

\* \* \*

## О режимных особенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ

ЗАРУДСКИЙ Г.К., САМАЛЮК Ю.С.

*Проанализированы математически и сопоставлены изменения режимных параметров (напряжения и реактивной мощности) реальных воздушных линий электропередачи 220 кВ компактного и стандартного исполнения. Предложены новые универсальные выражения для расчета перепадов напряжения в некоторых характерных режимах.*

**Ключевые слова:** воздушная линия, конструкции, перепад напряжения, реактивная мощность, переток

Одним из способов повышения пропускной способности линий электропередачи является сооружение их в компактном исполнении. Строительство таких линий ведет к снижению полосы отчуждения и материалоемкости опор, что, в частности, приводит к повышению экономичности линий электропередачи напряжением 220 кВ.

Принцип создания компактных воздушных линий 220 кВ основан на уменьшении расстояния между фазами линии и переходе к расщепленным фазам. Это приводит к снижению индуктивного и волнового сопротивлений линии электропередачи. Компактные линии создают меньшую напряженность электрического поля не только вокруг проводов, но и на уровне земли. Сооружение таких линий многоцепными может позволить передачу повышенных мощностей. Компактные линии напряжением 220 кВ могут составить конкуренцию обычным линиям с номинальным напряжением 500 кВ, работающим в недогруженном состоянии.

*Variations of the operating parameters (voltage and reactive power) of real compact and standard 220 kV overhead power lines are mathematically analyzed and compared with each other. New universal expressions for calculating voltage differences in some characteristic modes of operation are proposed.*

**Key words:** overhead power line, designs, voltage difference, reactive power, flow

В настоящее время на территории Российской Федерации уже более 20 лет успешно работает компактная линия 330 кВ с четырьмя проводами в фазе между Псковской ГРЭС и ПС Новоскольниковки длиной 150 км. У данной линии расстояние между проводами соседних фаз уменьшено на 40% (до 5,5 м вместо 9 м на унифицированных опорах), а пропускная способность существенно возросла по сравнению с линиями традиционного исполнения.

Конструктивные параметры линий электропередачи компактной конструкции приведены в [1 и 2], где были рассмотрены различные конфигурации таких линий. К сожалению, режимные особенности компактных воздушных линий 220 кВ в настоящее время плохо изучены, а малый опыт эксплуатации и недостаточность разработок в области конструкции опор компактных воздушных линий тормозят их внедрение. Данная статья касается некоторых режимных особенностей таких линий.

В режимах с равными зафиксированными значениями напряжения по концам у компактных линий 220 кВ возникают сквозные перетоки реактивной мощности, направленные в сторону передающего конца, т.е. противоположно потоку активной мощности. Режимы с повышенными значениями напряжения на отправном конце по сравнению с напряжением на приемном конце позволяют избежать такой ситуации. Перепад напряжения можно подобрать таким образом, что, например, значение реактивной мощности в начале линии  $Q_1 = 0$  (рис. 1) или значение внутренней реактивной мощности в конце линии  $Q_2 = 0$  и  $Q_2 > 0$ , или реактивные мощности по концам линии были бы равны по модулю, но имели разные направления  $Q_1 = -Q_2$  (т.е.  $Q_1 + Q_2 = 0$ ).

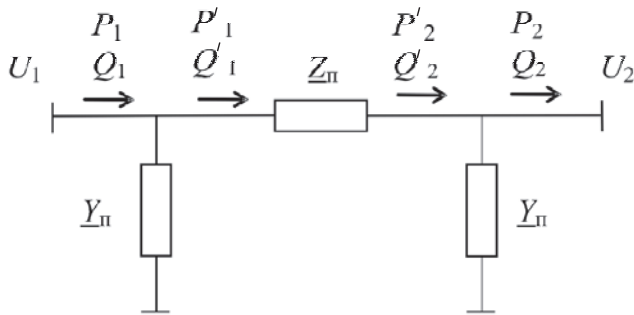


Рис. 1. П-образная схема замещения линии

Чтобы получить выражения для перепадов напряжения, которые соответствуют вышеперечисленным значениям реактивных мощностей по концам линии, представим линию П-образной схемой замещения и примем условно положительные направления потоков мощностей как показано на рис. 1. В данной схеме замещения  $Z_{\pi}$  – комплексное продольное сопротивление, включающее в себя активное и индуктивное сопротивления продольной ветви, т.е.  $Z_{\pi} = r_{\pi} + jx_{\pi} = z_{\pi} \text{Dj}_{\pi}$ , а поперечная проводимость  $Y_{\pi} = g_{\pi} + jb_{\pi}$  включает в себя активную и емкостную проводимость. В статье (см. далее результаты расчетов) не учитываются потери активной мощности при коронировании проводов, поэтому поперечная проводимость  $g_{\pi}$  не несет физического смысла (отбор активной мощности) и имеет только математический смысл от использования П-образной схемы замещения.

Мощность по концам линии  $Q_1$  и  $Q_2$  можно выразить через внутреннюю реактивную мощность начала и конца линии ( $Q_{\phi}$  и  $Q_{\psi}$ ):

$$Q_1 = Q_{\phi} - b_{\pi} U_1^2, \tag{1}$$

$$Q_2 = Q_{\psi} + b_{\pi} U_2^2. \tag{2}$$

Относительные значения мощности  $Q_{\phi}$  и  $Q_{\psi}$  рассчитываются по формулам:

$$Q_{\phi}^* = \frac{x_{\pi}}{z_{\pi}} - \sqrt{\frac{1}{k^2} - \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} P_{\phi}^* - \frac{r_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{U}_1^2}}; \tag{3}$$

$$Q_{\psi}^* = -\frac{x_{\pi}}{z_{\pi}} - \sqrt{k^2 - \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} P_{\psi}^* + \frac{r_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_2^2}{\dot{U}_2^2}}. \tag{4}$$

Здесь внутренние активная и реактивная мощности начала линии выражены в отн. ед. базисной мощности  $S_{\text{баз1}} = U_1^2 / z_{\pi}$  ( $P_{\phi}^*$ ,  $Q_{\phi}^*$ ) или  $S_{\text{баз2}} = U_2^2 / z_{\pi}$  для мощности в конце линии ( $P_{\psi}^*$ ,  $Q_{\psi}^*$ ). Внутренние активные мощности по концам линии, выраженные в именованных единицах, рассчитываются следующим образом:

$$P_{\phi} = P_1 - g_{\pi} U_1^2; \tag{5}$$

$$P_{\psi} = P_2 - g_{\pi} U_2^2. \tag{6}$$

После некоторых математических преобразований получим формулы для перепада напряжения  $k$  при заданных параметрах начала линии и при  $Q_1 = 0$ :

$$k = \frac{1}{\sqrt{\frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} \frac{x_{\pi}}{z_{\pi}} - z_{\pi} b_{\pi} \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{U}_1^2} + \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} P_{\phi}^* - \frac{r_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{U}_1^2}}}, \tag{7}$$

или при заданных параметрах конца линии и при  $Q_2 = 0$ :

$$k = \sqrt{\frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} \frac{x_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_2^2}{\dot{U}_2^2} + \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} P_{\psi}^* + \frac{r_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_2^2}{\dot{U}_2^2}}, \tag{8}$$

Также можно получить формулу для такого перепада напряжения при известных данных начала линии  $U_1$  и  $P_1$ , при котором  $Q_1 + Q_2 = 0$ :

$$\sqrt{\frac{1}{k^2} - \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} P_{\phi}^* - \frac{r_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{U}_1^2}} - 2 S_{\text{баз1}} \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} \frac{x_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{U}_1^2} - \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{U}_1^2} = \frac{1}{k^2} \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} \frac{x_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_2^2}{\dot{U}_2^2} + \frac{g_{\pi}}{b_{\pi}} P_{\psi}^* + \frac{r_{\pi}}{z_{\pi}} \frac{\dot{U}_2^2}{\dot{U}_2^2} + \frac{\dot{U}_2^2}{\dot{U}_2^2} - 2 \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{U}_2^2} \frac{x_{\pi}}{z_{\pi}} S_{\text{баз1}} + b_{\pi} U_1^2. \tag{9}$$

Чтобы формула не выглядела громоздко, введем обозначения —  $a, b, c, d$  и  $\frac{1}{k^2} = y$  и получим следующее уравнение:

$$(\sqrt{y-a})b = yc + d. \tag{10}$$

Возводим в квадрат обе части уравнения (10) и после некоторых преобразований получим квадратное уравнение относительно  $y$ :

$$y^2 \frac{ac}{eb} + y \frac{cd}{b^2} - \frac{\ddot{a}}{e} \frac{cd}{eb} + a \frac{\ddot{a}}{e} = 0. \tag{10\phi}$$

Корни этого уравнения:

$$y_1 = \frac{-\frac{cd}{b^2} - \frac{\ddot{a}}{e} \sqrt{\frac{cd}{b^2} - \frac{\ddot{a}}{e}} - \frac{ac}{eb}}{\frac{ac}{eb}};$$

$$y_2 = \frac{-\frac{cd}{b^2} - \frac{\ddot{a}}{e} \sqrt{\frac{cd}{b^2} - \frac{\ddot{a}}{e}} + \frac{ac}{eb}}{\frac{ac}{eb}}.$$

Поскольку было принято обозначение  $1/k^2 = y$ , то можно получить следующие значения перепада напряжения, используя полученные корни  $y_1$  и  $y_2$ :

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{y_1}}; k_2 = \frac{1}{\sqrt{y_2}}; k_3 = -\frac{1}{\sqrt{y_1}}; k_4 = -\frac{1}{\sqrt{y_2}}.$$

Отрицательные значения  $k_3, k_4$  не имеют смысла в данной задаче, а  $k_1, k_2$  необходимо проанализировать: необходимо убедиться, являются ли оба значения  $k_1, k_2$  корнями уравнения. Как показали численные расчеты,  $k_2$  является корнем уравнения, а  $k_1$  является посторонним корнем.

Аналогичным образом можно получить формулу для такого перепада напряжения при известных данных конца линии  $U_2$  и  $P_2$ , при котором  $Q_1 + Q_2 = 0$ :

$$\sqrt{\frac{1}{k^2} - \frac{P_2}{z_{\Pi}} + \frac{r_{\Pi}}{z_{\Pi}} \frac{\ddot{a}}{e} - 2S_{\text{баз1}} \frac{c}{e} - \frac{x_{\Pi}}{z_{\Pi}} \frac{\ddot{a}}{e}} = k \frac{c}{e} b_{\Pi} U_1^2 - \frac{x_{\Pi}}{z_{\Pi}} S_{\text{баз2}} \frac{\ddot{a}}{e} +$$

$$+ \frac{P_2}{z_{\Pi}} - \frac{r_{\Pi}}{z_{\Pi}} \frac{\ddot{a}}{e} - (P_2)^2 + 2 \frac{x_{\Pi}}{z_{\Pi}} S_{\text{баз2}} - b_{\Pi} U_2^2 \tag{11}$$

Обозначив  $k^2 = y$ , получаем уравнение, аналогичное (10), которое относительно неизвестной  $y$  имеет такие же корни, как в предыдущем случае, а относительно  $k$ :

$$k_1 = \sqrt{y_1}; k_2 = \sqrt{y_2}; k_3 = -\sqrt{y_1}; k_4 = -\sqrt{y_2}.$$

Как и в предыдущей задаче, отрицательные значения  $k_3, k_4$  не имеют смысла. После проведения численных расчетов можно заключить, что  $k_2$  является корнем уравнения, а  $k_1$  является посторонним корнем.

В [3] из условия  $Q_1^* + Q_2^* = 0$  было получено рас-

четное выражение для определения значений перепада напряжения, при которых концевые реактивные мощности будут равны и противоположно направлены:

$$k_Q = (1 + 2P_2(b_0 l - \text{tg} j_z \text{tg} l))^{1/2}, \tag{12}$$

где  $b_0$  — коэффициент затухания волны;  $l$  — волновая длина линии;  $j_z$  — фазный угол волнового сопротивления.

Однако выражение (12) получено при условии, что отношение удельных активного и реактивного сопротивлений  $r_0/x_0$  и отношение активной и емкостной проводимости  $g_0/b_0$  являются малыми параметрами, при этом имеет место соотношение  $\frac{g_0}{b_0} \approx \frac{r_0}{x_0} \ll 0,1$ . Данное условие было справедливо для линий сверхвысокого напряжения [3].

В свою очередь, выражения (9) и (11) являются общими, и они справедливы для отношения удельных активного и реактивного сопротивлений  $r_0/x^3 \ll 0,1$  (отношение этих параметров для линий 220 кВ находится в интервале от 0,17 до 0,38 в зависимости от используемой марки проводов при одном–двух проводах в фазе).

Для сравнения результатов, полученных по (11) и (12), была проведена серия расчетов для линии напряжением 500 кВ длиной 500 км с использованием проводов 3' (АС 500/64). При изменении активной передаваемой мощности в диапазоне от 600 до 1000 МВт значения перепадов напряжения отличаются лишь в четвертом знаке после запятой при заданном напряжении в конце линии, равном 500 кВ. Разница значений реактивных мощностей на концах воздушной линии при перепадах, опре-

Условие расчета	Марка провода	Среднегеометрическое расстояние $D_{сг}$ , м	Параметр режима							
			$U_1$ , кВ	$P_1$ , МВт	$Q_1$ , Мвар	$U_2$ , кВ	$P_2$ , МВт	$Q_2$ , Мвар	$k$	
Стандартные линии										
$Q_1=0$	АС 400/51 ( $r_0/x_0 = 0,179$ )	7	252	10	0	242,384	9,786	42,101	1,0397	
				110			239,073	106,420	22,548	1,0541
				200			241,927	188,592	-21,135	1,0416
$Q_{\Sigma}=0$	То же	7	220,859	10,055	-16,968	220	10	17,043	1,0039	
			253,272	214,772	60,521		200	17,043	1,1512	
$Q_1 = - Q_2$	То же	7	252	10	-22,218	251,269	9,924	22,218	1,0029	
				200	11,465	237,337	188,412	-11,465	1,062	
$Q_1=0$	АС 300/39 ( $r_0/x_0 = 0,231$ )	7	252	10	0	242,164	9,728	41,158	1,0406	
				130			236,543	123,533	13,078	1,0653
				200			238,131	185,010	-24,007	1,0582
$Q_{\Sigma}=0$	То же	7	221,117	10,095	-16,636	220	10	16,679	1,0051	
			258,736	219,426	61,811		200	16,679	1,1761	
$Q_1 = - Q_2$	То же	7	252	10	-21,720	251,039	9,903	21,720	1,0038	
				200	13,042	232,718	184,738	-13,042	1,0829	
Компактные линии										
$Q_1=0$	2' АС 205/27 ( $r_0/x_0 = 0,220$ )	7	252	10	0	242,521	9,695	51,982	1,0391	
				160			237,269	152,689	18,611	1,0621
				200			237,561	188,731	0,439	1,0908
	$(r_0/x_0 = 0,227)$	6	252	10	0	242,513	9,678	53,622	1,0391	
				170			236,905	161,756	17,046	1,0637
				200			237,052	188,714	3,441	1,0631
	$(r_0/x_0 = 0,235)$	5	252	10	0	242,504	9,654	55,699	1,0392	
				190			236,433	179,763	11,733	1,0658
				200			236,468	188,691	7,123	1,0657
$Q_{\Sigma}=0$	То же	7	220,826	10,091	-20,989	220	10	20,999	1,0038	
			246,947	214,494	40,022		200	20,999	1,1225	
		6	220,825	10,094	-21,659	220	10	21,659	1,0037	
			246,313	214,498	37,356		200	21,659	1,1196	
		5	220,823	10,099	-22,507	220	10	22,495	1,0037	
			245,585	214,503	34,139		200	22,495	1,1163	
$Q_1 = - Q_2$	То же	7	252	10	-27,411	251,285	9,902	27,411	1,0028	
				200	-0,235	237,638	188,734	0,235	1,0604	
		6	252	10	-28,276	251,285	9,897	28,276	1,0028	
				200	-1,845	237,637	188,741	1,845	1,0604	
		5	252	10	-29,373	251,285	9,891	29,373	1,0028	
				200	-3,815	237,637	188,749	3,815	1,0604	
$Q_1=0$	2' АС 150/24 ( $r_0/x_0 = 0,309$ )	7	252	10	0	242,223	9,577	51,174	1,0404	
				200			231,902	183,939	-2,165	1,0867
	$(r_0/x_0 = 0,319)$	6	252	10	0	242,216	9,553	52,765	1,0404	
				200			231,376	183,916	0,756	1,0891
	$(r_0/x_0 = 0,330)$	5	252	10	0	242,207	9,521	54,778	1,0404	
				200			230,768	183,886	4,332	1,0920

$Q_{\Sigma} = 0$	2' АС 150/24 ( $r_0/x_0 = 0,309$ )	7	221,168	10,128	-20,749	220	10	20,699	1,0053
			253,738	220,680	39,931		200	20,699	1,1534
	(r <sub>0</sub> /x <sub>0</sub> = 0,309)	6	221,166	10,132	-21,401	220	10	21,340	1,0053
			253,111	220,685	37,245		200	21,340	1,1505
	(r <sub>0</sub> /x <sub>0</sub> = 0,309)	5	221,164	10,139	-22,227	220	10	22,151	1,0053
			252,393	220,692	34,004		200	22,151	1,1472
$Q_1 = -Q_2$	То же	7	252	10	-26,985	250,981	9,863	26,985	1,0041
				200	1,163	231,509	183,914	-1,163	1,0885
		6	252	10	-27,824	250,981	9,856	27,824	1,0041
				200	-0,406	231,508	183,924	0,406	1,0885
		5	252	10	-28,887	250,982	9,848	28,887	1,0041
				200	-2,322	231,507	183,936	2,322	1,0885

деляемых по (11) и (12), составила от 3,94 до 4,98 Мвар. В процентах натуральной мощности ( $S_{\text{нат}} \approx 875 \text{ МВА}$ ) эта разница составляет 0,45–0,56, что подтверждает правильность и точность выражений (9) и (11).

Для расчетов режимов линий напряжением 220 кВ стандартного исполнения были рассмотрены линии со следующими параметрами: провода марок АС 240/32, АС 300/39 и АС 400/51, среднегеометрическое расстояние между проводами  $D_{\text{сг}} = 7 \text{ м}$  (например, на стандартной железобетонной опоре марки ПБ 220-1 или многогранной опоре марки ПМБ 220-1 с треугольным расположением фаз  $D_{\text{сг}} = 7,041 \text{ м}$ ; на железобетонной опоре порталного типа ПСБ 220-1  $D_{\text{сг}} = 7,282 \text{ м}$ , на опорах других типов  $D_{\text{сг}} > 7,7 \text{ м}$ ).

Для линий компактного исполнения принимались следующие параметры: провода марок 2' (АС 120/19), 2' (АС 150/24), 2' (АС 185/29) и 2' (АС 205/27); шаг расщепления 20 см; среднегеометрическое расстояние между проводами на опоре было принято условно 7, 6 и 5 м. Длина линии в обоих случаях принималась одинаковой 250 км.

Для линий стандартного и компактного исполнения при различных значениях перепада напряжения была проведена серия расчетов, результаты которых представлены в таблице.

1. *Перепад напряжения соответствует  $Q_{\Sigma} = 0$ ,  $U_1 = 252 \text{ кВ}$ .* В данном случае при варьировании передаваемой мощности от 10 до 200 МВт напряжение  $U_2$  имеет минимум при некотором промежуточном значении мощности, а перепад имеет максимум для больших сечений проводов (см. таблицу: например, для линии с проводами 2' (АС 205/27) при  $D_{\text{сг}} = 7 \text{ м}$  и  $P_1 = 160 \text{ МВт}$  максимальное значение перепада напряжения  $k = 1,0621$ , а для линии с проводами 2' (АС 150/24) перепад монотонно возрастает). При этом реактивная мощность  $Q_2$  при увеличении активной мощности уменьшается и при больших значениях активной мощности даже меняет свое направление на противоположное. Следует отметить, что при передаче малых мощностей наблюдается избыток реактивной мощности и у стандартной и у компактной линии. А при передаче мощности больше натуральной ( $P_{\text{нат.стн}} = 120, 126 \text{ МВт}$ ;  $P_{\text{нат.кмп}} = 149, 156 \text{ МВт}$ ) дефицит реактивной мощности больше у стандартной линии, чем у компактной, причем чем меньше расстояние  $D_{\text{сг}}$ , тем

меньше этот дефицит. Это объясняется тем, что генерация реактивной мощности у линий компактного исполнения больше, чем у линий стандартного исполнения  $b_{\text{п.стн}} = 3,39 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,521 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ ;  $b_{\text{п.кмп}} = 4,228 \cdot 10^{-4}$ ,  $4,339 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ ).

2. *Перепад напряжения соответствует  $Q_{\Sigma} = 0$ ,  $U_2 = 220 \text{ кВ}$ .* В этом случае расчет ведется по данным конца линии и для значений передаваемой мощности в рассматриваемом диапазоне реактивная мощность  $Q_2 = b_{\text{п}} U_2^2$  имеет одно и то же значение для каждой конкретной линии и положительное направление. Однако при больших значениях активной мощности имеет место превышение наибольшего рабочего значения напряжения (252 кВ), на передающем конце линии, причем для стандартных линий это превышение больше, чем для компактных, и оно увеличивается при уменьшении сечения провода. Так, при передаче мощности больше натуральной и равной 200 МВт для линии с проводами АС 240/32  $U_1 = 263,838 \text{ кВ}$ , а для линии с 2' (АС 120/19) и  $D_{\text{сг}} = 6 \text{ м}$  (5 м для данной марки проводов – недопустимое расстояние по условию отсутствия коронирования проводов)  $U_1 = 257,716 \text{ кВ}$ .

Необходимо также отметить, что во всех режимах, соответствующих такому перепаду напряжения, при котором  $Q_{\Sigma} = 0$ , нагрузочные потери активной мощности наименьшие по сравнению с остальными режимами, в которых условие  $Q_{\Sigma} = 0$  не выполняется.

3. *Перепад напряжения соответствует  $Q_1 = -Q_2$ .* Реактивная мощность при передаче малых активных мощностей стекает с линии в оба конца, причем для компактных линий ее значение больше, чем для стандартной. А при передаче больших активных мощностей реактивная мощность втекает в линию, однако у компактных линий при значениях мощности, близких к 200 МВт, реактивная мощность в некоторых случаях стекает с линии так же как и при малых передаваемых мощностях. Так например, для компактных линий с проводами 2' (АС 205/27) реактивная мощность в начале линии  $Q_1 = (-0,235), (-3,815) \text{ Мвар}$ ; при использовании проводов 2' (АС 150/24)  $Q_1 = -0,406 \text{ Мвар}$  ( $D_{\text{сг}} = 6 \text{ м}$ ) и  $Q_1 = -2,322 \text{ Мвар}$  ( $D_{\text{сг}} = 5 \text{ м}$ ) (см. таблицу).

Для поддержания равенства  $Q_1 = -Q_2$  при уменьшении сечения провода необходимо создавать больший перепад напряжения: 1,1813 для проводов АС 240/32, а для проводов 2' (АС 120/19)  $k = 1,189$  ( $D_{\text{сг}} = 6 \text{ м}$ ).

**Выводы.** 1. В отличие от линий сверхвысокого напряжения у линий 220 кВ отношение удельных активного и реактивного сопротивлений  $r_0 / x_0 > 0,1$ . В связи с этим обстоятельством в режимах с равными напряжениями по концам линии при учете активного сопротивления возникают сквозные перетоки реактивной мощности, направленные в сторону, противоположную направлению потока активной мощности. Причем у линий компактного исполнения этот эффект проявляется более заметно, чем у традиционных линий. Поэтому для изменения направления реактивной мощности необходимо создавать перепад напряжения по концам линии.

2. Предложенные новые универсальные формулы для расчета внутренних реактивных мощностей линий позволяют получить выражения для определения таких перепадов напряжения, при которых:

значение реактивной мощности в начале линии  $Q_1 = 0$  (такая ситуация возможна в случае, когда на передающем конце линии имеется источник электроэнергии, который работает с  $\cos \varphi = 1$  и не имеет возможности потреблять реактивную мощность);

значение внутренней реактивной мощности в конце линии  $Q_{\text{вн}} = 0$  и реактивная мощность в конце линии  $Q_2 > 0$  (в данном случае при фиксированном значении напряжения в конце линии  $U_2$ , независимо от передаваемой активной мощности по линии определенной конструкции, в приемную систему будет стекать постоянная реактивная мощность  $Q_2$ );

реактивные мощности по концам линии равны по модулю, но имеют разные направления  $Q_1 = - Q_2$ .

Результаты расчетов, проводившихся применительно к линиям напряжением 220 кВ, показали, что перепады напряжения, соответствующие равенству  $Q_1 = - Q_2$ , не обеспечивают получения наименьших возможных нагрузочных потерь от пере-

токов реактивной мощности, как утверждалось в [3]. Потери активной мощности достигают наименьшего значения при условии равенства нулю внутренней реактивной мощности в конце линии  $Q_{\text{вн}}$ . Однако необходимо соблюдать ограничение по наибольшему рабочему напряжению электрооборудования.

Увеличение напряжения на передающем конце относительно напряжения приемного конца линии электропередачи оказывает более эффективное воздействие на изменение направления потоков реактивной мощности в режимах с компактными линиями 220 кВ по сравнению со стандартными линиями данного класса напряжения. Причем для передачи одинаковых значений активной мощности по линии компактного исполнения необходимо создавать меньший перепад напряжения по концам, чем для линий традиционного исполнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.Н., Подпоркин Г.В. Оптимизация конструктивных параметров ВЛ 35–220 кВ. – Электричество, 1985, №11.
2. Александров Г.Н., Евдокунин Г.А., Подпоркин Г.В. Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции. – Электричество, 1982, №4.
3. Зарудский Г.К. Анализ изменения режимных параметров воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения. – Электричество, 1998, №5.

[14.11.12]

*Авторы: Зарудский Георгий Константинович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1961 г. В 1971 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование протяженных электропередач сверхвысокого напряжения при глубокой компенсации параметров». Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».*

*Самалюк Юлия Сергеевна окончила институт электроэнергетики МЭИ в 2011 г. Аспирант кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».*