



тему уравнений (1) относительно неизвестных  $Q$ , получим другую систему простых уравнений, предложенных Максвеллом [3]:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{1e}U_1 + C_{12}(U_1 - U_2) + \dots + C_{1k}(U_1 - U_k); \\ Q_2 &= C_{12}(U_2 - U_1) + C_{2e}U_2 + \dots + C_{2k}(U_2 - U_k); \\ &\dots\dots\dots \\ Q_i &= C_{i1}(U_i - U_1) + C_{i2}(U_i - U_2) + \dots + C_{ie}U_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} C_{ie} &= \beta_{i1} + \beta_{i2} + \dots + \beta_{ik}; \\ C_{ik} &= -\beta_{ik}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $C_{ie}$  – емкости относительно земли на единицу длины линии;  $C_{ik}$  – емкости между проводами;  $\beta_{ii}$  – собственные емкостные коэффициенты,  $\beta_{ii} = \beta_{ki}$  – взаимные емкостные коэффициенты.

Решение уравнений (1)...(3) громоздко и занимает много времени. Линейные системы алгебраических уравнений (при любом их числе) проще всего решаются с помощью теории матриц. Матричная запись является весьма компактной, основанной на исключении излишней информации. Эта запись производится сразу для всей группы величин, обладающих какими-либо общими признаками.

**Определение емкостей двухцепных воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ без грозозащитного троса.** Для расчета емкостей двухцепной линии (рис. 1) потенциальные коэффициенты находятся из системы линейных уравнений (1), составленных в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} U_I \\ U_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_I & \alpha_{I-II} \\ \alpha_{II-I} & \alpha_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_I \\ Q_{II} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где I и II – индексы цепей воздушных линий электропередачи; здесь  $\alpha_I$  и  $\alpha_{II}$  – матрицы потенциальных коэффициентов цепей I и II соответственно;  $\alpha_{I-II}$  – матрица взаимных потенциальных коэффициентов между цепями I и II.

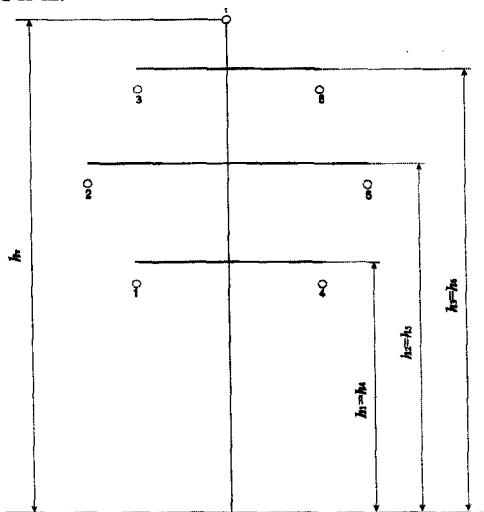


Рис. 1. Двухцепная линия электропередачи: 1, 2, 3 – провода первой цепи воздушной линии; 4, 5, 6 – провода второй цепи воздушной линии;  $h_i$  – высота подвеса проводов;  $h_T$  – высота подвеса троса

В том случае, когда цепи I и II выполнены одним и тем же сечением проводов и расположены на опорах симметрично, в силу симметрии  $\alpha_{I-I} = \alpha_{II-II} = \alpha$  и  $\alpha_{I-II} = \alpha_{II-I} = \alpha_{\text{взаим}}$  (взаимная матрица потенциальных коэффициентов между I и II цепями) эквивалентная матрица потенциальных коэффициентов примет вид:

$$\alpha_s = \alpha + \alpha_{\text{взаим}} = \alpha^*, \quad (5)$$

где

$$\alpha^* = \begin{vmatrix} \alpha_{11}^* & \alpha_{12}^* & \alpha_{13}^* \\ \alpha_{21}^* & \alpha_{22}^* & \alpha_{23}^* \\ \alpha_{31}^* & \alpha_{32}^* & \alpha_{33}^* \end{vmatrix}.$$

Здесь

$$\begin{aligned} \alpha_{11}^* &= \alpha_{11} + \alpha_{14}; & \alpha_{12}^* &= \alpha_{12} + \alpha_{15}; & \alpha_{13}^* &= \alpha_{13} + \alpha_{16}; \\ \alpha_{21}^* &= \alpha_{21} + \alpha_{24}; & \alpha_{22}^* &= \alpha_{22} + \alpha_{25}; & \alpha_{23}^* &= \alpha_{23} + \alpha_{26}; \\ \alpha_{31}^* &= \alpha_{31} + \alpha_{34}; & \alpha_{32}^* &= \alpha_{32} + \alpha_{35}; & \alpha_{33}^* &= \alpha_{33} + \alpha_{36}. \end{aligned}$$

Потенциальные коэффициенты «своей» цепи определяются по формулам [3]:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_{zi}}{r}; \quad \alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{S'_{ik}}{S_{ik}}, \quad (6)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9}$  Ф/км – электрическая постоянная;  $h_{zi}$  – эквивалентная высота подвески  $i$ -го провода над землей, которая определяется как  $h_{zi} = h_i - \frac{2}{3} f_{+15} - l_{\text{гирл}}$ ;  $h_i$  – высота от земли до траверсы опоры (рис. 1);  $f_{+15}$  – стрела провеса провода при среднегодовой температуре без ветра и гололеда;  $l_{\text{гирл}}$  – длина гирлянды изоляторов (при количестве изоляторов, равном трем, значение  $l_{\text{гирл}} = 0,622$  м, шести –  $l_{\text{гирл}} = 1,257$  м);  $S_{ik}$  – расстояние между  $i$ -м и  $k$ -м проводами;  $S'_{ik}$  – расстояние между  $i$ -м проводом и зеркальным отображением  $k$ -го провода;  $r$  – радиус провода.

Потенциальные коэффициенты между I и II цепями определяются по формуле

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H'_{ij}}{D_{ij}}, \quad (7)$$

где  $\alpha_{ij}$  – потенциальные коэффициенты между  $i$ -м проводом первой цепи и  $j$ -м проводом другой цепи;  $D_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м проводом первой цепи и  $j$ -м проводом другой цепи;  $H'_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м проводом первой цепи и зеркальным отражением  $j$ -го провода другой цепи.

Собственные и взаимные емкостные коэффициенты вычисляются

$$\beta_{ik} = \frac{(-1)^{i+k} M_{ik}}{\Delta}, \quad (8)$$

где  $\Delta$  – определитель матрицы  $\alpha^*$ ;  $M_{ik}$  – соответствующий минор, получающийся вычеркиванием из определителя матрицы  $\alpha^*$   $i$ -й строки и  $k$ -го столбца.

Значения емкостей проводов относительно земли определяются по формуле (3).

Матрицу емкостных проводимостей имеет смысл составлять только тогда, когда на двухцепных линиях подвешены провода различного сечения или цепи имеют различное номинальное напряжение. Последние два обстоятельства на практике иногда имеют место.

Рассмотрим случаи, когда одна из двухцепных линий с симметричным расположением одинаковых по сечению проводов отключена, но не заземлена или, наоборот, заземлена.

В первом случае при отключенной и изолированной линии ее провода оказывают некоторое влияние, так как, имея наведенный от другой линии потенциал, несколько изменяют электрическое поле работающей линии. Отмеченное изменение поля приводит к некоторому увеличению емкости относительно земли линии, находящейся под напряжением. Тогда емкости на землю «рабочей» линии представляются в виде

$$C'_{ie} = C_{ie} + \sum_{\substack{i=1,2,3 \\ j=4,5,6}}^6 \frac{C_{ij}C_{ie}}{C_{ij} + C_{ie}}, \quad (9)$$

где  $C_{ie}$  – емкость  $i$ -го провода относительно земли первой цепи на единицу длины линии;  $C_{ij}$  – межцепная емкость между  $i$ -м проводом первой цепи и  $j$ -м проводом второй цепи.

Заземление отключенной линии равносильно тому, что провод приобретает вынужденный потенциал земли, равный нулю, т. е. к проводу присоединяется земля. Емкости на землю «рабочей» линии  $C_{ie}$  возрастут и станут больше, чем емкости, определенные при работе двух цепей, так как емкости на землю  $C_{je}$  второй цепи закорочены, а емкости  $C_{ie}$  и  $C_{je}$  соединены параллельно. Тогда для второго случая имеем

$$C^*_{ie} = C_{ie} + C_{ij}. \quad (10)$$

Очевидно, что  $C^*_{ie} > C'_{ie}$ .

**Определение емкостей двухцепных воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ с грозозащитным тросом.** При наличии грозозащитного троса (рис. 1) исходное уравнение (4) несколько усложняется, так как приходится рассматривать наличие трех систем проводов – одной цепи, второй цепи и троса. Поэтому блок-матрица запишется как

$$\begin{bmatrix} U_I \\ U_{II} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{I-I} & \alpha_{I-II} & \alpha_{I-T} \\ \alpha_{II-I} & \alpha_{II-II} & \alpha_{II-T} \\ \alpha_{I-T} & \alpha_{II-T} & \alpha_{T-T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_I \\ Q_{II} \\ Q_T \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где  $\alpha_{I-T}$  и  $\alpha_{II-T}$  – соответственно матрицы потенциальных коэффициентов между проводом I и II цепи и тросом;  $\alpha_{I-T}$  и  $\alpha_{II-T}$  – соответственно транспонированная матрица потенциальных коэффициентов между проводом I и

II цепи и тросом;  $\begin{bmatrix} Q_I \\ Q_{II} \\ Q_T \end{bmatrix}$  – матрица зарядов на единицу длины проводов I и

II цепи и тросом.

В случае двух одинаковых симметрично размещенных на опоре проводов эквивалентная матрица потенциальных коэффициентов примет вид:

$$\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_{II} - \alpha_{I-T} \frac{1}{\alpha_{TT}} \alpha_{I-TT} \quad (12)$$

или

$$\alpha_3 = \begin{vmatrix} \alpha'_{11} & \alpha'_{12} & \alpha'_{13} \\ \alpha'_{21} & \alpha'_{22} & \alpha'_{23} \\ \alpha'_{31} & \alpha'_{32} & \alpha'_{33} \end{vmatrix};$$

где

$$\alpha'_{11} = \alpha_{11}^* - \frac{\alpha_{1T}^2}{\alpha_{TT}}; \quad \alpha'_{22} = \alpha_{22}^* - \frac{\alpha_{2T}^2}{\alpha_{TT}}; \quad \alpha'_{33} = \alpha_{33}^* - \frac{\alpha_{3T}^2}{\alpha_{TT}};$$

$$\alpha'_{12} = \alpha'_{21} = \alpha_{12}^* - \frac{\alpha_{1T}\alpha_{2T}}{\alpha_{TT}}; \quad \alpha'_{13} = \alpha'_{31} = \alpha_{13}^* - \frac{\alpha_{1T}\alpha_{3T}}{\alpha_{TT}}; \quad \alpha'_{23} = \alpha'_{32} = \alpha_{23}^* - \frac{\alpha_{2T}\alpha_{3T}}{\alpha_{TT}};$$

$$\alpha_{TT} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_T}{r_T}; \quad \alpha_{iT} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{S'_{iT}}{S_{iT}}.$$

Здесь  $\alpha_{ik}^*$  вычисляются по формуле (5);  $h_T$  – эквивалентная высота подвески троса над землей;  $r_T$  – радиус троса.

Вначале определяются численные значения всех элементов матрицы потенциальных коэффициентов  $\alpha_3$ , а затем – собственные и взаимные емкостные коэффициенты и далее в соответствии с формулой (3) – значения емкостей провода относительно земли.

При несимметрии расположения проводов цепей, а также при отключении одной цепи расчеты выполняются аналогично.

Значения фазных емкостей относительно земли, определенные по выражениям (3), (9) и (10) в зависимости от типа и геометрических размеров опор, для двухцепных воздушных линий напряжением 35 кВ и 35–110 кВ (рис. 2) приведены соответственно в табл. 1, 2.

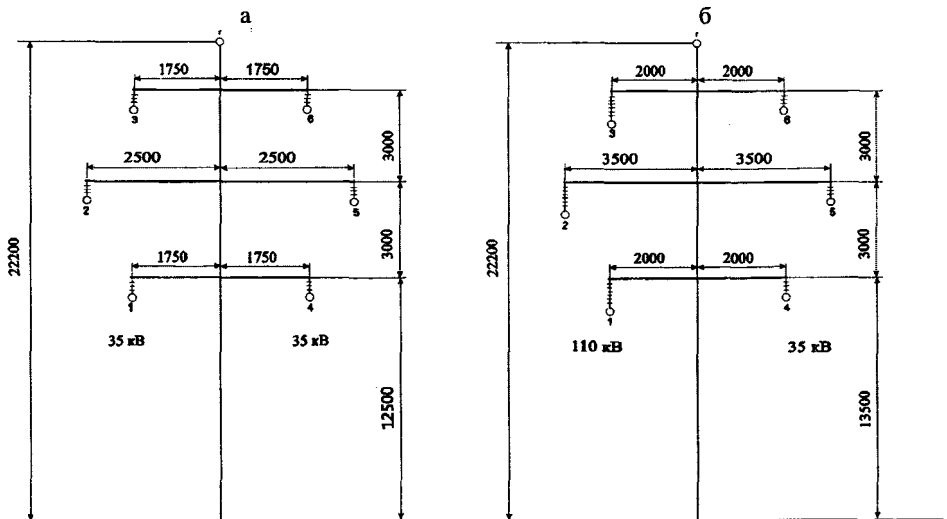


Рис. 2. Двухцепные промежуточные опоры: а – 35 кВ типа ПБ 35-2; б – 35–110 кВ типа ПБ 110-2

Таблица 1

## Емкости относительно земли двухцепных воздушных линий напряжением 35 кВ

Емкости проводов относительно земли, пФ/км, сечением							Примечание
Емкости фаз	АС-95		АС-120		АС-150		
	без троса	с тросом	без троса	с тросом	без троса	с тросом	
$C_1=C_4$	3,930	4,096	3,895	4,063	3,970	4,140	Включены обе цепи
$C_2=C_5$	3,189	3,478	3,162	3,456	3,198	3,498	
$C_3=C_6$	3,198	3,829	3,186	3,834	3,227	3,901	
$C_{cp}$	3,439	3,801	3,414	3,784	3,465	3,847	
$C_1=C_4$	5,602	5,724	5,641	5,767	5,794	5,924	Одна цепь отключена
$C_2=C_5$	4,810	5,021	4,841	5,059	4,946	5,171	
$C_3=C_6$	5,046	5,525	5,095	5,595	5,215	5,741	
$C_{cp}$	5,153	5,423	5,193	5,474	5,318	5,612	
$C_1=C_4$	5,953	6,036	6,032	6,116	6,218	6,303	Одна цепь отключена и заземлена
$C_2=C_5$	5,120	5,264	5,179	5,326	5,307	5,458	
$C_3=C_6$	5,573	5,888	5,665	5,989	5,833	6,169	
$C_{cp}$	5,548	5,729	5,625	5,810	5,786	5,977	

## Примечания:

1. Длины пролетов равны 230, 255, 255 м соответственно для проводов марок АС-95, АС-120, АС-150.

2. Стрелы провеса определены для II района по гололеду. Среднее значение емкости относительно земли  $C_{cp} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 C_i$ , где  $C_i$  – емкость на землю фазы.

Таблица 2

## Емкости относительно земли двухцепных воздушных линий напряжением 110 кВ (левая цепь) и 35 кВ (правая цепь)

Емкости проводов относительно земли, пФ/км, сечением							
Емкости фаз		АС-120	АС-70	АС-120	АС-95	АС-120	АС-120
левая цепь	правая цепь	левая цепь	правая цепь	левая цепь	правая цепь	левая цепь	правая цепь
$C_1$	$C_4$	4,372	3,953	4,351	4,026	4,450	4,182
$C_2$	$C_5$	3,884	3,690	3,867	3,746	3,926	3,853
$C_3$	$C_6$	4,070	3,993	4,046	4,066	4,080	4,168
$C_{cp}$	$C_{cp}$	4,109	3,879	4,088	3,946	4,152	4,068
$C_1$	$C_4$	Отключена	5,619	Отключена	5,718	Отключена	5,863
$C_2$	$C_5$		4,979		5,050		5,146
$C_3$	$C_6$		5,528		5,624		5,727
$C_{cp}$	$C_{cp}$		5,375		5,464		5,579
$C_1$	$C_4$	Отключена и заземлена	5,903	Отключена и заземлена	6,014	Отключена и заземлена	6,149
$C_2$	$C_5$		5,132		5,208		5,299
$C_3$	$C_6$		5,798		5,905		6,008
$C_{cp}$	$C_{cp}$		5,611		5,709		5,819

## Примечания:

1. Длины пролетов равны 215, 235, 250 м соответственно для проводов марок АС-120-АС-70, АС-120-АС-95, АС-120-АС-120.

2. Стрелы провеса определены для II района по гололеду. Среднее значение емкости относительно земли  $C_{cp} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 C_i$ , где  $C_i$  – емкость на землю фазы.

Из данных табл. 1, 2 видно, что емкости проводов одной цепи двухцепной линии меньше примерно на 33...36 % по сравнению с емкостями про-

водов одноцепной линии. Подвеска на линии напряжением 35 кВ заземленного грозозащитного троса приводит к увеличению емкости проводов примерно на 10 %. Отключение одной цепи двухцепной линии напряжением 35 кВ увеличивает емкости работающей линии на 43...46 и 50...53 % при наличии и отсутствии грозозащитного троса и соответственно на 51...55 и 61...67 % – в случае заземления отключенной линии. Полученные данные отличаются от приведенных [2] в 1,1...2,2 раза.

Нами определено, что емкость линии напряжением 35 кВ, расположенной на двухцепных опорах с цепями различных номинальных напряжений (например, 35 кВ и 110 кВ), увеличивается на 38 % (при отключении цепи напряжением 110 кВ и отсутствии ее заземления) и на 44 % (если цепь напряжением 110 кВ отключена и заземлена).

Установлено, что при минимально допустимом расстоянии между крайними проводами параллельно проложенных воздушных линий 35 кВ, равном 4 м [4], емкость рассматриваемой линии уменьшается примерно на 28 %; при расстоянии 30 м – на 4 %. При отключении и заземлении одной цепи емкость другой, расположенной на минимально допустимом расстоянии (4 м), увеличивается на 4 и 7 %.

Отметим, что полученные данные по значению емкостей двухцепных воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ не учитывают влияние емкости изоляции в связи с отсутствием однозначных данных по этому поводу в технической литературе.

## ВЫВОДЫ

Получены значения емкостей воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ, расположенных на двухцепных опорах, в зависимости от режима работы второй цепи, отличающиеся от приведенных в литературных источниках в 1,1...2,2 раза при отключенной и незаземленной второй линии и при отключенной и заземленной второй линии.

Установлено, что при отключении цепи напряжением 110 кВ емкость работающей линии напряжением 35 кВ, расположенной на тех же опорах, что и цепь 110 кВ, увеличивается на 38 %; при заземлении цепи напряжением 110 кВ – на 44 %.

При параллельном следовании линий 35 кВ емкость данной линии при расстоянии между осями крайних проводов, равном 4 м, уменьшается на 28 % по сравнению с емкостью одноцепной линии, или на 4 % (при расстоянии между осями крайних проводов 30 м). Если одна из цепей линии только отключается, но не заземляется, то емкость оставшейся линии увеличивается на 4 %; если одна из цепей линии не только отключается, но и заземляется, то емкость рассматриваемой линии возрастает на 7 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сирота И. М., Кисленко С. Н., Михайлов А. М. Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наук. думка, 1985. – 264 с.
2. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. – М.: Энергия, 1971. – 104 с.
3. Иосель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
4. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.