по экономической плотности тока $J_{эк}$ требует прогнозирования расчетных нагрузок по ВЛ-220 кВ с точностью до 60–100 А (при применяемой номенклатуре проводов с интервалом 30–100 мм²), что совершенно нереально.

5. Зависимость стоимости линий от сечения проводов принята одинаковой для линий всех номинальных напряжений и опор любой конструкции.

Метод выбора сечений проводов, свободный от указанных выше недостатков, получил название метода экономических интервалов.

Согласно этому методу для воздушных и кабельных линий разных напряжений и исполнений определяются приведенные затраты Z на единицу длины линии в зависимости от тока максимума нагрузки $I_{нб}$ для различных сечений:

$$Z = (E_n + P_a)K_0 + 3 I_{нб}^2 R_0 \tau Z_{эн}, \quad (6)$$

Поскольку оценка стоимости электроэнергии в сопоставляемых проектных вариантах по замыкающим затратам $Z_{эн}$ не адекватна новым экономическим отношениям [1, 2, 4], в выражении (6) вместо $Z_{эн}$ будем использовать средневзвешенный тариф $\Psi = 2,00$ руб/кВт·ч. E_n — коэффициент эффективности капиталовложений, значение которого при фиксированном токе нагрузки не оказывает существенного влияния на величину приведенных затрат. Так, например, при изменении E_n от 0,1 до 0,7 величина отклонения приведенных затрат Z составляет не более

0,6 %, что позволяет нам принять в качестве E_n какую-либо усредненную величину, не противоречащую проведенным в [3] расчетам простого срока окупаемости $T_{окп}$. Принимая, например, $E_n = 0,34$ год⁻¹, получаем $T_{окп} = 1/0,34 = 2,94$ года, что соответствует значениям $T_{окп}$, рассчитанным в [3]. Коэффициент дефлятора (средневзвешенное значение коэффициента пересчета цен 1984 года к ценам 2014 года) принимаем равным 100 [1].

Активные потери электроэнергии на корону и в линейной изоляции ВЛ 110–220 кВ составляют весьма значительную долю в общих технических потерях, достигающую в зависимости от нагрузки и номинального напряжения линии 28,8–54 % [7, 8]. В связи с этим предлагается в формуле (1) учитывать стоимость потерь электроэнергии, приходящихся на корону и изоляцию линии. Формула (1) с учетом потерь на корону и в линейной изоляции ВЛ примет вид

$$Z = (E_n + P_a)K_0 + 3 I_{нб}^2 R_0 \tau \Psi + 8760 \Delta P_{кор} \Psi + \frac{U_n^2 T_{вл} N_{гир}}{3 N_{из} R_{из}} \Psi. \quad (7)$$

где $\Delta P_{кор}$ — годовые потери активной мощности на корону кВт/км; $N_{из}$ — число изоляторов в фазе; $R_{из}$ — сопротивление изолятора в заданном районе СЗА; $T_{вл}$ — продолжительность в расчетном периоде влажной погоды, ч; $N_{гир}$ — число гирлянд изоляторов [7, 8].

Принимая, что одноцепная ВЛ-220 кВ сооружается на железобетонных опорах в I-м районе гололедности и III-м районе по СЗА в европейской части СНГ, построим экономические интервалы для сталеалюминевых проводов сечением 240–600 мм² при $T_{вл} = 1640$ ч/год и $\tau = 3411$ ч/год.

Таблица 2

Приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию ВЛ

Сечение провода F , мм ²	Удельные капиталовложения K_0 , тыс.руб./км	Расчетный ток линии $I_{ср}$ кВ, А	Приведенные затраты Z , тыс.руб./км
240	1653,3	300	527,344
		350	608,338
		400	701,794
		450	807,71
300	1743,9	300	491,158
		350	555,69
		400	630,16
400	1955,7	450	714,54
		300	476,557
		350	525,944
		400	582,929
500	2149,2	450	647,512
		500	719,693
		300	475,44
		400	560,537
600		450	612,204
		500	669,948
		600	803,673

Результаты расчетов представлены в табл. 2. По полученным в табл. 2 значениям $Z = f(I)$ строить серию пересекающихся параболических кривых (рис. 1). Точки их пересечения определяют значение тока при котором экономически целесообразен переход от одного сечения к другому. Нижняя ломанная кривая ($abcdF$) — это кривая минимальных приведенных затрат, т. е. соответствует наивыгоднейшим сечениям [9]. Аналогичные кривые могут быть получены также и для других районов гололедности и типов опор при варьированном значении τ .

Для выбора экономически целесообразного сечения провода достаточно отложить на оси абсцисс (см. рис. 1) значение расчетного тока $I_{расч}$ и визуально определить в какой из интервалов это значение попадает.

Значение наибольшего расчетного тока линии $I_{расч}$ в месте пересечения кривых определяется из равенства

$$Z_{л1} = Z_{л2} \tag{8}$$

где $Z_{л1}$ и $Z_{л2}$ — приведенные затраты для сравниваемых смежных сечений, зависящих от тока линии. Соответственно:

$$I_{расч} = \sqrt{\frac{(E_n + P_a)(K_{02} - K_{01})10^{-3}}{3\tau\Pi(R_{01} - R_{02})}}. \tag{9}$$

Таким образом, ток $I_{расч}$, вычисляемый по (9), есть функция полной совокупности выше рассмотренных экономических параметров: $E_n, P_a, K_{01}, K_{02}, \Pi$. Техническим параметрами, определяющими значение расчетного тока, в данном случае являются разность погонных активных сопротивлений для смежных сечений ($R_{0,1} - R_{0,2}$) и годовое число часов использования максимума нагрузки $T_{нб}$, от которого зависит время потерь τ .

Полученные области, расположенные между соответствующими кривыми, назовем обобщенными токовыми экономическими интервалами (токовыми универсальными номограммами).

Если выражение $\frac{(K_{02} - K_{01})}{(R_{01} - R_{02})}$ окажется отрицательным, то это означает, что кривые $Z_{л1} = f_1(I)$ и $Z_{л2} = f_2(I)$ не пересекаются, т. е. одно сечение всегда, при всех значениях максимального тока нагрузки более выгодно, чем другое.

Выбор сечений проводов методом универсальных номограмм. Поскольку величина и положение экономических интервалов (см. рис. 1) зависит от τ , то для выбора сечений проводов рассматриваемым методом необходимо для каждого нового значения τ строить новое семейство кривых $Z(I)$, что практически нереально. Так, например, в [5] (таблица 7.8) даже не указывается, для какого конкретного значения τ построены приведенные там экономические интервалы. В связи с этим предлагается: для каждого стандартного сечения провода по формуле (9) построить кривые $I_{расч} = f(\tau)$, каждая из которых представляет собой границу, разделяющую области применения проводов смежных сечений (рис. 2). Полученные области, расположенные между соответствующими кривыми, назовем обобщенными токовыми экономическими интервалами (токовыми универсальными номограммами).

Полученные таким образом токовые универсальные номограммы позволяют достоверно и для любого заданного τ выбирать оптимальное сечение проводов ВЛ.

Для выбора оптимального сечения проводов проектируемой ВЛ достаточно при заданных значениях максимальной токовой нагрузки $I_{нб}$ и времени максимальных потерь τ отложить по осям номограммы их значения и визуально определить

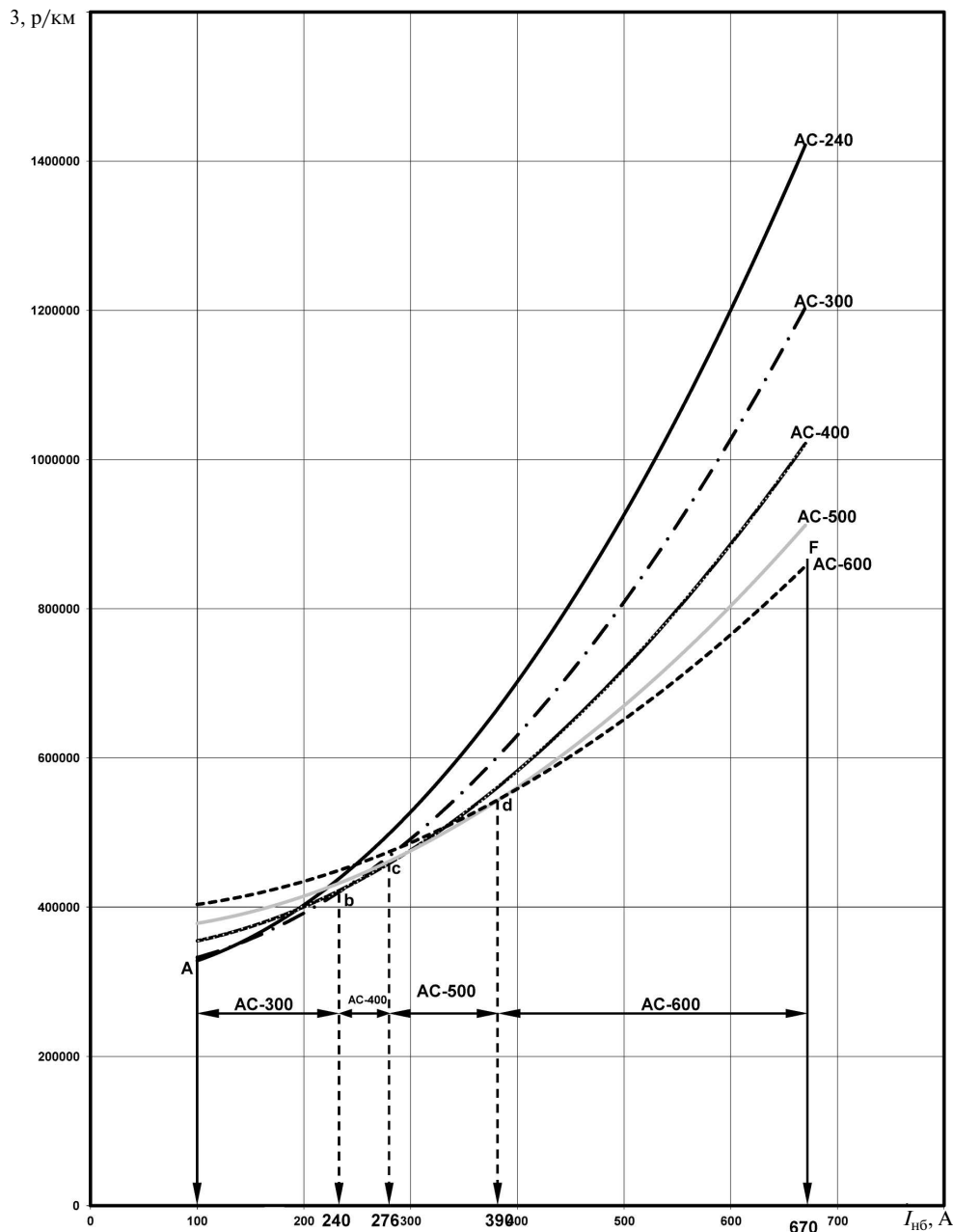


Рис. 1. Уточненные токовые экономические интервалы одноцепной ВЛ-220 кВ, сооружаемой на железобетонных опорах в I-м районе гололедности и III-м районе СЗА при $\tau = 3411$ ч.

в какую из областей попадает точка пересечения прямых, соответствующих отложенным на осях значениям этих параметров. Значение сечения, указанное внутри области, и будет оптимальным при заданных исходных условиях. Так, например, если $I_{н6} = 250$ А, а $\tau = 3500$ ч, то указанная точка (точка А на рис. 2) попадает в сектор, соответствующий сечению 400 мм^2 .

Сравним значения экономической плотности $J_{эк}$, полученные в настоящей работе по формуле (5), и значения $J_{опт}$, полученные путем деления начального и конечного значений расчетного тока $I_{рас}$ в пределах одного экономического интервала на соответствующее ему оптимальное сечение $F_{опт}$:

$$J_{опт} = \frac{I_{рас}}{F_{опт}} \quad (10)$$

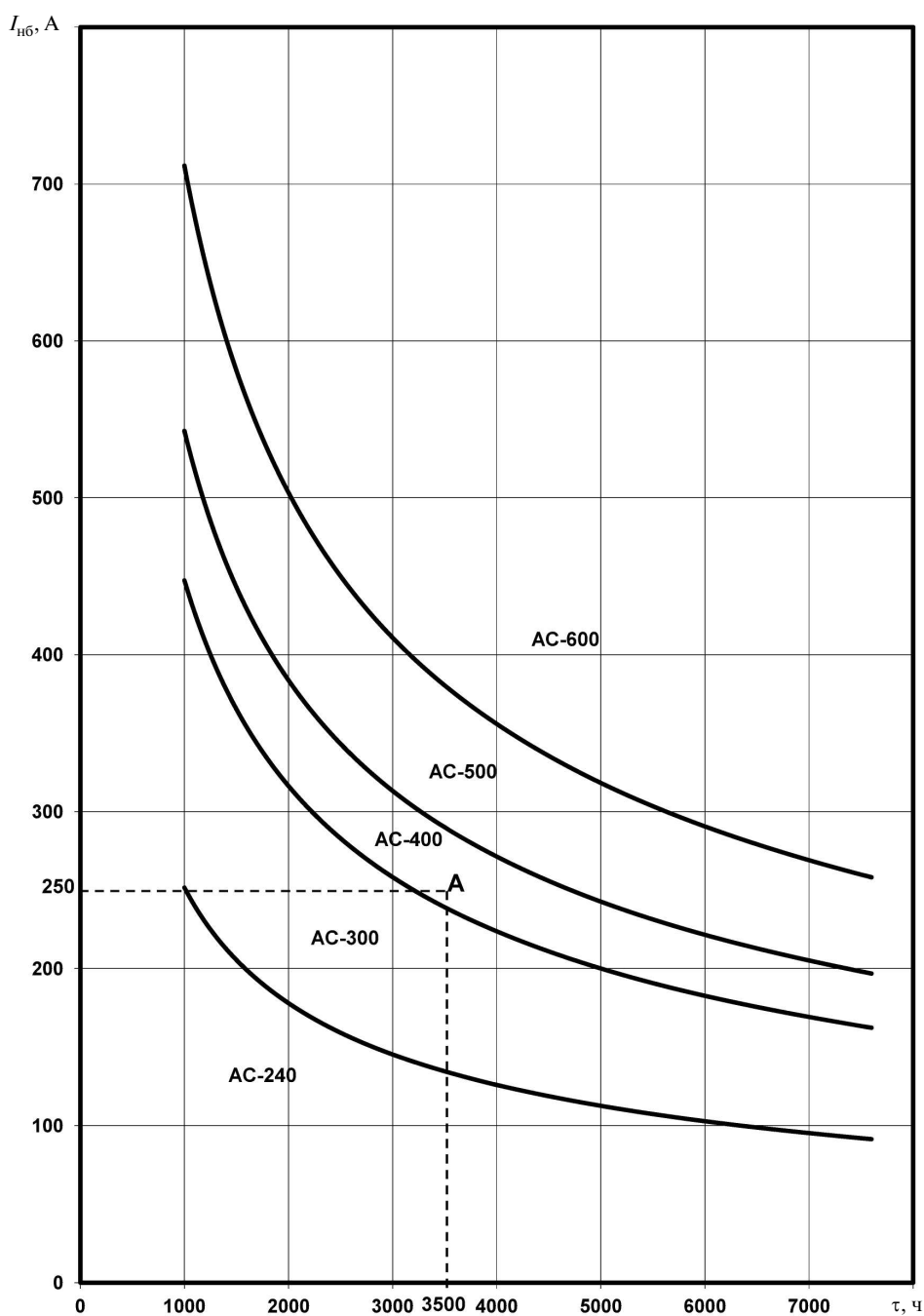


Рис. 2. Уточненные токовые универсальные номограммы для одноцепной ВЛ-220 кВ, сооружаемой на железобетонных опорах в I-м и II-м районах гололедности

Так для $\tau = 3411$ ч/год. $U_n = 220$ кВ; $\Pi = 2,00$ р/кВт·ч имеем:

- $J_{эк}$, полученное по (5) — 0,419–0,919 А/мм²
- $J_{опт}$, полученное по (10) — 0,416–1,0 А/мм²
- $J_{эк}$, устанавливаемое ПУЭ — 0,9–1,1 А/мм²

При современном соотношении тарифа на электроэнергию и удельных капиталовложений в ВЛ оба изложенных подхода к нормированию оптимальной плотности тока дают сходные результаты, но отличные от требований ПУЭ. Для

ВЛ с высокой плотностью графика нагрузки оптимальная плотность тока отличается от нормативной в 1,5–2 раза в меньшую сторону и близка к используемой в большинстве зарубежных стран. Подтверждается целесообразность значительного уменьшения оптимальной плотности тока в проводах проектируемых ВЛ 110–500 кВ.

Большой объем исходной информации и возможных пределов изменения влияющих параметров предопределяет значительный разброс предельных экономических токовых нагрузок, что в современных условиях требует внедрения в практику проектирования программного обес-

печения, позволяющего осуществить выбор сечения проводов на основе метода универсальных токовых номограмм для конкретного состава технико-экономических параметров линии.

Предложенная методика определения экономического сечения проводов, основанная на построении обобщенных экономических интервалов (токовые универсальные номограммы), позволяет для любого τ более достоверно выбирать оптимальное сечение проводов ВЛ 220–500 кВ. Помимо удобства в работе, эта методика имеет еще одно достоинство: она может быть использована при любой ценовой политике в области тарифов на электроэнергию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев Э.Н., Ефентьев С.Н. Задачи выбора экономически целесообразных сечений проводов и жил кабелей М.: Изд-во МЭИ, 2005. 86 с.
2. Зуев Э.Н. К вопросу об экономической плотности тока в современных условиях // Электро. 2000. № 1. С. 44–47.
3. Повышение эффективности электрических сетей 110–1150 кВ / Под ред. Н.Н. Тиходеева. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Федотов А.И., Геркусов А.А., Абдуллазянов Э.Ю. Экономические основы выбора сечений проводов и кабелей в рыночных условиях // Проблемы энергетики. 2001. № 8–9. С. 67–82.
5. Справочник по проектированию электроэнергетических систем // Под ред. С.С. Рокотьяна и М.Н. Шапиро. М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Федотов А.И., Геркусов А.А. Проблема энергосбережения при выборе сечений проводов воздушных линий 110–500 кВ // Проблемы энергетики. 2000. № 11–12. С. 54–61.
7. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. 277 с.
8. Афанасьев Д.А., Зарудский Д.К. К методике оценки потерь активной мощности на корону на воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения // Электро. 2001. № 1. С. 11–13.
9. Блок В.М. Электрические сети и системы: Учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1986. 430 с.
10. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985. 630 с.

REFERENCES

1. Zuyev E.N., Yefentyev S.N. Zadachi vybora ekonomicheskimi tselesoobraznykh secheniy provodov i zhil kabeley M.: Izd-vo MEI, 2005. 86 s. (rus.)
2. Zuyev E.N. K voprosu ob ekonomicheskoy plotnosti toka v sovremennykh usloviyakh. *Elektro*. 2000. № 1. S. 44–47. (rus.)
3. Povysheniye effektivnosti elektricheskikh setey 110–1150 kV / Pod red. N.N. Tikhodeyeva. L.: Energoatomizdat, 1990 g. (rus.)
4. Fedotov A.I., Gerkusov A.A., Abdullazyanov E.Yu. Ekonomicheskiye osnovy vybora secheniy provodov i kabeley v rynochnykh usloviyakh. *Problemy energetiki*. 2001. № 8–9. С. 67–82. (rus.)
5. Spravochnik po proyektirovaniyu elektroenergeticheskikh system / Pod red. S.S. Rokotyana i M.N. Shapiro. M.: Energoatomizdat, 1985. (rus.)
6. Fedotov A.I., Gerkusov A.A. Problema energosberazheniya pri vybore secheniy provodov vozdushnykh liniy 110–500 kV. *Problemy energetiki*. 2000. № 11–12. С. 54–61. (rus.)
7. Zhelezko Yu.S., Artemyev A.V., Savchenko O.V. Raschet, analiz i normirovaniye poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh. M.: Izd-vo NTs ENAS, 2005. 277 s. (rus.)
8. Afanasyev D.A., Zarudskiy D.K. K metodike otsenki poter aktivnoy moshchnosti na koronu na vozdushnykh liniyakh elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya. *Elektro* 2001. № 1. S. 11–13. (rus.)
9. Blok V.M. Elektricheskkiye seti i sistemy” Uchebnoye posobiye dlya studentov elektroenergeticheskikh spetsialnostey vuzov. M.: Vysshaya shkola, 1986. 430 s. (rus.)
10. Pravila ustroystva elektroustanovok. 6-ye izdaniye. M.: Energoatomizdat, 1985. 630 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ГЕРКУСОВ Алексей Анатольевич — кандидат технических наук электромеханик Октябрьской железной дороги. 191040, Санкт-Петербург, Транспортный переулок, д. 2. E-mail: Gerkusov_Alex@mail.ru

AUTHOR

GERKUSOV Aleksei A. — Russian Railways. 191040, Sankt-Peterburg, Transportnyi pereulok, d. 2. E-mail: Gerkusov_Alex@mail.ru