

# Влияние числа проводов в фазе на потери электроэнергии от короны в воздушных линиях переменного тока<sup>1</sup>

ТАМАЗОВ А.И., КОЧЕНКОВ П.С.

Рассмотрен вопрос о влиянии числа проводов в фазе линий электропередачи на уровень потерь от короны. С использованием методики расчета потерь на корону по индексу погоды Энергетического института им. Г.М.Кржижановского (ЭНИИ) показано, что при увеличении числа проводов в фазе эффект уменьшения потерь на корону снижается. Отмечено, что оценка влияния числа проводов в фазе на потери от короны по методике ЭНИИ совпадает с теоретическими и экспериментальными данными США и Франции и расходится с результатами расчета по кривым «Руководящих указаний по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330—750 кВ и постоянного тока 800—1500 кВ» (РУ-75). Использование РУ-75 при проектировании ВЛ СВН уже привело к повышению потерь на корону в ВЛ 750 кВ с пятью проводами в фазе в 2,5 раза, а ранее — к невозможности эксплуатации ВЛ 1150 кВ при номинальном напряжении из-за мощной короны на проводах ВЛ и шинах ОРУ. В связи с этим предложено отказаться при проектировании ВЛ и ОРУ от применения давно устаревших и дающих ошибочные результаты РУ-75 с заменой их вероятностной методикой расчета потерь на корону ЭНИИ.

Ключевые слова: линии электропередачи, фаза, число проводов, потери на корону

Оценить влияние числа проводов на потери от короны можно, используя те методики расчёта потерь на корону, которые были разработаны за рубежом и у нас к концу семидесятых годов прошлого столетия [1–4]. Если особых противоречий между методиками [1 и 2] и методикой [3] не было, то методика [4] значительно занижает значение среднегодовых потерь на корону. Методика [4] основана на обобщении данных измерений потерь от короны на опытных пролётах в виде  $P/nr^2$  ( $P$  — потери на корону;  $n$  — число проводов в фазе;  $r$  — радиус провода), предложенном в самом начале работ по исследованию потерь от короны на проводах линий электропередачи в стране [5]. Последующие теоретические и лабораторные исследования, многолетние непрерывные измерения потерь на корону в действующих трёхфазных воздушных линиях (ВЛ) переменного тока, проводившиеся под руководством академика В.И. Попкова, позволили уже к концу семидесятых годов разработать отражающую действительность вероятностную методику расчёта потерь на корону, базирующуюся на анализе движения ионов в поле коронного разряда и экспериментальной оценке влияния погодных условий на критические напряжения [6]. Сравнение результатов расчёта по этой методике с данными измерений как удельных, так и полных потерь на корону [7] показало, что вероятностная методика ЭНИИ обеспечивает высокую степень достоверности результатов расчёта. Поэтому именно она должна использоваться для оценки значения потерь от короны на проводах как эксплуатируемых, так и проектируемых ВЛ.

Методика [4] противоречит данным опыта. Применение [4] приводит к тому, что проектируются и строятся неэффективные линии с повышенными потерями энергии как в проводах, так и на корону, поскольку она занижает расчётные среднегодовые потери на корону тем больше, чем больше число проводов в фазе. В связи с этим представляется целесообразным показать, как это число влияет на потери от короны. Для упрощения решения задачи воспользуемся аппроксимацией формул расчёта потерь на корону при  $i$ -м типе погоды  $P_i$  по методике [7]:

$$P_i = b_{pi} U_{\text{с}}^{2\frac{\alpha}{\epsilon}} a_{i1}^* + \frac{a_{i2}^*}{X} + \frac{a_{i3}^* \frac{\delta}{\epsilon}}{X^2 \frac{\delta}{\epsilon}} \quad (1)$$

где  $b_{pi}$  — коэффициент наклона редуцированной характеристики потерь мощности общей короны  $P_i/U = f(U)$ ;  $U$  — амплитуда фазного напряжения линии;  $a_{i1}$ ,  $a_{i2}$ ,  $a_{i3}$  со звёздочкой и без неё — коэффициенты;  $X = U_{0П}/U$ ;  $U_{0П}$  — начальное напряжение короны (по Ф. Пику);

$$U_{0П} = \frac{2\pi n r_{\text{п}} (0,8 + 0,2 k_{\text{н}})}{C k_{\text{н}}} 10^6 \frac{\alpha}{\epsilon} d^{\frac{\delta}{\epsilon}} \left( 1 + \frac{0,03 \frac{\delta}{\epsilon}}{\sqrt{r_{\text{п}} d^{\frac{\delta}{\epsilon}}}} \right)$$

Здесь  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;  $n$  — число проводов в фазе ВЛ;  $C$  — средняя рабочая ёмкость фазы ВЛ, Ф/м;  $k_{\text{н}}$  — коэффициент неравномерности поля;  $r_{\text{п}}$  — радиус провода ( $r_{\text{п}} < 0,01$  м);  $d$  — относительная плотность воздуха.

Расчёты показывают, что на линиях одного напряжения при  $n > 2$ , заданном шаге расщепления и некоторой вариации радиуса проводов коэффици-

<sup>1</sup> В порядке обсуждения. *Ред.*

ент  $b_p$  можно считать практически не зависящим от числа проводов в фазе. Тогда для  $i$ -го вида погоды соотношение (1) будет иметь вид

$$P_i = a_{i1} + \frac{a_{i2}}{X} + \frac{a_{i3}}{X^2} \quad (2)$$

и среднегодовые потери электроэнергии на корону  $A_{сг}$ , определяемые как сумма потерь при разных видах погоды с учётом (2) и продолжительности каждого вида погоды  $T_i$ , будут равны

$$A_{сг} = \sum_1^x T_i a_{i1} + \frac{a_{i2}}{X} + \frac{a_{i3}}{X^2} = a_1 + \frac{a_2}{X} + \frac{a_3}{X^2}, \quad (3)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – постоянные коэффициенты.

В развёрнутом виде формулу (3) можно переписать в виде ( $r_{п} < 0,01$  м):

$$A_{сг} = a_1 + \frac{a_2 U}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}} 10^6 + \frac{0,03}{\sqrt{r_{п} d}} (r_{п} d)} + \frac{a_3 U^2}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}} 10^6 + \frac{0,03}{\sqrt{r_{п} d}} (r_{п} d)^2}. \quad (4)$$

Для  $r_{п} > 0,01$  м согласно Г.Н. Александрову вместо множителя  $\Phi$ . Пика следует под-

ставлять множитель:  $2,4 \left(1 + \frac{0,108}{(r_{п} d)^{0,38}}\right)$

Из (4) видно, что при заданном напряжении потери электроэнергии  $A_{сг}$  зависят от  $n, U, r_{п}$  и  $d$ .

Так как ёмкость  $C$  и выражение  $1 + \frac{0,108}{(r_{п} d)^{0,38}}$  уве-

личением радиуса применяемых на ВЛ проводов сечением от 300 до 800 мм<sup>2</sup> изменяются относительно среднего значения незначительно (2,5 и 3%), то зависимость потерь на корону можно записать в функции  $r_{п} d$ :

$$A_{сг} = a_1 + \frac{b_2 U}{r_{п} d} + \frac{b_3 U^2}{(r_{п} d)^2}. \quad (5)$$

Выражение (4) можно упрощенно представить также как

$$A_{сг} = a_1 + \frac{b_2^* U}{nr_{п} d} + \frac{b_3^* U^2}{(nr_{п} d)^2}, \quad (6)$$

где

$$b_2^* = \sum_1^x T_i \frac{a_{i2}}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}} 10^6 + 3,68} = \frac{\sum_1^x T_i a_{i2}}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}} 10^6 + 3,68};$$

$$b_3^* = \sum_1^x T_i \frac{a_{i3}}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}} 10^6 + 3,68} = \frac{\sum_1^x T_i a_{i3}}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}} 10^6 + 3,68}.$$

Если рассматривать две линии одного и того же напряжения, причём число проводов нового варианта  $n_{и}$  и коэффициенты  $b_2$  и  $b_3$  старого варианта известны, то отношения коэффициентов будут равны:

$$\frac{b_2^*}{b_2} = \frac{\frac{2\pi n_{и}(0,8 + 0,2k_{н_{и}})}{C_{и} k_{н_{и}}}}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}}} = \frac{n_{и}(0,8 + 0,2k_{н_{и}})Ck_{н}}{(0,8 + 0,2k_{н})C_{и} k_{н_{и}}}. \quad (8)$$

$$\frac{b_3^*}{b_3} = \frac{\frac{2\pi n_{и}(0,8 + 0,2k_{н_{и}})}{C_{и} k_{н_{и}}}}{\frac{2\pi n(0,8 + 0,2k_{н})}{Ck_{н}}} = \frac{n_{и}(0,8 + 0,2k_{н_{и}})Ck_{н}}{(0,8 + 0,2k_{н})C_{и} k_{н_{и}}}. \quad (9)$$

Таким образом, зная коэффициенты  $b_2$  и  $b_3$ , можно определить  $b_2^*$  путём умножения  $b_2$  на  $n_{и}$  и

коэффициент  $z = \frac{(0,8 + 0,2k_{н_{и}})Ck_{н}}{(0,8 + 0,2k_{н})C_{и} k_{н_{и}}}$ , а  $b_3^*$  — умно-

жая  $b_3$  на  $n_{и}^2$  и квадрат того же коэффициента.

Пусть фаза состоит из  $n$  проводов радиусом  $r_{п}$  при шаге расщепления  $a$ , подвешенных на высоте  $H$ .

Тогда ёмкость фазы будет равна  $C = 2\pi\epsilon / \ln \frac{2H}{r_{эп}}$  ( $r_{эп}$  — эквивалентный радиус пучка проводов) и

$$z = \frac{\frac{(0,8 + 0,2k_{н_{и}}) \ln \frac{2H}{r_{эп_{и}}}}{k_{н_{и}}}}{\frac{(0,8 + 0,2k_{н}) \ln \frac{2H}{r_{эп}}}{k_{н}}} = \frac{k_{и}}{k}, \quad (10)$$

где  $k = \frac{(0,8 + 0,2k_{н}) \ln \frac{2H}{r_{эп}}}{k_{н}}$ .

В табл. 1 представлены значения  $k$  и  $k_n / k_{n+1}$  в зависимости от  $n$  для двух предельных радиусов

провода, определяющих диапазон применяемых в ВЛ сечений, при  $a = 0,4$  м и  $H = 18$  м.

Таблица 1

Число проводов в фазе $n$	Расчётные значения		
	$k$		$k_n / k_{n+1}$
	$r_{\Pi} = 0,01$ м	$r_{\Pi} = 0,015$ м	
3	5,37	5,09	1,095
4	4,93	4,63	1,070
5	4,62	4,36	1,050
6	4,39	4,15	1,045
7	4,20	3,97	1,037
8	4,05	3,83	1,035
9	3,91	3,70	1,029
10	3,80	3,59	—

Значения  $k_n / k_{n+1}$  даны одной строкой, так как они практически не зависят от  $r_{\Pi}$ . Расчёты коэффициентов  $k = f(n)$  проводились также для одиночной фазы при  $H = 9$  м и для фазы трёхфазной линии. Во всех случаях отношения  $k_n / k_{n+1}$  оказывались практически такими же, как и в табл. 1.

По табл. 1 при переходе от  $n = 3$  к  $n = 4$  коэффициент второго слагаемого  $b_2 n_{ii}$  надо увеличить в  $k_n / k_{n+1} = 5,09/4,65 = 1,1$  раза, третьего  $b_3 n_{ii}^2$  — в  $1,1^2 = 1,21$  раза. При 750 кВ и переходе от  $n = 5$  к  $n = 6$  коэффициент второго слагаемого надо увеличить в  $k_n / k_{n+1} = 4,36/4,15 = 1,05$  раза, а третьего — в  $1,05^2 = 1,1$  раза.

Так как формула расчёта потерь на корону для ВЛ 500 кВ с  $n = 3$  для средних по России метеорологических условий имеет вид [8]:

$$A_{\text{Рос}3}^{500} = 6,3 \cdot 13,3 \cdot \frac{0,54}{r_{\Pi} d} + \frac{0,00846}{r_{\Pi}^2 d^2} \quad (11)$$

то для ВЛ 500 кВ с  $n = 4$  проводами получим

$$A_{\text{Рос}4}^{500} = 6,3 \cdot 13,3 \cdot \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 0,54}{4 r_{\Pi} d} + \frac{9 \cdot 1,2 \cdot 0,00846}{16 r_{\Pi}^2 d^2} = 6,3 \cdot 13,3 \cdot \frac{0,446}{r_{\Pi} d} + \frac{0,00572}{r_{\Pi}^2 d^2} \quad (12)$$

Формула расчёта потерь на корону для ВЛ 750 кВ с  $n = 5$  имеет вид [8]:

$$A_{\text{Рос}5}^{750} = 12,4 \cdot 13,3 \cdot \frac{0,54}{r_{\Pi} d} + \frac{0,00846}{r_{\Pi}^2 d^2} \quad (13)$$

тогда для  $n = 6$

$$A_{\text{Рос}6}^{750} = 12,4 \cdot 13,3 \cdot \frac{5 \cdot 1,05 \cdot 0,54}{6 r_{\Pi} d} + \frac{25 \cdot 1,1 \cdot 0,00846}{36 r_{\Pi}^2 d^2} = 12,4 \cdot 13,3 \cdot \frac{0,473}{r_{\Pi} d} + \frac{0,00646}{r_{\Pi}^2 d^2} \quad (14)$$

Если принять  $r_{\Pi} d = 0,011$  м, можно получить: для ВЛ 500 кВ  $n = 3$   $A_{\text{Рос}3} = 215$  кВт·ж/м;  $n = 4$   $A_{\text{Рос}4} = 126$  кВт·ж/м; для ВЛ 750 кВ  $n = 5$   $A_{\text{Рос}5} = 423$  кВт·ж/м;  $n = 6$   $A_{\text{Рос}6} = 294$  кВт·ж/м;  $n = 4$   $A_{\text{Рос}4} = 641,5$  кВт·ж/м.

Если  $r_{\Pi} d = 0,015$  м, то для 750 кВ  $n = 5$   $A_{\text{Рос}5} = 184,8$  кВт·ж/м,  $n = 4$   $A_{\text{Рос}4} = 281,5$  кВт·ж/м.

Следовательно, увеличение числа проводов в фазе на единицу даёт уменьшение потерь электроэнергии ВЛ 500 кВ в  $215/126 = 1,7$  раза, а ВЛ 750 кВ в  $423/294 = 1,44$  раза для  $r_{\Pi} d = 0,011$  м, а для  $r_{\Pi} d = 0,015$  м в 1,52 раза. Согласно данным [2] для диаметра провода 23,3 мм увеличение числа проводов в фазе с 3 до 4 (500 кВ) приводит к снижению потерь в 1,8 раза, а с 5 до 6 проводов (750 кВ) — в 1,43 раза, что согласуется с результатами расчёта, приведенными ранее.

Если рассчитать значения  $A_{\text{Рос}}$  для ВЛ 750 кВ при  $n = 5$  по (13) и  $n = 6$  по (14) — табл.2, то отношение  $A_{\text{Рос}5} / A_{\text{Рос}6}$  в среднем будет равно 1,435 с наибольшим отклонением в 1%. Таким образом, формулу (14) можно заменить соотношением (13) при использовании коэффициента  $k_U = 12,4/1,435 = 8,64$  вместо 12,4.

Таблица 2

Значение $r_{\Pi} d$ , м	Расчетные значения		
	$A_{\text{Рос}5}/12,4$	$A_{\text{Рос}6}/12,4$	Отношение $A_{\text{Рос}5} / A_{\text{Рос}6}$
0,010	43,9	30,6	1,43
0,011	34,1	23,7	1,44
0,012	27,05	18,7	1,45
0,013	21,8	15,1	1,44
0,014	17,9	12,5	1,43
0,015	14,9	10,5	1,42

Результаты аналогичных расчётов для ВЛ 500 кВ с  $n = 3$  и  $n = 4$  даны в табл. 3.

Таблица 3

Значение $r_{\Pi} d$ , м	Расчетные значения		
	$A_{\text{Рос}3}/6,3$	$A_{\text{Рос}4}/6,3$	Отношение $A_{\text{Рос}3} / A_{\text{Рос}4}$
0,010	43,9	25,9	1,69

0,011	34,1	20,0	1,71
0,012	27,05	15,86	1,71
0,013	21,8	12,84	1,70
0,014	17,9	10,63	1,68
0,015	14,9	8,99	1,66

Из табл. 3 следует, что отношение  $A_{Poc3} / A_{Poc4}$  в среднем равно 1,69 с наибольшим отклонением 1,8%. Поэтому формулу (12) можно заменить формулой (11) с коэффициентом  $k_U = 6,3/1,69 = 3,73$ .

Форма зависимости

$$A_{Poc}^U = k_U C_e^{13,3} \frac{0,54}{r_{II} d} + \frac{0,00846}{r_{II}^2 d^2} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \quad (15)$$

позволяет судить о соотношении потерь на корону в линиях при изменении числа проводов в фазе для заданной средней по России метеорологической обстановки. Чтобы рассчитывать потери на корону в различных метеорологических условиях при разном числе проводов, на рис. 1 представлены зависимости масштабированных потерь на корону  $A/k_U$  от индекса погоды  $T_{идм}/T_{хпв}$  ( $T_{идм}$  – суммарная продолжительность изморози, дождя и мокрого снега,  $T_{хпв}$  – суммарная продолжительность хорошей погоды и погоды с повышенной влажностью воздуха), построенные по кривым рис. 2 из [8]. При этом коэффициенты перехода от одной конструкции к другой можно определить по табл. 4.

Таблица 4

Напряжение, кВ	Число проводов в фазе	Значение коэффициента $k_U$
220	1	1
330	2	2,0
500	3	6,30
	4	3,73
750	4	17,9
	5	12,4
1150	6	8,64
	8	24,4
	9	19,7
	10	16,0

Из табл. 4 видно, что переход от трех проводов к четырем в фазе ВЛ 500 кВ уменьшает потери на корону в 1,7 раза, от четырех к пяти проводам – в ВЛ 750 кВ – в 1,44 раза, а от пяти к шести проводам – в 1,43 раза, что не противоречит приведенным ранее цифрам.

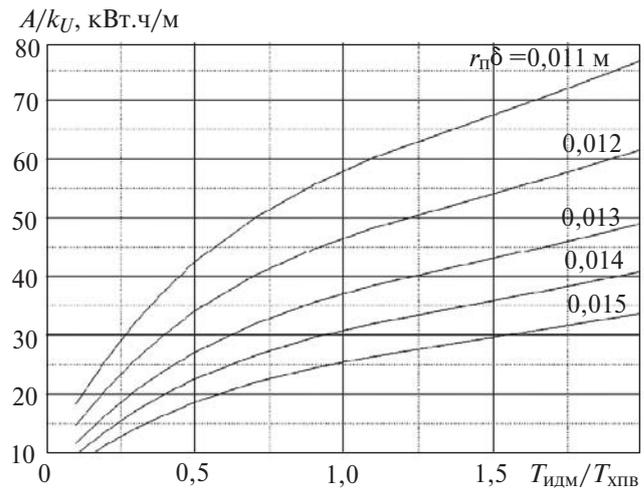


Рис. 1. Обобщённая зависимость  $A/k_U$  от индекса погоды  $T_{идм}/T_{хпв}$

Формула (15) позволяет определить, насколько можно уменьшить сечение проводов фазы при заданных потерях на корону. Действительно, пусть на ВЛ 750 кВ потери энергии на корону равны  $A_6$ ,  $A_5$  и  $A_4$  при  $n=6, 5$  и  $4$  соответственно, тогда

$$\begin{aligned} A_6 &= 8,64 C_e^{13,3} \frac{0,54}{r_{II} d} + \frac{0,00846}{r_{II}^2 d^2} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \\ A_5 &= 12,4 C_e^{13,3} \frac{0,54}{r_{II} d} + \frac{0,00846}{r_{II}^2 d^2} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \\ A_4 &= 17,86 C_e^{13,3} \frac{0,54}{r_{II} d} + \frac{0,00846}{r_{II}^2 d^2} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \end{aligned} \quad (16)$$

Если принять, что  $A_6 = A_5$ , то, зная  $r_{II5}$  и  $A_5$ , можно определить  $r_{II6}$  из уравнения

$$r_{II6}^2 + \frac{0,54 r_{II6}}{C_e^{13,3} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi}} - \frac{0,00846}{C_e^{13,3} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi}} = 0. \quad (17)$$

Зная  $r_{II6}$ , нетрудно найти геометрическое сечение фазы. Расчёты показали, что потери на корону в линии 750 кВ одинаковы, если используются провода с геометрическим сечением  $600 \text{ мм}^2$  при  $n=4$  (сечение фазы  $2400 \text{ мм}^2$ ),  $400 \text{ мм}^2$  при  $n=5$  (сечение фазы  $2000 \text{ мм}^2$ ) и  $330 \text{ мм}^2$  при  $n=6$  (сечение фазы  $1980 \text{ мм}^2$ ). Следовательно, при неизменных потерях на корону эффективность снижения геометрического сечения фаз при росте  $n$  постепенно снижается.

Если задать геометрическое сечение фазы неизменным  $S = \pi n r_{II}^2 = \text{const}$ , то по нему можно рассчитать потери на корону при различных  $n$  и  $r_{II}$ . Пусть на ВЛ 750 кВ  $r_{II} = 0,015 \text{ м}$  при  $n=4$  ( $S=2826 \text{ мм}^2$ ), тогда при  $n=5$  имеем  $r_{II} = 0,0134 \text{ м}$ , а при  $n=6$  получим  $r_{II} = 0,0122 \text{ м}$ . Значения среднегодовых средних

по России потерь на корону (кВт·ч/м), рассчитанные для этих случаев, даны на рис. 2, из которого следует, что при переходе от четырех проводов в фазе к пяти и от пяти проводов в фазе к шести потери уменьшаются каждый раз на 44%.

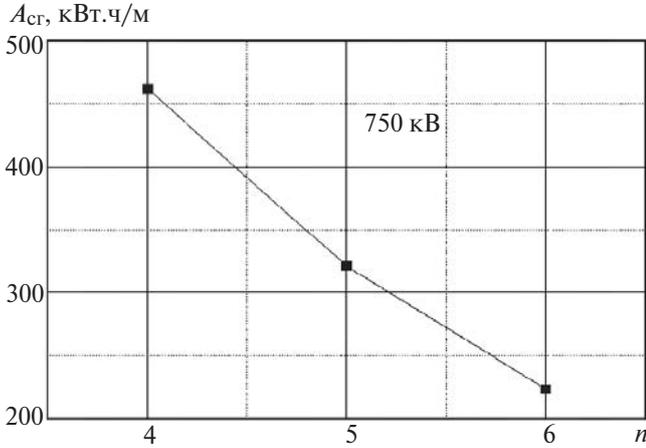


Рис. 2. Зависимость среднегодовых потерь энергии на корону от  $n$  при  $S = \text{const}$

Были также рассчитаны значения среднегодовых удельных потерь на корону  $P_{ср}$  для ВЛ 750 кВ без тросов. Данные расчёта представлены в табл. 5.

Таблица 5

Радиус провода $r_{\text{п}}$ , м	Расчетный параметр					
	Удельные потери на корону $P_{ср}$ , Вт/м, при			Геометрическое сечение проводов фазы $S = \rho n r_{\text{п}}^2$ , см <sup>2</sup> , при		
	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=4$	$n=5$	$n=6$
0,010	65,5	40,2	26,6	12,6	15,7	18,9
0,011	55,4	33,9	22,5	15,2	19,0	22,8
0,012	47,2	28,9	19,3	18,1	22,6	27,2
0,013	40,8	25,0	16,8	21,2	26,5	31,8
0,014	35,6	21,9	15,0	24,6	30,8	36,9
0,015	31,4	19,5	13,6	28,3	35,4	42,5
0,016	28,0	17,6	12,6	32,2	40,3	48,3
0,017	25,2	16,1	11,8	36,3	45,4	54,5
0,018	22,9	14,9	11,3	40,7	50,9	61,1

На рис. 3 представлены зависимости  $P_{ср}$  от геометрического сечения фазы  $S$  при разных значениях  $n$ . Цифры на кривых (от 1 до 9) соответствуют радиусам проводов от 0,010 до 0,018 (табл. 5 и 6). Так как в приводимых расчётах сечение провода определяется по его радиусу, то проводниковые сечения проводов табл. 5 больше сечения проводов типа АС.

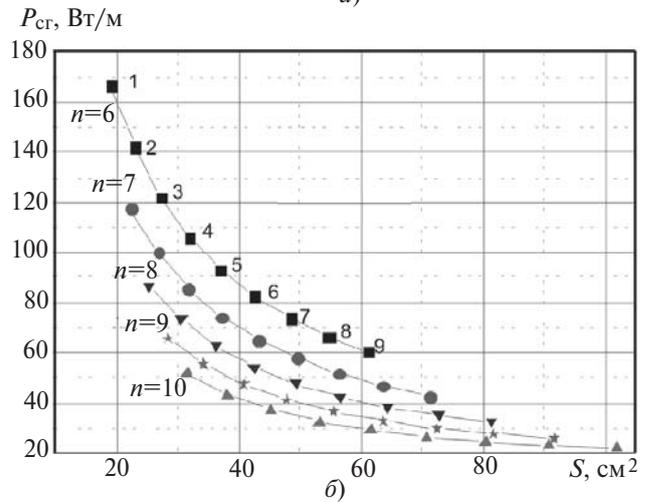
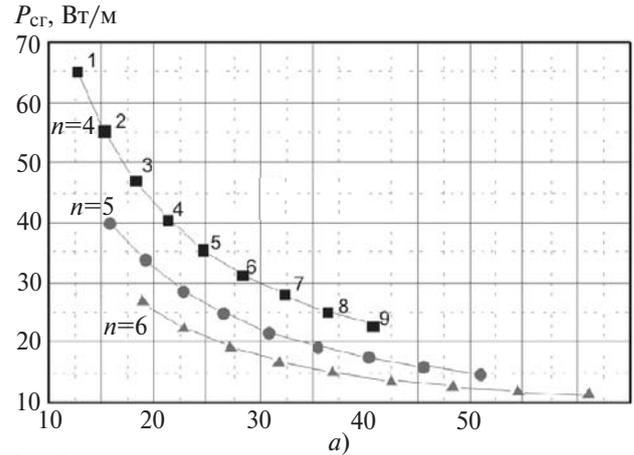


Рис. 3. Зависимость  $P_{ср}$  от сечения фазы  $S$  при изменении  $n$ : а – ВЛ 750 кВ; б – 1150 кВ

Из табл. 5 и рис. 3,а видно, что при одинаковых потерях на корону переход от четырех проводов к пяти и от пяти проводов к шести даёт уменьшение сечения на 30–40%. При заданном сечении потери на корону уменьшаются с ростом  $n$  примерно на 30%.

Аналогичные расчёты были проведены для ВЛ 1150 кВ. В результате ( $n=8, 9, 10$ ):

$$\begin{aligned}
 A_8 &= 24,4 \cdot 13,3 \cdot \frac{\rho}{e} - \frac{0,54}{r_{\text{п}} d} + \frac{0,00846}{r_{\text{п}}^2 d^2} \cdot \frac{\rho}{\varnothing} \\
 A_9 &= 19,7 \cdot 13,3 \cdot \frac{\rho}{e} - \frac{0,54}{r_{\text{п}} d} + \frac{0,00846}{r_{\text{п}}^2 d^2} \cdot \frac{\rho}{\varnothing} \\
 A_{10} &= 16,6 \cdot 13,3 \cdot \frac{\rho}{e} - \frac{0,54}{r_{\text{п}} d} + \frac{0,00846}{r_{\text{п}}^2 d^2} \cdot \frac{\rho}{\varnothing}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Сравнение результатов расчёта по (18) с [7] показывают, что приближённые соотношения дают завышение среднегодовых потерь на корону для  $n=8$  на 9,5%, а для  $n=10$  на 17,5%.

Из (18) следует, что при заданном радиусе провода ВЛ 1150 кВ переход от восьми проводов в

фазе к девяти и переход от девяти к десяти проводам уменьшает потери мощности на корону каждый раз примерно на 24%. Если же перейти от фазы с восьмью проводами к фазе с девятью проводами при сохранении сечения фазы, то потери на корону уменьшатся примерно на 6%, что находится в пределах точности расчётов.

На рис. 3,б представлены зависимости  $P_{сг} = f(S)$  для  $n=8, 9$  и  $10$ , рассчитанные по [7]. Согласно рис. 3,б увеличение числа проводов в фазе ВЛ 1150 кВ от восьми до девяти и от девяти до десяти проводов при неизменном сечении фазы уменьшает потери примерно на 15–20%. Это снижение вряд ли можно считать значимым, поскольку при росте числа проводов в фазе увеличивается длина проводов, число распорок в фазах и как стоимость ВЛ, так и расходы на её монтаж.

Из анализа полученных данных понятно, что увеличение числа проводов в фазе сверх  $n=8$  нецелесообразно. Поэтому при напряжении 1150 кВ и выше для уменьшения потерь мощности на корону необходимо применять провода увеличенного диаметра.

Для проверки полученных в табл. 4 коэффициентов были рассчитаны среднегодовые потери мощности на корону в ВЛ 750 кВ при средних по России метеорологических условиях и коэффициенты  $k = P_{сг6}/P_{сгn}$  (табл. 6).

Таблица 6

Радиус провода $r_{п}$ , м	Среднегодовые потери мощности на корону $P_{сг}$ , Вт/м, при			Коэффициент $k = P_{сг6}/P_{сгn}$		
	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=4$	$n=5$	$n=6$
0,010	65,51	40,21	26,62	0,41	0,66	1,0
0,011	55,39	33,89	22,48	0,41	0,66	1,0
0,012	47,21	28,86	19,26	0,41	0,67	1,0
0,013	40,75	24,97	16,84	0,41	0,67	1,0
0,01	35,59	21,92	15,00	0,42	0,68	1,0
0,015	31,41	19,52	13,63	0,43	0,70	1,0
0,016	28,01	17,62	12,60	0,45	0,72	1,0
0,017	25,21	16,12	11,84	0,47	0,73	1,0
0,018	22,91	14,94	11,30	0,49	0,75	1,0

По табл. 4 можно получить, что при  $n=5$  коэффициент  $k=0,7$ , а при  $n=4$   $k=0,48$ , что неплохо согласуется с цифрами табл. 6.

Аналогичные расчёты проводились и для ВЛ 1150 кВ (табл. 7).

Таблица 7

Радиус провода $r_{п}$ , м	Значение коэффициента $P_{сг6}/P_{сгn}$ при				
	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$
0,010	1,0	1,41	1,92	2,54	3,25
0,011	1,0	1,42	1,93	2,56	3,27
0,012	1,0	1,43	1,95	2,57	3,27
0,013	1,0	1,43	1,95	2,56	3,25
0,014	1,0	1,43	1,95	2,54	3,20
0,015	1,0	1,43	1,94	2,51	3,11
0,016	1,0	1,43	1,92	2,46	3,01
0,017	1,0	1,42	1,90	2,4	2,89
0,018	1,0	1,41	1,87	2,33	2,75

По данным табл. 6 и 7 построены графики  $P_{сг6}/P_{сгn} = F(n)$  – рис. 4.

Кривая 1 соответствует данным справочника [2], где зависимость  $P_{сг6}/P_{сгn}$  от  $n$  для  $r_{п} = 0,0165$  м близка к кривой, рассчитанной для  $r_{п} = 0,017$  м. Среднюю кривую рис. 4 можно аппроксимировать выражением

$$\frac{P_{сг6}}{P_{сгn}} = 0,5 - 0,167n + 0,0417n^2, \quad (20)$$

где  $n$  – целое число.

Что же касается обобщения [4], то оно даёт при увеличении числа проводов, например с шести до восьми, очень сильное уменьшение потерь на корону. Пусть  $n=6$  и  $E/E_0=0,8$ , тогда по [4] для снега  $P/nr_{п}^2=0,7$  и  $P_6=6r_{п}^2 \cdot 0,7=4,2r_{п}^2$ . При том же радиусе провода при  $n=8$  значение  $E/E_0$  определит-

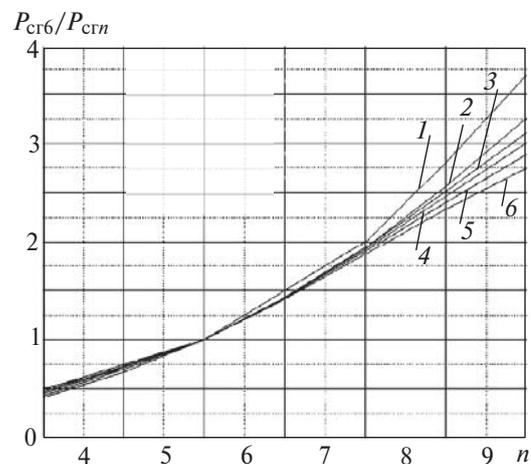


Рис. 4. Зависимость  $P_{сг6}/P_{сгn}$  от числа проводов в фазе  $n$ : 1 –  $r_{п} = 0,01165$  м; 2 – 0,01, 0,014; 3 – 0,015; 4 – 0,016; 5 – 0,017; 6 – 0,018

ся увеличением поверхности проводов, т.е. уменьшится в 6/8 раза и грубо  $E/E_0 = 0,8 \times 0,75 = 0,6$ . При снеге это даст значение  $P/nr_{\Pi}^2 = 0,11$  и  $P_8 = 0,88r_{\Pi}^2$ . Следовательно,  $P_6/P_8 = 4,2/0,88 = 4,77$ . По табл. 7 имеем  $P_6/P_8 = 1,95$ . Таким образом, по [4] эффект уменьшения потерь на корону при увеличении числа проводов в фазе с шести до восьми завышен в  $4,77/1,95 = 2,5$  раза. Для дождя при  $n=6$  и  $E/E_0 = 0,8$  по [4] имеем  $P/nr_{\Pi}^2 = 2,3$ , а при  $n=8$  имеем  $P/nr_{\Pi}^2 = 0,37$ . Тогда  $P_6/P_8 = 2,3 \times 6 / 0,37 \times 8 = 4,66$ . Следовательно, для дождя по [4] эффект уменьшения потерь на корону при увеличении числа проводов в фазе с шести до восьми завышен в  $4,66/1,95 = 2,4$  раза.

Опыт показал, что при включении ВЛ Экибастуз–Кокчетав, для которой потери на корону рассчитывались по [4], на номинальное напряжение 1150 кВ в хорошую погоду возникает мощная корона как на проводах линии, так и на шинах ОРУ [9]. Согласно данным измерений [10] на ВЛ 750 кВ с пятью проводами в фазе потери на корону при дожде в 2,5 раза больше рассчитанных по [4]. Очевидно, что пользоваться материалами [4] для расчёта потерь на корону недопустимо.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gary C., Moreau M. L'effet de couronne en tension alternative. — EYROLLES, 1976, 440 p.
2. Линии электропередачи 345 кВ и выше/Под ред. В.В. Бургсдорфа. — М.: Энергия, 1980, 408 с.
3. Попков В.И., Тамазов А.И. Вероятностные характеристики обобщённых удельных потерь на корону. — Сб. трудов ЭНИН, вып. 62: Корона на проводах, 1977, с. 82–134.

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 4, pp. 12–19.*

4. Руководящие указания по учёту потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330 – 750 кВ и постоянного тока 800 – 1500 кВ. — М.: СЦНТИ, 1975, 84 с.

5. Попков В.И., Богданова Н.Б. О методике оценки годовых потерь энергии на корону. — Электричество, 1957, № 1, с. 9–16.

6. Попков В.И., Тамазов А.И. Распределение вероятностей критических напряжений и расчёты потерь на корону. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, № 5, с. 79–82.

7. Тамазов А.И. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. — М.: Спутник, 2002, 318 с.

8. Тамазов А.И. Определение годовых потерь электроэнергии на корону с помощью индекса погоды. — Электричество, 2010, № 12, с. 19–28.

9. Кутузова Н.Б. Опыт проектирования и эксплуатации ВЛ 1150 кВ переменного тока Экибастуз–Урал с точки зрения влияния на окружающую среду. — Энергетика и электротехника: энергетический портал Энерго-инфо, 2007, № 4, с. 1–9: energo-info.ru

10. Шаров Ю.В., Гаджиев М.Г. Измерение потерь мощности на корону в линиях сверхвысокого напряжения ОАО «ФСК ЕЭС». — Электро, 2010, № 3, с. 19–23.

[16.12.14]

*Авторы: Тамазов Александр Иосифович окончил факультет электрификации железных дорог Московского института инженеров транспорта в 1955 г. В 1962 г. защитил кандидатскую диссертацию «Некоторые вопросы работы и методики расчета энергоснабжения электрической тяги переменного тока» в Московском энергетическом институте. Старший научный сотрудник ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского».*

*Коченков Павел Семенович окончил факультет теоретической и экспериментальной физики Московского инженерно-физического института в 1996 г. Ведущий инженер ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского».*

## The Effect the Number of Wires in the Phase Has on Electric Power Losses due to Corona in Overhead AC Power Lines

A.I. TAMAZOV AND P.S. KOCHENKOV

*The question about the effect the number of wires in the power line phase has on the level of losses due to corona is considered. It is shown, using the procedure for calculating the corona losses with respect to weather index developed at the Krzhizhanovskii Power Engineering Institute (ENIN), that the effect of reducing the corona losses tends to weaken with increasing the number of wires in the phase. It is pointed out that the effect the number of wires in the phase on the corona losses estimated according to the ENIN procedure is in close agreement with the theoretical and experimental data of the United States and France, but is in discordance with the results of calculations carried out using the curves presented in the Guidelines issued in 1975 (GL-75). The use of GL-75 in designing extra-high voltage overhead power lines has already resulted in that the corona losses in the 750 kV overhead power lines with five wires in the phase increased by a factor of 2.5. Earlier, it has also resulted in the impossibility to operate the 1150 kV overhead power line at the nominal voltage due to strong corona on the power line wires and on the busbars of outdoor switchyards. In view of these circumstances, it is proposed to do away with using the*

*long-outdated document GL-75 that yields erroneous results and replace it by the probabilistic corona loss calculation procedure developed at ENIN.*

**Key words:** *overhead power lines, corona losses, number of wires in the phase, calculation*

#### REFERENCES

1. Gary C., Moreau M. L'effet de couronne en tension alternative. — EYROLLES, 1976, 440 p.
2. Linii elektropredachi 345 kV i vyshе/Pod red. V.V. Burgsdorfa (Power Lines 345 kV and above/Edit. by V.V. Burgsdorf). Moscow, Publ. Energiya, 1980, 408 p.
3. Popkov V.I., Tamazov A.I. Sbornik trudov Energeticheskogo Instituta im. G.M. Krzhizhanovskogo. Vyp. 62 «Korona na provodakh» — in Russ. (Collection of Works Krzhizhanovskii Energy Institute. Iss. 62 «Crown on wires»), 1977, pp. 82—134.
4. Rukovodyashchiye ukazaniya po uchetu poter' na koronu i pomekh ot korony pri vybore provodov vozdushnykh linii elektropredachi peremennogo toka 330—750 kV i postoyannogo toka 800—1500 kV (The Guidelines for Taking into Account the Corona Losses and Corona-Induced Interference in Selecting the Wires of Overhead AC Power Lines for 330—750 kV Voltages and HVDC Power Lines for 800—1500 kV Voltages (STsNTI, Moscow, 1975). Moscow. Publ. Center for Scientific and Technical Information, 1975, 84 p.
5. Popkov V.I., Bogdanova N.B. Elektrichestvo — in Russ. (Electricity), 1975, No. 1, pp. 9—16.
6. Popkov V.I., Tamazov A.I. Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport — in Russ. (News of the USSR Academy of Sciences. Energy and Transport), 1978, No. 5, pp. 79—82.
7. Tamazov A.I. Korona na provodakh vozdushnykh linii peremennogo toka (Crown on the wires overhead lines AC). Moscow. Publ. Sputnik+, 2002, 318 p.
8. Tamazov A.I. Elektrichestvo — in Russ. (Electricity), 2010, No. 12, pp. 19—28.
9. Kutuzova N.B. Opyt proektirovaniya i ekspluatatsii VL 1150 kV peremennogo toka Ekibastuz — Ural s tochki zreniya vliyaniya na okruzhayushchuyu sredu. Energetika i elektrotehnika: energeticheskii portal Energo-info (Experience gained with design and operation of the Ekibastuz — Ural 1150 kV overhead power line from the viewpoint of its effect on the environment," Power and Electric Power Engineering: Power Engineering Portal Energo-Info), 2007, No. 4, pp. 1—9: energo-info.ru
10. Sharov Yu.V., Gadzhiev A.G. Elektro (Electro), 2010, No. 3, pp. 19—23.

*Authors: Tamazov Aleksandr Iosifovich (Moscow, Russia) — Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, Krzhizhanovskii Energy Institute.*

*Kochenkov Pavel Semenovich (Moscow, Russia) — Leading Engineer, Krzhizhanovskii Energy Institute.*

\* \* \*

### ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: [etr1880@mail.ru](mailto:etr1880@mail.ru);

[l.s.kudinova@rambler.ru](mailto:l.s.kudinova@rambler.ru)