

КОРОНА НА ЛИНИИ С ЗАЗЕМЛЕННОЙ ФАЗОЙ

ЩЕРБАКОВ В. К.

Профессор, доктор технических наук

Критическое напряжение короны

Есть основания полагать, что критическое напряжение короны в условиях трехфазной линии с одной заземленной фазой [1, 2] будет иным, чем в условиях симметричной трехфазной линии, так как при прочих равных условиях потенциалы проводов, заряды и конфигурация полей в этих двух случаях совершенно различны. Однако, несмотря на эти различия, и в том и в другом случае можно считать справедливым выражение Пика [3] для градиента видимой короны на поверхности гладких параллельных цилиндров радиуса r , при плотности воздуха δ :

$$E_v = 30\delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \text{ кВ}_{\text{макс}}/\text{см}. \quad (1)$$

Разрушающий градиент, соответствующий началу самостоятельного разряда в воздухе между параллельными проводами, имеющими радиус, больший 0,2 см, Пик определил как

$$E_0 = 30 \text{ кВ}_{\text{макс}}/\text{см}.$$

Далее, на основании геометрии электрического поля между двумя параллельными цилиндрами, имеются соотношения между максимальным и минимальным градиентами— $E_{\text{макс}}$ и $E_{\text{мин}}$,—с одной стороны, и приложенной к цилиндрам разностью потенциалов U —с другой [4]:

$$E_{\text{макс}} = \frac{U}{r \sqrt{\frac{D-r}{D+r} \cdot \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - r^2}}{r}}}, \quad (2)$$

$$E_{\text{мин}} = \frac{U}{r \sqrt{\frac{D+r}{D-r} \cdot \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - r^2}}{r}}}, \quad (3)$$

где D —расстояния между цилиндрами.

В высоковольтных линиях электропередач расстояния между проводами D несоизмеримо больше радиуса проводов, и поэтому различие между максимальным и минимальным градиентами на поверхности провода исчезает, и формулы (2) и (3) принимают вид

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{D}{r}}. \quad (4)$$

Известная формула Пика для подсчета критического разрушающего напряжения и получена из выражения (4) с добавлением коэффициентов,

учитывающих состояние поверхности— m_0 , состояние погоды— m_n и давление воздуха— δ :

$$U_{кр(ф)} = 21,1 \cdot m_0 \cdot m_n \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} \text{ кВ/см.} \quad (5)$$

Таким образом, для практических расчетов принято полагать поле около поверхности проводов равномерным по окружности, а, следовательно, и плотность заряда по поверхности проводов—одинаковой. Но тогда градиент на поверхности провода можно подсчитать в зависимости от заряда провода q как

$$E = \frac{q \text{ (кул/см)}}{2\pi r \text{ (см)}} \cdot \frac{1}{8,84 \cdot 10^{-6}} \text{ кВ/см,}$$

и разрушающий критический градиент как

$$E_0 = \frac{q_0}{2\pi r} \cdot \frac{1}{8,84 \cdot 10^{-6}} \text{ кВ/см,} \quad (6)$$

т. е. критическому (разрушающему) градиенту соответствует вполне определенный критический заряд на проводе, причем, имея в виду допущение о равномерности поля вокруг провода у поверхности его,—не зависящий от взаимного расположения проводов и соотношения потенциалов проводов.

Заряды проводов линии могут быть подсчитаны из условия, что:

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_1 &= C_{11} \cdot \bar{U}_{10} + C_{12}(\bar{U}_{10} - \bar{U}_{20}) + C_{13}(\bar{U}_{10} - \bar{U}_{30}), \\ \bar{q}_2 &= C_{12}(\bar{U}_{20} - \bar{U}_{10}) + C_{22} \cdot \bar{U}_{20} + C_{23}(\bar{U}_{20} - \bar{U}_{30}), \\ \bar{q}_3 &= C_{13}(\bar{U}_{30} - \bar{U}_{10}) + C_{23}(\bar{U}_{30} - \bar{U}_{20}) + C_{33} \cdot \bar{U}_{30}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для симметричной линии, при соблюдении условия

$$\begin{aligned} \bar{U}_{20} &= \alpha \cdot \bar{U}_{10}, \\ \bar{U}_{30} &= \alpha^2 \cdot \bar{U}_{10}, \end{aligned}$$

заряд, положим, провода 2-й фазы согласно (7) получается равным

$$\begin{aligned} \bar{q} &= C_{12}(\alpha \cdot U_{10} - U_{10}) + C_{22} \cdot \alpha \cdot U_{10} + C_{23}(\alpha \cdot U_{10} - \alpha^2 U_{10}) = \\ &= U_1 [C_{12}(\alpha - 1) + C_{22} \cdot \alpha + C_{23}(\alpha - \alpha^2)]. \end{aligned} \quad (8)$$

То же на проводе 2-й фазы линии с заземленной фазой (заземлена фаза 1—а), когда имеет место условие

$$\begin{aligned} U_{10} &= 0, \\ \bar{U}_{20} &= (\alpha - 1) \cdot U_1, \\ \bar{U}_{30} &= (\alpha^2 - 1) \cdot U_1, \end{aligned}$$

заряд равен

$$\begin{aligned} \bar{q}'_2 &= C_{12}[(\alpha - 1) \cdot U_1 - 0] + C_{22}(\alpha - 1) \cdot U_1 + C_{23}(\alpha - 1) \cdot U_1 - (\alpha^2 - 1) \cdot U_1 = \\ &= U_1 [C_{12}(\alpha - 1) + C_{22}(\alpha - 1) + C_{23}(\alpha - \alpha^2)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) указывают на линейную зависимость зарядов от фазового напряжения линии и позволяют установить постоянное отношение зарядов линии с заземленной фазой и симметричной линии (в данном случае 2-й фазы), при одном и том же номинальном напряжении. Это отношение будет равно

$$\begin{aligned}\frac{\bar{q}'_2}{q_2} &= \frac{C_{12}(\alpha - 1) + C_{22}(\alpha - 1) + C_{23}(\alpha - \alpha^2)}{C_{12}(\alpha - 1) + C_{22} \cdot \alpha + C_{23}(\alpha - \alpha^2)} \\ &= \frac{\alpha(C_{12} + C_{22}) + C_{23}(\alpha - \alpha^2) - (C_{12} + C_{22})}{\alpha(C_{12} + C_{22}) + C_{23}(\alpha - \alpha^2) - C_2}\end{aligned}\quad (10)$$

Или, так как $\alpha - \alpha^2 = -j\sqrt{3}$, то

$$\begin{aligned}\frac{\bar{q}'_2}{q_2} &= \frac{-\frac{3}{2}(C_{12} + C_{22}) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(C_{12} + C_{22} + 2C_{23})}{-\frac{1}{2}(C_{12} + C_{22} + 2C_{12}) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(C_{12} + C_{22} + 2C_{23})} = \\ &= \frac{3(C_{12} + C_{22}) + j\sqrt{3}(C_{12} + C_{22} + 2C_{23})}{(3C_{12} + C_{22}) + j\sqrt{3}(C_{12} + C_{22} + 2C_{23})}.\end{aligned}\quad (11)$$

Отношение абсолютных значений зарядов из (11) получается в виде

$$\frac{q'_2}{q_2} = \sqrt{\frac{[3(C_{12} + C_{22})]^2 + 3[C_{12} + C_{22} + 2C_{23}]^2}{[3C_{12} + C_{22}]^2 + 3[C_{12} + C_{22} + 2C_{23}]^2}}.\quad (12)$$

На основании точно таких же рассуждений отношение зарядов для 3-й фазы имеет вид

$$\frac{q'_3}{q_3} = \sqrt{\frac{[3(C_{13} + C_{33})]^2 + 3[C_{13} + C_{33} + 2C_{23}]^2}{[3C_{13} + C_{33}]^2 + 3[C_{13} + C_{33} + 2C_{23}]^2}}.\quad (13)$$

Формулы (12) и (13) показывают, что отношение зарядов определяется лишь положением проводов на опорах, поэтому эти отношения лучше связывать не с фазами электропередачи, а с проводами линии.

Применительно к размерам Шатурских 110 кв. опор (рис. 1) автором подсчитаны частичные емкости и отношение зарядов проводов двух фаз для сечений АС-185 и АС-120, соответственно: 1) обычному (симметричному) состоянию линии и 2) состоянию, когда верхний провод (провода) заземляется, но без изменения положения верхнего провода на опоре; результаты подсчетов приведены в таблицах 1 и 2.

Данные таблиц 1 и 2 указывают, что для определенного расположения проводов на опорах отношение зарядов на одноименных проводах почти не зависит от их сечений. Таким образом, для определенного типа опор (в смысле определенного размещения проводов на опорах) при неизменных расстояниях между проводами, может быть установлено постоянное значение отношения зарядов одноименных проводов, независимо от сечения проводов. Данные тех же таблиц указывают, что при одинаковых фазовых (или междуфазовых) напряжениях заряды на проводах линии с заземленной фазой больше, чем заряды на одноименных проводах симметричной линии, и что степень этого различия зарядов больше у одноцепных линий, чем у двухцепных.

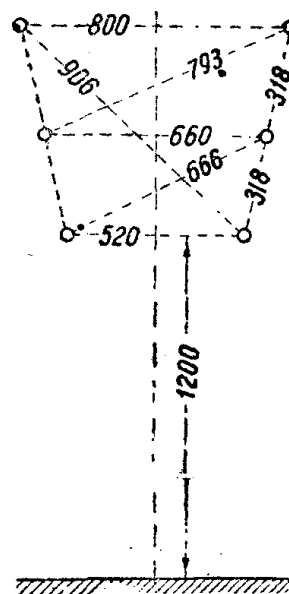


Рис. 1

Таблица 1. Две цепи в работе

Марка провода	Частичные емкости в $\mu\text{F}/\text{км}$					Отношение зарядов q'/q	
	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{22}	C_{33}	2-й провод	3-й провод
АС—120	0,00220	0,00114	0,00210	0,00303	0,00368	1,19	1,24
АС—185	0,00229	0,00118	0,00220	0,00300	0,00372	1,19	1,24

Таблица 2. Одна цепь в работе, без учета влияния проводов другой цепи

Марка провода	Частичные емкости в $\mu\text{F}/\text{км}$					Отношение зарядов q'/q	
	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{22}	C_{33}	2-й провод	3-й провод
АС—120	0,00183	0,00095	0,00171	0,00418	0,00493	1,28	1,33
АС—185	0,00190	0,00098	0,00180	0,00425	0,00505	1,27	1,33

В линии с заземленной фазой, таким образом, заряды на незаземленных проводах достигнут значения, соответствующего разрушающему градиенту на поверхности проводов при меньших напряжениях, чем это имеет место в симметричных электропередачах. Из уравнений (8) и (9) следует, что одинаковым зарядам на проводах в рассматриваемых двух системах электропередачи соответствуют различные фазовые напряжения, и отношение этих напряжений при $q' = q$ выражается как

$$\frac{U'}{U} = \frac{C_{12}(\alpha - 1) + C_{22} \cdot \alpha + C_{23}(\alpha - \alpha^2)}{C'_{12}(\alpha - 1) + C'_{22}(\alpha - 1) + C'_{23}(\alpha - \alpha^2)}. \quad (14)$$

Сравнивая (10) и (14), замечаем, что

$$\frac{U'}{U} = \frac{q}{q'}. \quad (15)$$

Следовательно, при переходе к режиму с заземленной фазой критическое напряжение коронирования проводов данной линии понижается в такой степени, в какой степени возрастают заряды проводов. Так, в разобранный выше примере (табл. 1) критическое напряжение короны 2-го провода при двух цепях на опорах понижается в 1,19 раза, а критическое напряжение 3-го провода—в 1,24 раза. В одноцепных линиях это понижение более значительно и, согласно табл. 2, выражается в 1,28 раза для 2-го провода и в 1,33 раза для 3-го провода.

Защитная роль верхнего провода требует определенного превышения этого провода над двумя другими проводами, как это в виде примера показано на рис. 2, где, сохраняя все прочие размеры опоры по рис. 1, верхние провода приподняты дополнительно на два метра. В этом случае при заземлении верхних проводов линии степень снижения критического напряжения короны получается меньше, как это видно из табл. 3 и 4.

Таблица 3. Двухцепная линия

Марка провода	Система передачи	Частичные емкости в $\mu\text{F}/\text{км}$					Отношение зарядов	
		C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{22}	C_{33}	2-й про- вод	3-й про- вод
АС—120	Симметричная (рис. 1)	0,00220	0,00114	0,00210	0,00303	0,00368	$\frac{q'_2}{q_2} = 1,15$	$\frac{q'_3}{q_3} = 1,24$
	С заземленной фазой (рис. 2)	0,00200	0,00098	0,00220	0,00290	0,00376	$\frac{q'_2}{q_2}$	$\frac{q'_3}{q_3}$
АС—185	Симметричная (рис. 1)	0,00229	0,00118	0,00220	0,00300	0,00372	$\frac{q'_2}{q_2} = 1,15$	$\frac{q'_3}{q_3} = 1,24$
	С заземленной фазой (рис. 2)	0,00183	0,00099	0,00230	0,00312	0,00377	$\frac{q'_2}{q_2}$	$\frac{q'_3}{q_3}$

Таблица 4. Одна цепь, без учета влияния соседней цепи

Марка провода	Система передачи	Частичные емкости в $\mu\text{F}/\text{км}$					Отношение зарядов	
		C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{22}	C_{33}	2-й про- вод	3-й про- вод
АС—120	Симметричная (рис. 1)	0,00183	0,00095	0,00171	0,00418	0,00493	$\frac{q'_2}{q_2} = 1,24$	$\frac{q'_3}{q_3} = 1,32$
	С заземленной фазой (рис. 2)	0,00140	0,00079	0,00176	0,00434	0,00494	$\frac{q'_2}{q_2}$	$\frac{q'_3}{q_3}$
АС—185	Симметричная (рис. 1)	0,00190	0,00098	0,00180	0,00425	0,00505	$\frac{q'_2}{q_2} = 1,24$	$\frac{q'_3}{q_3} = 1,315$
	С заземленной фазой (рис. 2)	0,00152	0,00083	0,00187	0,00435	0,00509	$\frac{q'_2}{q_2}$	$\frac{q'_3}{q_3}$

Подсчет величины критического напряжения короны для проводов линии с одной заземленной фазой путем сравнения зарядов проводов такой линии с зарядами проводов линии с симметричной системой потенциалов проводов и с обычным расположением проводов на опорах — не имеет смысла. Обычно провода линий на опорах располагаются таким образом, что заряды проводов одной и той же линии получаются неодинаковыми по величине, и отсюда, как следствие, неодинаковость критических напряжений короны проводов. Пик [3] указывает, что при горизонтальном расположении проводов на опорах критическое напряжение крайних проводов на 6% выше, а среднего на 4% ниже, чем критическое напряжение таких же проводов при расположении их по углам равностороннего треугольника.

Удобнее всего подсчет величины критического напряжения короны линии с заземленной фазой провести, исходя из следующих рассуждений.

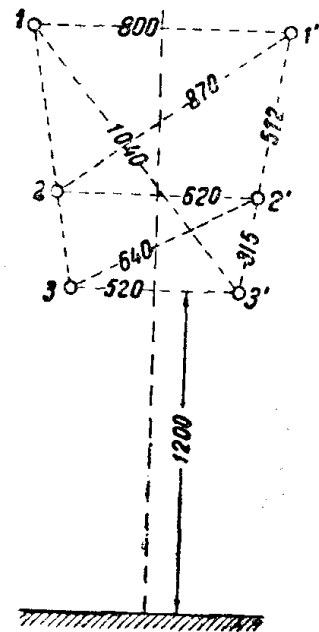


Рис. 2

Как было выяснено ранее, критическая (разрушающая) напряженность поля на поверхности провода может быть выражена через величину заряда провода

$$E_{кр} = \frac{q_{кр} (\text{кул/км})}{2\pi r (\text{см})} \cdot \frac{1}{8,84 \cdot 10^{-6}} \text{ кв/см};$$

полагая $E_{кр(ф)} = 21,1 \text{ кв/см}$ (по Пик у), найдем величину заряда, соответствующего появлению критической напряженности поля на поверхности провода в виде

$$q_{кр} = 21,1 \cdot 2\pi \cdot r \cdot 8,84 \cdot 10^{-6} \text{ кул/км.}$$

Но так как для каждого провода действительно соотношение

$$q = U_{ф} C_{раб},$$

то

$$U_{кр(ф)} \frac{q_{кр}}{C_{раб}} = \frac{r}{C_{раб}} \cdot 21,1 \cdot 2\pi \cdot 8,84 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} = 1,175 \frac{r}{C_{раб}} \cdot 10^{-6} \text{ кв.}$$

Вводя в формулу (16) коэффициенты, учитывающие состояние поверхности провода (m_o) и состояние погоды (m_n), а также множитель δ — плотность воздуха, получим окончательное выражение для подсчета критического напряжения короны в виде

$$U_{кр(фаз)} = m_o \cdot m_n \cdot \delta \cdot 1,17 \cdot \frac{r}{C_{раб}} \cdot 10^{-6} \text{ кв.} \quad (17)$$

Здесь r — в см и C_p — в фарадах на километр.

Формула (17) одинаково годна как для линий с заземленной фазой, так и для линий симметричных.

Рабочая емкость C_p из (7), положим, для второго провода, получается

$$C_{p(2)} = -\frac{q_2}{U_{ф}};$$

но из (9) следует, что

$$q_2 = U_{ф} \cdot \sqrt{\frac{9}{4} (C_{12} + C_{22})^2 + \frac{3}{4} (C_{12} + C_{22} + C_{23})^2},$$

следовательно,

$$C_{p(2)} = \frac{1}{2} \sqrt{9 (C_{12} + C_{22})^2 + 3 (C_{12} + C_{22} + 2 C_{23})^2}; \quad (18)$$

точно так же и для 3-го провода—

$$C_{p(3)} = \frac{1}{2} \sqrt{9 (C_{13} + C_{33})^2 + 3 (C_{13} + C_{33} + 2 C_{23})^2}. \quad (19)$$

В таблице 5 даны значения рабочих емкостей и критические напряжения для проводов АС-120 и АС-185 и опор по рис. 2. Данные таблицы 5 показывают, что корона в 110 кв линиях с заземленной фазой не ставит практических затруднений для двухцепных линий, так как провода АС-120 (радиус—0,765 см) не коронируют и представляется возможность использования проводов АС-95 (радиус—0,695). В отношении же одноцепных 110 кв линий необходимо отметить затруднения с применением проводов радиусов меньших 0,765 см, так как провода АС-120 (радиус—0,765 см) при хорошей погоде уже могут дать слабое коронирование в начале линии.

Таблица 5

Число цепей	Марка провода	Положение провода	Рабочая емкость в μF	Критическое напряжение $U_{\text{кр(мф)}}$ в кв	Примечания
Одна цепь	АС-120	2-й	0,0118	112	Частичные емкости приведены в таблицах 3 и 4 Расположение проводов по рис. 2 $m_0 = 0,85$ (коэф. учета состояния поверхности провода) $m_n = 1$ (коэф. учета состояния изоляции) $\delta = 1$ (плотность воздуха)
		3-й	0,0117	112	
	АС-185	2-й	0,0121	134	
		3-й	0,0122	134	
Две цепи	АС-120	2-й	0,0109	121	
		3-й	0,0107	123	
	АС-185	2-й	0,0111	148	
		3-й	0,0108	150	

Интересно отметить, что во всех практически возможных случаях заземленный провод коронировать не будет. В самом деле, по (7) величина рабочей емкости заземленного провода будет равна

$$C_{\text{раб (1)}} \cong 3 C_{12},$$

а это означает (см. табл. 3, 4 и 5), что всегда будет иметь место соотношение

$$2 C_{\text{р (1)}} < C_{\text{р (2)}},$$

т. е. критическое напряжение заземленного провода всегда будет примерно в два раза выше критического напряжения двух других проводов (см. формулу 16). Правда, сечение заземленного провода может быть взято меньше раза в два, чем сечения двух других проводов, но и в этом случае радиус заземленного провода будет меньше радиуса двух других проводов лишь в $\sqrt{2}$ раза и, следовательно, критическое напряжение короны этого провода всегда будет выше рабочего напряжения электропередачи.

Заслуживает внимания также вопрос о влиянии на величину критического напряжения короны соседней цепи, когда эта цепь выключена и заземлена. В предыдущих подсчетах предполагалось полное отсутствие влияния соседней выключенной цепи, когда речь шла об одноцепных линиях или о работе только одной цепи. Однако, как показывают примеры подсчетов, влияние соседней выключенной и заземленной цепи все же имеется в линиях с заземленной фазой. С целью выяснения этого вопроса автором подсчитаны частичные емкости линии с проводами АС-120, расположенными на опоре по рис. 2, когда одна цепь в работе, а другая отключена и заземлена; в таблице 6 приведены значения рабочих емкостей

и критического напряжения короны для трех характерных состояний этой линии.

Таблица 6

Состояние линии передачи	Рабочая емкость в μF		Критическое напряжение в кв (междуфазовое)	
	$C_{p(2)}$	$C_{p(3)}$	2-го провода	3-го провода
Одноцепная	0,0118	0,0117	112	112
Двухцепная, обе цепи в работе	0,0109	0,0107	121	123
Двухцепная, одна цепь отключена и заземлена	0,0122	0,0123	108	107
Примечания	Провода АС-120; расположение проводов по рис. 2; $m_0 = 0,85$; $m_n = 1$; $\delta = 1$.			

Как и следовало ожидать, наличие соседней цепи, расположенной на одних опорах, находящейся в отключенном и заземленном состоянии, увеличивает рабочую емкость проводов и, следовательно, снижает критическое напряжение короны работающей цепи, если сравнивать этот режим работы двухцепной линии с работой одноцепной линии.

220 кв линии обычно сооружаются с проводами АС-400 или АСУ-400. Применительно к опоре по рис. 3 рабочие емкости равны:

$$C_{p(2)} = C_{p(3)} = 0,01070 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км},$$

$$C_{p(1)} = 0,00303 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км};$$

критическое напряжение короны, при $m_n = 1$ и $\delta = 1$, получается:

а) для нижних проводов

$$U_{кр(мф)} = \sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,17 \frac{1,39}{0,0107} = 224 \text{ кв},$$

б) для верхнего провода

$$U_{кр(мф)} = \sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,17 \frac{1,075}{0,00303} = 610 \text{ кв}.$$

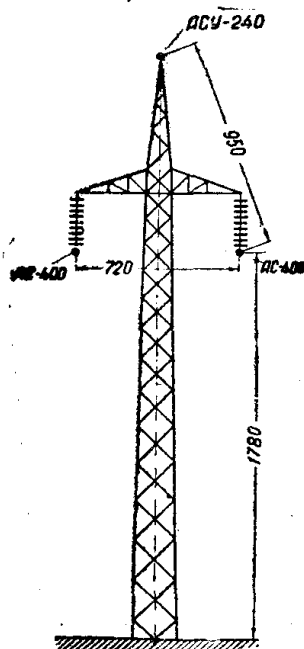


Рис. 3

Критическое напряжение можно было бы несколько повысить в данном случае применением проводов АСУ-400 ($U_{кр(мф)} = 233$ кв); вторая цепь, расположенная на близком расстоянии, могла бы оказать также нужный эффект.

Потери на корону

Потеря мощности на корону в линиях обычно подсчитывается по формуле Пика:

$$P_k = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U_{кр})^2 \cdot 10^{-5} \text{ кВт/км}, \quad (20)$$

где δ — плотность воздуха;
 f — частота переменного тока;
 $(U - U_{кр})$ — разность между рабочим и критическим напряжением линии; при подсчетах потерь на один провод подставляются фазовые значения U и $U_{кр}$.

Однако эта формула, являясь экспериментальной, не указывает на механизм образования потерь на корону и поэтому, анализируя эту формулу, не удастся подметить, как изменяются потери при переходе к линиям с заземленной фазой.

Хольм дает формулу для подсчета потерь на корону более сложного вида, чем формула Пик'а, но формула Хольма получена в результате логических суждений с учетом современных физических представлений об явлениях в воздухе при короне [3]. По Хольму, потеря энергии на корону за полупериод равна

$$W = U_{ср} \cdot Q, \quad (21)$$

где $U_{ср}$ — некоторое постоянное среднее значение напряжения между проводами, при котором происходят потери на корону;
 Q — количество электричества, которое должно быть подведено от источника энергии для создания пространственного заряда в окружающем корону пространстве и для нейтрализации части пространственного заряда от предыдущего полупериода.

На основании соотношения (21) получается выражение для теряемой на корону мощности в виде

$$P_k = W \cdot 2f = 2f \cdot U_{ср} \cdot Q. \quad (22)$$

В дальнейших рассуждениях, по Хольму, количество электричества Q подсчитывается как комплексный емкостный заряд, величина которого определяется напряжением между проводами и геометрическими размерами линии.

Но при одном и том же $U_{ср}$ и на проводах одной и той же линии количество электричества Q в формулах (21) и (22) будет различно в зависимости от режима работы линии: в случае работы линии с заземленной фазой, как это было показано выше, величина Q больше, чем в случае работы той же линии при обычном (симметричном) режиме в отношении

$$\frac{C_{раб. (зазем.)}}{C_{раб. (симм.)}} = \beta.$$

Мощность на корону в линии с заземленной фазой поэтому может быть подсчитана как

$$P'_k = 2f \cdot U_{ср} \cdot (\beta \cdot Q). \quad (23)$$

Беря отношение (23) и (22), находим, что

$$\frac{P'_k}{P_k} = \frac{2f \cdot U_{ср} (\beta \cdot Q)}{2f \cdot U_{ср} \cdot Q} = \beta,$$

т. е. потеря мощности на корону в линии с заземленной фазой больше в β раз, чем в линии симметричной.

Следовательно, для определения мощности на корону в незаземленных проводах линии с заземленной фазой необходимо найти эту мощность по известным формулам для симметричного режима работы линии, а затем

этот результат увеличить в отношении $\frac{C_p (зазем.)}{C_p (симм.)}$:

$$\Delta P_{зазем} = \beta \cdot \Delta P_{симм.}$$

Экспериментальная проверка

В целях проверки суждений по определению потерь на корону в линиях с заземленной фазой был проделан ряд опытов с замером потери мощности на корону в опытной линии с заземленной фазой. Измерения производились на 3-фазной линии длиной в 30 метров, с железными проводами диаметром 3,2 мм и расположенными по углам равностороннего треугольника. Питание линии осуществлялось от трехфазного трансформатора испытательного типа, мощностью 30 квт и напряжением 40 кв. Линия была смонтирована на открытом воздухе, трансформатор находился в помещении, напряжение подводилось через фарфоровые втулки, вмонтированные в деревянные щитки.

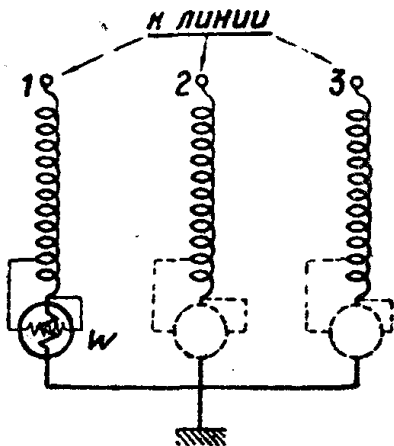


Рис. 4

Генрикса, т. е. токовая обмотка включалась в концы фазовых обмоток перед нейтралью, которая была заземлена, а обмотка напряжения—на не-

Измерение активной мощности велось милливольтметром, специально для этой цели изготовленным, работающим на ферродинамическом принципе, с пределом измерения до 200 милливольт; предел измерения по напряжению 100 в, сопротивление катушки напряжения 3000 Ω ; полный предел измерения по току 5—6 мА, сопротивление катушки тока 120 Ω . Погрешность измерений—не более 0,5% от предела шкалы.

При измерении потерь при симметричном режиме ваттметр включался по схеме Пика-

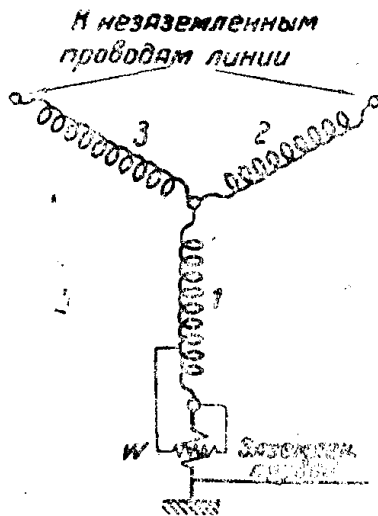


Рис. 5

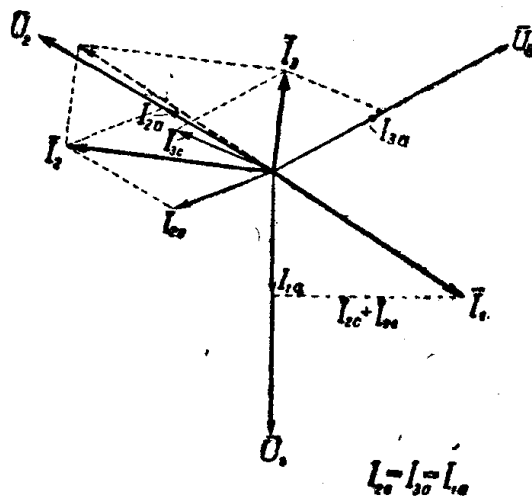


Рис. 6

большую часть витков фазовых высоковольтных обмоток около нейтрали (рис. 4).

Заземление одной из фаз требовало изоляции нейтрали от земли на фазовое напряжение и поэтому в таком режиме работы трансформатора включение ваттметра не могло быть осуществлено по схеме Реек'а-Нендрих'а. Доступной являлась лишь обмотка заземленной фазы в месте заземления и поэтому прибор включался в этом месте обмотки, как это показано на рис. 5. Допуская равенство потерь в незаземленных проводах,

что является близким к действительности, так как по вышеприведенным суждениям (см. табл. 6) рабочие емкости и критические напряжения незаземленных проводов мало различаются даже при резком неравенстве расстояний этих проводов до земли и заземленного провода,—можно сделать заключение о равенстве величин активных составляющих токов незаземленных проводов и, следовательно, о возможности измерения в заземленной фазе трансформатора трети всей активной мощности, теряемой электропередачей на корону. На рис. 6 показана векторная диаграмма напряжений и токов электропередачи в соответствии с положением о равенстве активных токов в фазах, при этом вполне допустимо считать симметрию напряжений фаз ненарушенной, так как в наших опытах нагрузка на трансформатор была очень мала и соответственно очень малым

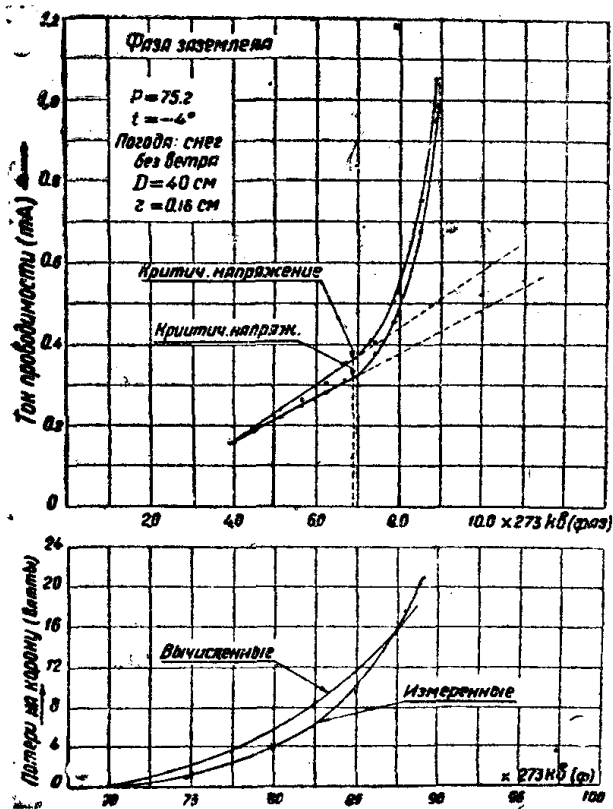


Рис. 7

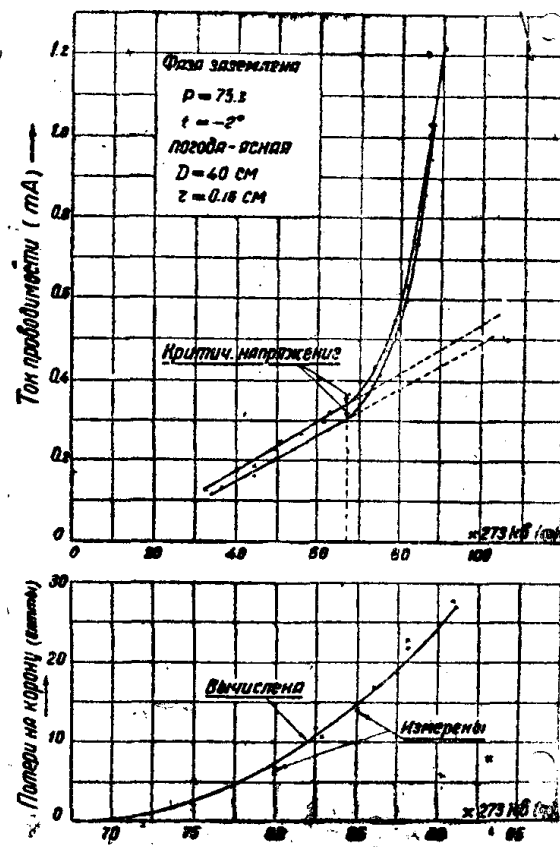


Рис. 8

падения напряжения в обмотках трансформатора. Емкостный ток в заземленной фазе опережает напряжение фазы на 90° и поэтому ваттметром не будет учтен. Таким образом, если измеренную мощность заземленной фазы обозначить через P_1 , то общая мощность электропередачи, расходуемая на корону, определится как

$$P_k = 3P_1. \quad (26)$$

На основании проведенных опытов построены кривые рис. 7 и рис. 8. В верхней части рисунков 7 и 8 найдено критическое напряжение короны, причем предполагалась неизменность во время опытов пропорциональности между приложенным напряжением к линии и током активной проводимости, исключая ток проводимости за счет короны. Приведенные кривые и многие другие измерения и вычисления подтвердили это предположение в пределах напряжений, использованных в опытах. Внизу рисунков 7 и 8 показана степень совпадения измеренных и вычисленных ве-

личин потерь на корону в зависимости от напряжения. Можно видеть хорошее совпадение результатов вычисления по формуле Пика с данными опытов, причем потери, вычисленные по формуле Пика, каждый раз умножались на коэффициенты

$$\beta = \frac{C_{\text{раб. (зазем.)}}}{C_{\text{раб. (симм.)}}}.$$

Так как провода линии имели радиус меньше чем 0,2 см, по рекомендации Пика, потери вычислялись по формуле

$$P_k = 241(f + 25) \sqrt{\frac{r + \frac{6}{D} + 0,04}{D}} (U - U_{\text{кр}})^2 \cdot 10^{-5} \text{ кВт/км.} \quad (27)$$

При малых радиусах проводов и не очень больших значениях разности $(U - U_{\text{кр}})$ —по свидетельству самого Пика—потери не совсем строго следуют формуле (27), тем не менее результаты измерений, и особенно согласно рис. 8, дали хорошее совпадение вычислений с экспериментом. Коэффициент β для опытной линии был найден равным 1,21.

Общие выводы

1. В линии с заземленной фазой критическое напряжение короны ниже, при прочих равных условиях, чем в симметричной линии; критическое напряжение во столько раз снижается, во сколько раз повышается рабочая емкость провода.

2. Практически снижение величины критического напряжения в двухцепных линиях на общих опорах выражается в 15—25%, и провода марки АС-95 уже дают незначительные потери в 110 кв линиях; в одноцепных линиях степень снижения величины критического напряжения больше и выражается в 24—32%, поэтому применение проводов марки АС-120 связано с допущением потерь на корону, правда, очень незначительных по своему размеру.

3. Расчет критического напряжения короны можно производить по формуле (V, 17):

$$U_{\text{кр(ф)}} = 1,17 \frac{r}{C_{\text{раб}}} \cdot m_o \cdot m_n \cdot \delta \cdot 10^{-6} \text{ кв,}$$

рабочая емкость при этом определяется по формулам (18) и (19).

4. В практических условиях работы линий электропередач заземленный провод линий не коронирует, даже если сечение этого провода в два раза меньше сечения двух других проводов.

5. Потеря мощности на корону может быть найдена как

$$\Delta P_{\text{зазем.}} = \beta \cdot \Delta P_{\text{симм.}},$$

причем $\Delta P_{\text{симм.}}$ определяется для симметричного режима по известным формулам (например, по формуле Пика).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Щербakov.—Линии с использованием провода одной из фаз и в качестве защиты от грозных ударов. Известия Томского индустриального института, т. 59. 1941.
2. В. К. Щербakov.—Электрический расчет несимметричных электропередач (с заземленной фазой). Известия Томского политехнического института, т. 63.
3. Ф. В. Пик.—Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. Перевод с английского. 1934.
4. А. А. Смуров.—Электротехника высокого напряжения и передача энергии. 1931.
5. „Техника высоких напряжений“ под редакцией проф. Л. И. Сиротинского, выпуск I, 1940.