

УДК 621.314.21

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НА КОРОНУ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 кВ И ВЫШЕ В ВЫСОКОГОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

**Л.О. Караханян, А.С. Арутюнян**

*ЗАО “Научно-исследовательский институт энергетики” РА*

Приведены аналитические выражения для расчета потерь мощности на корону при различных погодных условиях. Интенсивность коронного разряда на проводах воздушных линий в установившихся погодных условиях однозначно зависит от напряжения. Однако в реальных условиях метеорологическая обстановка меняется, что приводит к вариации интенсивности коронирования. Например, при изморози потери мощности на корону оказываются на порядок больше, чем в хорошую погоду. Ограничить потери мощности на корону можно применением конструкций фазных проводов с пониженными напряженностями электрического поля на поверхности проводов.

Коронный разряд на проводах протекает в форме ионизационных процессов с образованием объемных зарядов, возникающих в результате ударной ионизации молекул воздуха электронами. Характеристики коронного разряда на проводах не могут быть определены точно. Поэтому принимаются допущения, которые существенно не влияют на результаты расчета, но дают возможность получить аналитическое решение. В настоящей статье на основании аналитических выражений построены графики, выражающие ход изменения потерь мощности от фазного напряжения для высокогорного и равнинного участков воздушной линии электропередачи.

**Ключевые слова:** коронный разряд переменного тока, напряженность начала короны, объемный заряд, метеорологические данные.

**Введение.** Потери электроэнергии на коронный разряд в высоковольтных воздушных линиях (ВЛ) рассчитывались на основе разработанных в 70-е годы прошлого столетия руководящих указаний [1], имеющих существенные недостатки. Эти указания были основаны на результатах измеренных потерь в проводах, диаметры которых изменялись в узком диапазоне, и для перехода от одного номинального напряжения к другому были необходимы исправления. Кроме того, экспериментальные результаты были получены для единственной

фазы с расщепленными проводами, а также не учитывалось взаимодействие электрических полей фаз трехфазной линии с точки зрения оценки напряженности электрического поля в точках поверхности их проводов. При этом относительная плотность воздуха, зависящая от высоты нахождения ВЛ над уровнем моря (н.у.м.), имеет существенное влияние на величину потерь на корону. Экспериментальные исследования, проведенные на высоковольтной станции на высоте 3050 м н.у.м. [2], показали, что мощности потерь на корону на проводах различных диаметров в хорошую погоду в 2...3 раза меньше потерь, рассчитанных по методике [1], а при снеге и дожде - в 1,5...2 раза.

**Постановка задачи и обоснование методики.** В настоящей статье исследованы изменения потерь на корону в воздушных линиях 110-220 кВ на территории РА при различных погодных условиях, исходя из данных повседневных метеорологических измерений.

Расчетное уравнение потерь мощности на корону имеет следующий вид [3]:

$$P = 0,35\omega U(U - U_0) \frac{c^2}{c_0 - c}, \quad (1)$$

где  $c_0$  - эквивалентная емкость объемного заряда, образованного вокруг фазного провода;  $c$  - емкость фазного провода;  $U$  - амплитуда фазного напряжения;  $U_0$  - напряжение на поверхности, соответствующее критическому заряду;  $\omega$  - угловая частота напряжения.

На практике характеристика (1) заменяется упрощенной (редуцированной) характеристикой  $P/U$ , которая является прямой линией (рис. 1) в интервале напряжений общей короны, а при напряжении возникновения точечной короны до напряжения  $U_0$  является нелинейной.

В области общей короны ( $U > U_0$ ) и при небольших перенапряжениях зависимость мощности  $P$  от амплитуды  $U$  напряжения при данных погодных условиях выражается формулой

$$P = b_p U(U - U_0), \quad (2)$$

где  $b_p$  - тангенс угла наклона прямолинейного отрезка редуцированной характеристики (рис. 1) относительно оси абсцисс.

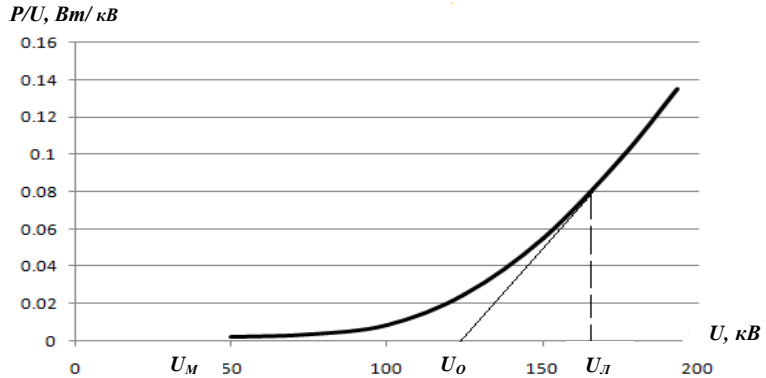


Рис. 1. Зависимость редуцированных удельных потерь от напряжения

Здесь  $U_M$  - напряжение местной короны;  $U_L$  – напряжение начала короны для прямолинейного отрезка (рис. 1).

Таким образом, уравнение (1) можно представить в обобщенной форме

$$\frac{P}{b_p U^2} = 1 - \frac{U_o}{U}. \quad (3)$$

Следовательно, в обобщенной форме потери мощности на корону зависят от отношения  $U_o/U$ , т.е.

$$\frac{P}{b_p U^2} = f\left(\frac{U_o}{U}\right). \quad (4)$$

В [4] приведены графики функции  $f(U_o/U)$ , соответствующие уравнению (3) для различных погодных условий. Поскольку напряжение линии электропередачи в разных режимах изменяется в узких пределах, то изменение обобщенных потерь в основном определяется изменением критического напряжения. Отметим, что для одиночного провода последнее определяется известной формулой

$$U_o = \frac{2\pi\epsilon r_n}{c} E_o, \quad (5)$$

а для расщепленного фазного провода - формулой

$$U_o = \frac{2\pi\epsilon r_n n}{K_H c} (0,8 + 0,2K_H) E_o, \quad (6)$$

где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость воздуха;  $c$  - емкость фазного провода;  $r_n$  - радиус провода;  $n$  - количество проводов в фазе;  $K_H = 1 + (n - 1) \frac{r_n}{r_p}$  - коэффициент неравномерного распределения заряда на поверхности провода;  $r_p$  - радиус расщепления пучка проводов.

Критическая напряженность  $E_o$  на поверхности провода определяется формулой Пика

$$E_o = 3 \cdot 10^6 m \delta \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{\delta r_n}}\right), \quad (7)$$

где  $\delta$  - относительная плотность воздуха, зависящая от атмосферного давления  $P$  и температуры  $t$ :  $\delta = \frac{0,386P}{273+t}$ ;  $m$  - коэффициент негладкости, для витого провода принимаемый равным 0,82 (в горных условиях рекомендуется принимать  $m = 0,7 \dots 0,75$ ) и учитывающий степень уменьшения средней плотности заряда на поверхности провода под воздействием метеорологических условий [5].

**Результаты расчетов.** Для определения удельных потерь мощности на корону необходимо иметь численное значение коэффициента  $b_p$  в выражении (2). Из выражения (1) следует

$$b_p = \frac{\omega}{\pi} (c_o - c), \quad (8)$$

где  $c_o$  - емкость объемного заряда, образованного вокруг провода в момент погасания короны, которая определяется через емкость фазного провода формулой

$$c_o = \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{110}} c. \quad (9)$$

Здесь  $\alpha_{11} = \frac{\ln \frac{2H}{r_{\text{эл}}}}{2\pi\epsilon}$ ;  $\alpha_{110} = \frac{\ln \frac{2H}{r_{\text{эо}}}}{2\pi\epsilon}$ ;  $H$  - высота провода над землей;  $r_{\text{эл}}$  - эквивалентный радиус фазного провода;  $r_{\text{эо}}$  - эквивалентный радиус объемного заряда, образованного вокруг провода;  $r_e$  - радиус фронта объемного заряда. При этом согласно [3]

$$r_{\text{эл}} = r_p \sqrt[n]{\frac{nr_n}{r_p}}, \quad r_{\text{эо}} = \left(r_p + \frac{1}{2}r_e\right)^n \sqrt[n]{\frac{\frac{1}{2}nr_e}{r_p + \frac{1}{2}r_e}},$$

$$r_e = 4,7K_H \sqrt{m_c r_n \left(2 + \frac{n-1}{1 + \frac{r_p}{2K_H \sqrt{m_c r_n}}}\right)},$$

где  $m_c$  - среднее значение снижения критического напряжения для данного вида погоды.

Коэффициент снижения критической напряженности по отношению к начальной определяется для каждого погодного условия. Соответствующие значения  $m_c$ : при хорошей погоде - 0,87; при сухом снеге - 0,77; при дожде - 0,68; при изморози - 0,58.

В частном случае, когда фазный провод не расщеплен, подставляя  $n = 1$  в вышеприведенные формулы радиусов, получаем формулы для определения эквивалентного радиуса объемного заряда, образованного вокруг провода, и радиуса фронта объемных зарядов в момент погасания короны:

$$r_{\text{эл}} = r_n, r_e = 4,7\sqrt{m_c r_n 2} = 6,6\sqrt{m_c r_n} = r_{\text{эо}}.$$

В качестве примера рассчитаны напряженность на поверхности фазного провода при расположении фазных проводов на опоре линий электропередачи (ЛЭП) 220 кВ в горизонтальной плоскости, а также коэффициенты  $b_p$ , имеющие размерность проводимости для следующих геометрических размеров ВЛ: радиус провода (АС-400) -  $r_n = 1.26$  см; высота над поверхностью земли -  $H = 7,5$  м, межфазное расстояние -  $D = 7$  м.

Для расчета емкостей  $c_o$  и  $c$  при определении значения  $b_p$  по формуле (8) рассчитаны коэффициенты электростатической индукции  $\beta$  как элементы матрицы, обратной матрице коэффициентов  $\alpha$ :

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

откуда следуют выражения, определяющие коэффициенты  $\beta$ :

$$\beta_{11} = \frac{\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{32}\alpha_{23}}{\Delta} = \beta_{22} = \beta_{33}, \quad (11)$$

$$\beta_{12} = \beta_{23} = \frac{\alpha_{23}\alpha_{13} - \alpha_{12}\alpha_{33}}{\Delta}, \quad (12)$$

$$\beta_{13} = \beta_{31} = \frac{\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22}}{\Delta}, \quad (13)$$

где  $\Delta = \alpha_{11}(\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{32}\alpha_{23}) - \alpha_{12}(\alpha_{21}\alpha_{33} - \alpha_{31}\alpha_{23}) + \alpha_{13}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{31}\alpha_{22})$ .

Отметим, что

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{2H}{r_n},$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_{1'2}}{r_{12}},$$

где  $r_{12} = D$ ;  $r_{1'2}$  - расстояние между зеркальным изображением первого провода и вторым проводом.

Таким же образом рассчитываются коэффициенты  $\alpha_{23}$  и  $\alpha_{13}$ :

$$\alpha_{23} = \alpha_{32} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_{2'3}}{r_{23}}, \quad r_{13} = 2D.$$

В результате получены следующие значения:

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = 12,775 \cdot 10^{10} \text{ м/Ф},$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{23} = 1,55 \cdot 10^{10} \text{ м/Ф},$$

$$\beta_{11} = \beta_{33} = 7,957 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$\beta_{22} = 8,05 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$\beta_{12} = -0,927 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$\beta_{13} = -0,3166 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$\beta_{23} = -0,927 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

Рабочие емкости фазных проводов ВЛ определены через коэффициенты  $\beta$ :

$$c_1 = c_3 = \beta_{11} - \frac{\beta_{12} + \beta_{13}}{2} = 8,57 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$c_2 = \beta_{22} - \frac{\beta_{21} + \beta_{23}}{2} = 9 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

При номинальном напряжении ВЛ 220 кВ амплитуда фазного напряжения равна  $U_{\Phi} = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 179,62 \text{ кВ}$ , заряды единицы длины (удельные) проводов будут

$$\begin{aligned} \tau_1 &= c_1 U_{\Phi} = 1,539 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м} = \tau_3, \\ \tau_2 &= c_2 U_{\Phi} = 1,616 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м,} \end{aligned}$$

через которые определены амплитудные значения напряженности на поверхности фазных проводов:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\tau_1}{2\pi\epsilon r_n} = 21,98 \text{ кВ/см} = E_3, \\ E_2 &= \frac{\tau_2}{2\pi\epsilon r_n} = 23,08 \text{ кВ/см.} \end{aligned}$$

Следовательно, напряженность  $E$  на поверхности фазы, находящейся в середине крайних проводов, максимальна, и потери мощности на корону в ней больше, чем на крайних проводах.

Таким образом, при заданном фазном напряжении  $U$  воздушной линии потери мощности (энергии) на коронный разряд зависят от отношения  $U_o/U$ .

Поскольку, при прочих равных условиях ( $r_n = \text{const}, n = \text{const}$ ), напряжение  $U_o$  зависит от относительной плотности  $\delta$  атмосферного воздуха, то потери при разных погодных условиях и находящихся на разных высотах н.у.м. ВЛ зависят от параметров  $\delta, t, P, m_c$ . Последние должны быть определены по результатам проводимых измерений метеорологических станций, расположенных вблизи данного участка ВЛ.

**Обсуждение результатов исследования.** В результате применения новых технологий, а также сбора текущих фактических и ретроскопических статистических данных метеорологических станций уже сегодня имеется возможность осуществить почасовые расчеты потерь на коронный разряд в месячном разрезе в пределах точности, допустимых при аналогичных расчетах. Данная методика применена с целью осуществления почасовых расчетов потерь на корону в ВЛ высоковольтной сети электроэнергетической системы РА. Фактические метеорологические данные получают из метеосайта, база данных которого формируется на основе сбора информации от метеорологических станций, расположенных в разных городах РА. В частности, конкретизируются погодные условия, количество осадков (мм), атмосферное давление, температура воздуха, число измерений. Так как метеорологические станции осуществляют сбор количества осадков (мм), о продолжительности которых информация отсутствует, с целью определения продолжительности дождя и снега в часах используются данные об интенсивности ретроскопических статистических осадков. В таблице

приведены погодные условия некоторых городов РА, обработанные за январь 2013г.

Имея продолжительность четырех погодных условий по городам и траекторию ВЛ 220 кВ, осуществляются почасовые расчеты коронного разряда для каждой ВЛ в отдельности.

С целью оценки влияния высоты ВЛ н.у.м. (относительной плотности  $\delta$ ) на величину потерь нами рассчитаны изменения потерь на корону в воздушных линиях 110 – 220 кВ, используемых на территории РА, когда фазное напряжение изменяется на  $\pm 10\%$  по отношению к номинальному. Согласно [4] и исходя из особенностей климатических зон на территории РА, функции  $\frac{P}{b_p} = f\left(\frac{U_o}{U}\right)$  для четырех погодных условий имеют следующий вид:

- при хорошей погоде -  $P^* = 0,0735 - \frac{0,275}{X} + \frac{0,268}{X^2}$ ;
- при сухом снеге -  $P^* = 0,18 - \frac{0,66}{X} + \frac{0,68}{X^2}$ ;
- при дожде -  $P^* = 0,066 - \frac{0,148}{I_c} - \frac{0,024}{I_c^2} - \frac{1}{X} \left( 0,487 + \frac{0,38}{I_c} + \frac{0,0667}{I_c^2} \right) + \frac{1}{X^2} \left( 0,96 + \frac{0,04}{I_c} \right)$ ;
- при изморози -  $P^* = -0,21 - \frac{0,6}{X}$ ,

где  $I_c$  – средняя интенсивность дождя (мм/ч), а  $X = \frac{U_o}{U}$ .

Таблица

Метеорологические данные по городам РА за январь 2013г. (измерения метеостанций)

N	Наименование климатической зоны	Интенсивность осадков, мм/ч	Количество осадков, мм	Продолжительность осадков, ч	Продолжительность по виду погоды, ч			
					хорошая погода	снег	дождь	изморозь
1	Гюмри	0,30	69	228	516	228	0	0
2	Ванадзор	0,38	18	48	696	40	8	0
3	Армавир	0,23	10	42	702	38	4	0
4	Ереван	0,35	7	20	724	16	4	0
5	Раздан	0,60	27	46	698	46	0	0
6	Севан	0,38	9	23	721	23	0	0
7	Гавар	0,35	19	55	689	55	0	0
8	Аргашат	0,29	4	12	732	12	0	0
9	Джермук	1,00	18	18	726	15	3	0
10	Капан	0,48	44	91	653	91	0	0
11	Мегри	0,29	4	12	732	12	0	0

Результаты расчетов представлены в графической форме на рис. 2 и 3 для участков ВЛ 220 кВ с фазными проводами АС-300 ( $r_{\text{п}} = 1,26 \text{ см}$ ;  $H = 7,5 \text{ м}$ ;  $D = 7 \text{ м}$ ), которые проходят на высоте соответственно 2000 м (Севан) и 950 м (Армавир): 1 - хорошая погода; 2 - сухой снег; 3 - дождь; 4 - изморозь.

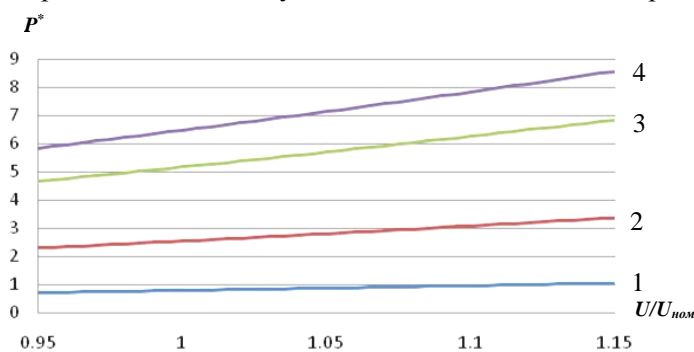


Рис. 2. Зависимость мощности потерь от изменения фазного напряжения при четырех погодных условиях ( $h=2000 \text{ м}$ , Севан)

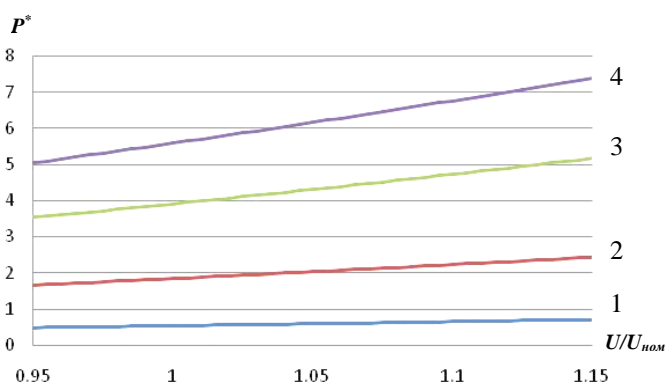


Рис. 3. Зависимость мощности потерь от изменения фазного напряжения при четырех погодных условиях ( $h=950 \text{ м}$ , Армавир)

Сравнение графиков, построенных на рис. 2 и 3, показывает, что при четырех погодных условиях потери мощности на коронный разряд в высокогорных условиях существенно превышают потери, возникающие в проходящих на небольшой высоте над уровнем моря ВЛ с одинаковыми геометрическими параметрами.

### Выводы

1. Разработана математическая модель расчета потерь на коронный разряд в ВЛ в высокогорных условиях.



2. В результате теоретических исследований при учете электростатического взаимодействия между фазами ВЛ выявлено, что напряженность электрического поля на поверхности центрального провода превышает напряженность на поверхности крайних проводов (фаз). Следовательно, расчет потерь на коронный разряд в трехфазной линии необходимо проводить для каждой фазы по отдельности.
3. Сбор метеорологических данных для рассматриваемого месяца и информация о продолжительности разных погодных условий позволяют осуществить расчет потерь на коронный разряд в часовом разрезе в режиме online.

### Литература

1. Руководящие указания 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. - М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1975.
2. Дикамбаев Ш.Б., Костюшко В.А., Ордоков И.О., Емельянов Н.П. Исследование потерь мощности на корону на высокогорных линиях электропередачи переменного тока // В сб.: Исследования и испытания в электропередачах 750-1150 кВ.- М.: Энергоатомиздат, 1991. - С. 240 - 244.
3. Тамазов А.И. Вероятностная методика расчета потерь мощности на корону // Электричество. - 1994. - №5.- С. 24 - 31.
4. Тамазов А.М. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. - М.: Компания “Спутник”, 2002. - 318 с.
5. Егиазарян Л.В., Сафарян В.С., Караханян Л.О., Арутюнян А.С. К вопросу уточнения расчета потерь мощности на корону в высокогорных воздушных линиях электропередачи // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2010. - Т. 63, N1. - С. 52 - 57.

*Поступила в редакцию 20.09.2016.  
Принята к опубликованию 21.12.2016.*

### ԲԱՐՁՐԼԵՌՆԱՅԻՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ 110 կՎ ԵՎ ԲԱՐՁՐ ԼԱՐՄԱՄԲ ՕԴԱՅԻՆ ԳԾԵՐՈՒՄ ՊՍԱԿԱՁԵՎ ՊԱՐՊՄԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

**Լ.Հ. Կարախանյան, Ա.Ս. Հարությունյան**

Ներկայացված են պսակաձև պարպման դեպքում հզորության կորուստների հաշվարկի վերլուծական արտահայտությունները եղանակային տարբեր պայմաններում: Պսակաձև պարպման ինտենսիվությունը օդային գծերի հաղորդալարերի վրա, կայունացված եղանակային պայմաններում, միարժեքորեն կախված է լարումից: Սակայն իրական

պայմաններում օդերևութաբանական իրավիճակը փոխվում է, ինչը հանգեցնում է պասկավորման ինտենսիվության փոփոխականությանը: Օրինակ, եղամի դեպքում պսակի վրա հզորության կորուստները մեկ կարգով մեծ են, քան լավ եղանակի դեպքում: Պսակի վրա հզորության կորուստները կարելի է սահմանափակել՝ կիրառելով ֆազային հաղորդալարերի մակերևույթների վրա էլեկտրական դաշտի ցածր լարվածություն ապահովող կոնստրուկցիաներ: Պսակաձև պարպումը հաղորդալարերի վրա ընթանում է իոնացման պրոցեսներով՝ ծավալային լիցքերի առաջացմամբ, որոնք ծագում են էլեկտրոններով օդի մոլեկուլների հարվածային իոնացման արդյունքում: Հաղորդալարերի վրա պսակաձև պարպման բնութագրերը ճշգրիտ որոշվել չեն կարող: Այդ պատճառով ընդունվում են ենթադրություններ, որոնք էականորեն չեն ազդում հաշվարկի արդյունքների վրա, սակայն հնարավորություն են տալիս ստանալու վերլուծական արտահայտություններ: Աշխատանքում վերլուծական արտահայտությունների հիման վրա կառուցված են գրաֆիկներ, որոնք արտահայտում են հզորության կորուստների փոփոխության ընթացքը ֆազային լարումից՝ օդային էլեկտրահաղորդման գծի բարձրլեռնային և հարթավայրային տեղամասերում:

**Առանցքային բաներ.** փոփոխական հոսանքի պսակաձև պարպում, լարվածություն պսակի սկզբում, ծավալային լիցք, օդերևութաբանական տվյալներ:

## DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE CROWN LOSSES IN THE HIGHLAND OVERHEAD LINES AT 110 kV AND ABOVE

L.H. Karakhanyan, A.S. Harutyunyan

Analytical expressions for calculating the power losses on a crown under different weather conditions are given. The intensity of the crown discharge on wires of air-lines in the established weather conditions unambiguously depends on voltage. However, in actual practice, the meteorological situation changes, leading to a variation of intensity of crowning. For example, at hoarfrost, losses of power on a crown appear to be much more than in good weather. It is possible to limit the power losses on a crown by applying designs of phase wires with lowered electric field strengths on the wire surfaces.

The crown discharge on wires proceeds in the form of ionization processes by the formation of the volume charges, resulting from shock ionization of molecules of the air electrons. The characteristics of the crown discharge on wires cannot be defined precisely. That is why, assumptions which do not significantly influence the results of calculation are accepted, but allow to obtain an analytical solution. In the present article, on the basis of analytical expressions, the diagrams expressing the course of change of power losses from phase voltage for mountain and flat sites of an air-line of an electricity transmission are constructed.

**Keywords:** alternating current, corona discharge, initial electrical field strength, volume charge, meteorological data.