

## О параметрах режимов передачи натуральной мощности воздушных линий сверхвысокого напряжения

ЗРУДСКИЙ Г.К.

*Получено квадратное уравнение для вычисления уточнённых значений натуральной мощности, свойственных воздушным линиям электропередачи сверхвысокого напряжения с учётом потерь активной мощности при нагреве и коронировании проводов. Предлагается ранее неизвестное выражение поправочного коэффициента для учёта распределённости по длине воздушной линии сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) удельной активной проводимости, обусловленной коронированием проводов, в расчёте сосредоточенных активных проводимостей П-образной схемы замещения. Приведена новая формула для вычисления нагрузочных потерь активной мощности в зависимости от значений угла фазового сдвига векторов напряжения по концам линии, перепада напряжения и параметров П-образной схемы замещения. Выполнены расчёты и проанализированы их результаты применительно к линиям 330, 500 и 750 кВ разной протяжённости с различными марками проводов расщеплённых фаз типового конструктивного исполнения. Даны рекомендации по экономически оправданному применению марок сталеалюминиевых проводов при передаче натуральной мощности в качестве наибольшей расчётной.*

*Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, сверхвысокое напряжение, натуральная мощность, режимные параметры, перепад напряжения, потери активной мощности, плотность тока*

Термин «натуральная» мощность получил употребление в русскоязычной электротехнической литературе как буквальный перевод с немецкого языка [1], хотя более правильным был бы термин «естественная» мощность [2]. Он обозначает такую мощность, которая передаётся в нагрузочный узел, моделируемый эквивалентным комплексным сопротивлением, численно равным волновому сопротивлению линии. В теоретических основах электротехники этот режим трактуется как передача электроэнергии только падающими (прямыми) электромагнитными волнами без их отражения от нагрузочного узла (режим согласованной нагрузки) [3]. В электросетевых учебных дисциплинах под «натуральной» мощностью понимается такая активная мощность, при передаче которой потери реактивной мощности в линии полностью компенсируются её собственной генерацией. Сопоставление заданной передаваемой мощности с «натуральной» при этом используется для выявления характера изменения режимных параметров (напряжение, ток, реактивная мощность) вдоль линии в установившихся режимах работы протяжённых ВЛ СВН. Передаче «натуральной» мощности соответствует прямолинейное изменение упомянутых параметров в зависимости от текущей координаты промежуточной точки линии [4, 5].

Анализ экономичности передачи «натуральной» мощности проводился в ряде исследований [4, 6,

7], однако в практическом смысле конкретные результаты ещё не получены. Устранение этого пробела представляется нужным и важным как с теоретической, так и с методической (образовательной) точек зрения.

При проведении качественного анализа изменения режимных параметров обычно идеализируют линию, т.е. исключают затухание электромагнитной волны, принимая активные первичные параметры пренебрежительно малыми. При таком подходе волновое сопротивление становится действительной величиной и, как следствие, натуральная мощность — чисто активной.

Из уравнений окружностей (круговых диаграмм мощности), построенных в прямоугольной системе координат, где по горизонтальной оси отсчитывается активная мощность  $P_*$  и по вертикальной оси — реактивные мощности  $Q_1^*$ ,  $Q_2^*$  для передающего (индекс «1») и приёмного (индекс «2») концов однородной идеализированной линии, получаются расчётные выражения [5]:

$$\left. \begin{aligned} Q_2^* &= -\operatorname{ctg} \lambda + \sqrt{(k / \sin \lambda)^2 - P_*^2}; \\ Q_1^* &= (k^2 - 1) \operatorname{ctg} \lambda - Q_2^*, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\lambda = \beta_0 L$  – волновая длина линии ( $\beta_0 \approx 0,06^\circ$  эл./км – коэффициент изменения фазы электромагнитной волны;  $L$  – протяжённость ВЛ, км);  $k = U_1 / U_2$  – отношение зафиксированных модулей напряжения в начале и в конце линии (перепад напряжения).

Мощности в (1) выражены в относительных единицах от базисной мощности, равной значению натуральной мощности

$$S_{\text{баз}} = U_2^2 / \sqrt{x_0 / b_0},$$

где первичные параметры  $x_0$  и  $b_0$  – удельные индуктивное сопротивление и ёмкостная проводимость;  $\sqrt{x_0 / b_0}$  – волновое сопротивление идеализированной ВЛ СВН  $z_B$ .

Из (1) следует, что при  $k=1$  для любой передаваемой  $P$  имеем  $Q_1 = -Q_2$ , а при  $P=1$  получаем  $Q_2 = 0$ . Следовательно, передача натуральной мощности не сопровождается перетоком реактивной мощности. Иные значения режимных параметров будут иметь место при учете удельного активного сопротивления  $r_0$  и соответственно нагрузочных потерь активной мощности  $\Delta P_H = P_1 - P_2$ . В этом случае волновое сопротивление и натуральная мощность имеют активно-ёмкостный характер:  $z_B = (1 + j \operatorname{tg} \varphi_z) z_B$ , причём  $\operatorname{tg} \varphi_z = -(1/2)(r_0 / x_0)$  [9]. Принимая заданными значения  $U_2$ ,  $P_2 = P_{\text{нат}}$  и  $Q_2 = Q_{\text{нат}} = P_{\text{нат}} \operatorname{tg} \varphi_z$ , можно рассчитать значения режимных параметров в начале линии  $U_1$ ,  $P_1$  и  $Q_1$  [5]. В качестве примера в табл. 1 приведены результаты такого расчета (режим № 1) для ВЛ напряжением 750 кВ протяженностью 525 км с проводами 5×(АС 240/56). Удельные и волновые параметры линии:  $(r_0 / x_0) = 0,085$  и  $x_0 = 0,308$  Ом/км;  $\lambda = 0,565$  рад,  $z_B = 286,2$  Ом и  $\varphi_z = -2,34^\circ$  эл. В этом режиме реактивные мощности  $Q_1$  и  $Q_2$  имеют одинаковые отрицательные значения, т.е. направлены противоположно активной мощности при повышенном напряжении в начале ВЛ по отношению к напряжению на приемном конце. При сквозном перетоке реактивной мощности образуются дополнительные потери активной мощности. В режиме № 2 конечные напряжения принимают номинальное значение и реактивные мощности, сохраняя противоположное направление, становятся большими и не-

равными, а именно,  $|Q_2| > |Q_1|$ . Потери  $\Delta P_H$  при этом увеличиваются на 4%. Режим № 3 отличается тем, что для  $Q_2$  задано нулевое значение; напряжение  $U_1 = 1,046 U_2$  и мощность  $Q_1$  остается отрицательной. В режиме № 4 напряжение  $U_1 = 1,05 U_2$  и достигает длительно допустимого значения  $U_{\text{длд}}$ , а мощности  $Q_1$  и  $Q_2$  имеют разные знаки ( $Q_1 < 0$ ,  $Q_2 > 0$ ), близки по модулю и избыточны («вытекают» из линии). Потери  $\Delta P_H$  в режиме № 4 являются наименьшими по сравнению с потерями в режимах № 1–3. Эти особенности значений параметров режима № 4 позволяют предположить, что может быть найдено такое сочетание значений  $P_2 > P_{\text{нат}}$  и перепада напряжения при условии соблюдения соотношения  $U_1 \leq U_{\text{длд}}$ , при котором окажется достижимым равенство  $Q_1 \approx Q_2 \approx 0$ . Путем подбора значений  $P_2$  при сохранении напряжения  $U_2 = U_{\text{ном}}$  был выявлен режим № 5, близкий к желаемому:  $P_2 = 1,025 P_{\text{нат}}$ ,  $Q_1 = 0$ ,  $Q_2 / P_2 = 0,006$ ,  $U_1 = 1,004 U_{\text{длд}}$ . Потери  $\Delta P_H$  повысились на 5,4% пропорционально квадрату увеличения  $P_2$ . Поскольку поиск решения подбором – затруднительная процедура, желательным является получение решения аналитическим путем с применением расчетных выражений.

При математическом моделировании воздушной линии П-образной схемой замещения (см. рис. 1) можно выразить отношение значений конечных напряжений следующей зависимостью:

$$(U_2 / U_1)^2 = (x_{\Pi} / z_{\Pi} - z_{\Pi} b_{\Pi})^2 + (P_1' - r_{\Pi} / z_{\Pi})^2, \quad (2)$$

отвечающей условию, что  $Q_1 = 0$  [8].

Здесь  $P_1'$  – относительное значение внутренней мощности в схеме замещения соответствует базисной мощности, равной  $U_1^2 / z_{\Pi}$ ;  $r_{\Pi}, x_{\Pi}, z_{\Pi} = \sqrt{r_{\Pi}^2 + x_{\Pi}^2}$  и  $b_{\Pi}$  – активное, реактивное и полное продольные сопротивления и ёмкостная поперечная проводимость П-образной схемы замещения (на рис. 1  $Z_{\Pi} = r_{\Pi} + jx_{\Pi}$ ,  $Y_{\Pi} = g_{\Pi} + jb_{\Pi}$ ), определяемые известными методами [5, см. Приложение].

Применяя преобразования, аналогичные [9], вводится дополнительная аналитическая зависимость, удовлетворяющая условию  $Q_1 + Q_2 = 0$ :

$$(U_2 / U_1)^2 = 1 + (1/4)(r_0 / x_0)^2 (\lambda / \sin \lambda + \cos \lambda)^2 -$$

Таблица 1

Номер режима	Параметр								
	$U_2$ , кВ	$P_2$ , МВт	$Q_2$ , Мвар	$U_1$ , кВ	$P_1$ , МВт	$Q_1$ , Мвар	$\Delta P_H$ , МВт	$U_1/U_2$	$\Delta P_H/P_2$ , %
1	750	1965	- 83,5	769,0	2061,7	- 83,1	96,7	1,0253	4,92
2	750	1965	-199,0	750,0	2065,6	-124,6	100,6	1,0000	5,12
3	750	1965	0	784,1	2059,5	-44,7	94,5	1,0455	4,85
4	750	1965	+30,0	787,5	2058,8	-35,8	93,8	1,0500	4,77
5	750	2014	+12,2	790,5	2112,9	0	98,9	1,0540	4,91
6	749,8	2026	-14,3	787,5	2126,2	0	100,4	1,0503	4,95
7	750,8	2004	-12,9	787,5	2153,8	0	150,0	1,0489	7,49

$$-P'_1(r_0/x_0)(\lambda + \operatorname{tg}\lambda), \quad (3)$$

где  $P'_1 = P'_1 + g_{\Pi} z_B$  – относительное значение базисной мощности  $U_1^2/z_B$  ( $g_{\Pi}$  – активная проводимость П-образной схемы замещения в отсутствие коронирования проводов, обусловленная математическими действиями, – Приложение).

Проведя замену базисной мощности  $U_1^2/z_B$  на  $U_1^2/z_{\Pi}$  для зависимости (3) и приравнивание выражений (2) и (3), после некоторых математических преобразований получим квадратное уравнение для решения поставленной задачи (Приложение):

$$\begin{aligned} (P'_1)^2 + [(r_0/x_0)(z_B/z_{\Pi})(1 - \cos\lambda)(\lambda + \operatorname{tg}\lambda)] P'_1 + \\ + [(z_{\Pi}/z_B)\operatorname{tg}(\lambda/2)]^2 + g_{\Pi} z_B (r_0/x_0)(\lambda + \operatorname{tg}\lambda) - \\ - (1/4)(r_0/x_0)^2 (\lambda/\sin\lambda + \cos\lambda)^2 - [2\sin(\lambda/2)]^2 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для исходных условий, упомянутых ранее, из (4) и (2) или (3) можно получить значения параметров режима № 6 (см. табл. 1 и Пример расчёта). Этот режим отличается от других на 3% (61 МВт) большей активной мощностью в конце линии по сравнению с номинальным значением натуральной мощности; напряжение в начале ВЛ равно длитель-

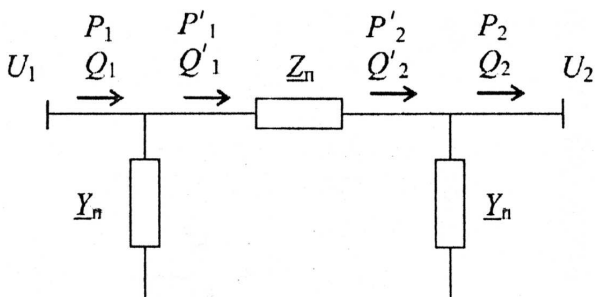


Рис. 1. П-образная схема замещения линии

но допустимому значению, реактивная мощность  $Q_1$  равняется нулю и отношение  $Q_2/P_2 = -0,007$ . Параметры этого режима близки к параметрам режима № 5 по значениям напряжения, но передаваемая активная мощность больше на 12 МВт. Значение мощности  $Q_2$  отлично от нуля, что объясняется неполной строгостью выражения (3), так как при его выводе [9] принято допущение о пренебрежении малыми значениями. Коррекция значения  $P'_1$  позволяет найти параметры режима, в котором  $Q_1 = Q_2 = 0$  (см. Пример расчёта). Фазные значения активного тока по концам линии и во всех её промежуточных точках оказываются равными:  $I_1 = I_x = I_2 = 1,560$  кА (плотность тока составляет  $1,294$  А/мм<sup>2</sup>).

Угол  $\delta$  фазового сдвига векторов напряжений  $U_1$  и  $U_2$  в обсуждаемом расчете целесообразно вычислять по формуле (см. Приложение):

$$\delta = \arcsin[(P'_1 - r_{\Pi}/z_{\Pi})(U_1/U_2)] + \arcsin(r_{\Pi}/z_{\Pi}), \quad (5)$$

а потери активной мощности как

$$\begin{aligned} \Delta P_H = (r_{\Pi}/z_{\Pi}) [\sin^2\delta + (U_2/U_1 - \cos\delta)^2] \times \\ \times (U_1^2/z_{\Pi}) + g_{\Pi} (U_1^2 + U_2^2). \end{aligned} \quad (6)$$

В упомянутом режиме № 6 значение угла  $\delta = 32,6^\circ$  эл. =  $0,568$  рад. =  $\lambda \cdot 1,005$ .

Предложенный подход позволяет проанализировать влияние коронирования проводов на изменение натуральной мощности. Потери активной мощности от коронирования существенно зависят от погодных условий и от изменения напряжения по линии СВН (нелинейная зависимость, осреднённо характеризуемая пятой степенью при местном коронировании [10]). Введением понятия «среднее квадратичное напряжение» [9] удаётся

приближённо моделировать потери коронирования удельной активной проводимостью  $g_{0к}$  для ВЛ средней протяжённости. При этом будут изменяться волновые параметры, а в П-образную схему замещения вводятся дополнительные сосредоточенные активные проводимости  $g_{п.к}$ , подключаемые на входе и выходе схемы. Эти проводимости следует вычислять с учётом длины линии и поправки на распределённость удельного параметра  $g_{0к}$  (см. Приложение):

$$g_{п.к} = g_{0к}(L/2)(1/\lambda + 1/\sin\lambda)\operatorname{tg}(\lambda/2) \approx \approx g_{0к}(L/2)(1 + \lambda^2/6). \quad (7)$$

Не рассматривая конкретное атмосферное состояние, примем, что  $g_{0к}/b_0 = (1/2)(r_0/x_0)$ . При условии, что  $g_{0к}/b_0 \leq (r_0/x_0) \leq 0,1$ , коэффициент  $\beta_0 = \sqrt{x_0 b_0}$ ;  $z_B = \sqrt{x_0/b_0}$ , фазовый угол волнового сопротивления  $\varphi_z = (1/2)\operatorname{arctg}(g_{0к}/b_0 - r_0/x_0) = -(1/4)\operatorname{arctg}(r_0/x_0)$  и коэффициент затухания электромагнитной волны  $\alpha_0 = (\beta_0/2)(g_{0к}/b_0 + r_0/x_0) = 3(\beta_0/4)(r_0/x_0)$ . С учётом этого выражение (3) примет вид:

$$(U_2/U_1)^2 = 1 + (1/16)(r_0/x_0)^2(3\lambda/\sin\lambda + \cos\lambda)^2 - (1/2)[P_1' + z_B(g_{п} + g_{п.к})](r_0/x_0)(3\lambda + \operatorname{tg}\lambda). \quad (8)$$

Уравнение (4) можно преобразовать:

$$(P_1')^2 + \{(r_0/x_0)(z_B/z_{п})[(1 - \cos\lambda)(3\lambda + \operatorname{tg}\lambda)/2]\} P_1' + [(z_{п}/z_B)\operatorname{tg}(\lambda/2)]^2 + z_B(g_{п} + g_{п.к})(r_0/x_0) \times \times (3\lambda + \operatorname{tg}\lambda)/2 - (1/16)(r_0/x_0)^2 \times \times (3\lambda/\sin\lambda + \cos\lambda)^2 - [2\sin(\lambda/2)]^2 = 0. \quad (9)$$

Для исходных условий, упомянутых ранее ( $r_0/x_0 = 0,085$ ;  $\lambda = 0,565$  рад;  $z_B = 286,2$  Ом и  $\varphi_z = -1,22^\circ$  эл.), из (9) и (8) получаются значения параметров режима № 7 (табл. 1). Сравнение значений параметров режимов № 7 и 6 показывает, что при совпадающих напряжениях на концах ВЛ и отличающихся активных мощностях реактивная мощность  $Q_2$  изменилась незначительно. Потери активной мощности в режиме № 7 увеличились на 50 МВт (50%) из-за коронирования проводов, причём нагрузочные потери составляют 97,6 МВт ( $\delta = 32,6^\circ$  эл.) и потери коронирования — 52,4 МВт. Очевидно, что учёт коронирования проводов ВЛ, изменяя значения концевых активных мощностей, практически не влияет на баланс потерь и генерации реактивной мощности в линии СВН. Таким образом, режим № 7 является режимом передачи

«уточнённой» натуральной мощности в случае коронирования проводов ВЛ с его заданной интенсивностью.

Представляет интерес выяснение экономичности по потерям  $\Delta P_H$  режимов работы ВЛ СВН, определяемых решением уравнения (4) для различных классов номинального напряжения, марок проводов и протяженностей в сопоставлении с режимами передачи «обычной» натуральной мощности  $P_{нат} = U_2^2/z_B$ . Параметры таких режимов вычисляются по иному алгоритму, в котором первым действием определяется перепад напряжения при задании относительного значения натуральной мощности в конце линии СВН  $P_2 = 1$  [9]:

$$(U_2/U_1)^2 = 1 + (1/4)(r_0/x_0)^2(\lambda/\sin\lambda + \cos\lambda)^2 + + P_2(r_0/x_0)(\lambda + \operatorname{tg}\lambda). \quad (10)$$

Результаты вычислительного эксперимента представлены в табл. 2 и 3.

Анализируя результаты расчётов, показанных в табл. 2, следует отметить, что значения активных натуральных мощностей несколько снижаются с увеличением протяженности ВЛ, но уточнённые мощности на 4,8–5,2% превышают обычные значения; при этом потери активной мощности повышаются на 10,4–10,7%. Реактивные мощности в зависимости от протяженности изменяются несущественно, их характер сохраняется: значения с разными знаками в режимах передачи обычных мощностей ( $Q_1 < 0$ ,  $Q_2 > 0$ ) и в режимах с уточнёнными мощностями  $Q_2 < 0$ , а  $Q = 0$  точно. Значения токов по концам линий являются равными в пределах точности расчётов и округления результатов.

В случае рассмотрения проводов крупного поперечного сечения (табл. 2) отмеченные особенности режимов сохраняются, однако превышение уточнённых мощностей над обычными снижается до 2,6%. Потери активной мощности снижаются заметно вследствие двух факторов: уменьшения удельного активного сопротивления на 62% и снижения требуемых значений перепада напряжения (повышается среднее значение напряжения по длине линии).

Для сравнения результатов расчётов, выполненных для линий 500 кВ и представленных в табл. 2, рассматривались ВЛ 330 и 750 кВ и проводились аналогичные расчёты, результаты которых приведены в табл. 3. Были выбраны провода расщеплённых фаз одинаковой марки стандартного конструктивного исполнения. Напряжения в начале линий приняты равными наибольшим расчётным значениям, рекомендуемым в проектной практике. Получено, что для линии 330 кВ с

Таблица 2

Воздушная линия 500 кВ	Параметры режимов передачи обычной и уточненной натуральной мощности														
	Длина, км	Волновая длина, рад.	$U_1$ , кВ	$P_1$ , МВт	$Q_1$ , Мвар	$U_2$ , кВ	$P_2$ , МВт	$Q_2$ , Мвар	$\delta$ , ° эл.	$U_1/U_2$ , отн. ед.	$\Delta P_{\text{н}}^*$ , МВт	$\Delta P_{\text{н}}/P_2$ , %	$P_2^*$ , отн. ед.	$I_1$ , кА	$I_1$ , кА
Провода: 3×(АС 300/39); поперечное сечение проводниковой части 903 мм <sup>2</sup> ; $r_0/x_0 = 0,1065$ ; $x_0 = 0,307$ Ом/км; $b_0 = 3,635 \cdot 10^{-6}$ См/км; $\varepsilon_{\text{в}} = 290,6$ Ом	450	0,4754	525	892,5	-7,38	497,0	849,9	+20,4	26,30	1,0564	42,67	5,02	1,0000	0,9815	0,9873
	525	0,5546	525	884,2	-14,6	492,7	835,4	+23,6	30,49	1,0655	48,83	5,84	1,0000	0,9724	0,9790
	600	0,6338	525	875,2	-22,7	488,3	820,6	+28,5	34,58	1,0751	54,63	6,66	1,0000	0,9625	0,9703
Провода: 3×(АС 500/64); поперечное сечение проводниковой части 1470 мм <sup>2</sup> ; $r_0/x_0 = 0,0648$ ; $x_0 = 0,304$ Ом/км; $b_0 = 3,645 \cdot 10^{-6}$ См/км; $\varepsilon_{\text{в}} = 288,8$ Ом	450	0,4737	525	921,1	-5,82	508,0	893,8	+10,9	26,61	1,0334	27,32	3,06	1,0000	1,0130	1,0157
	525	0,5526	525	945,6	0	509,2	916,9	-5,46	27,31	1,0311	28,77	3,14	1,0258	1,0401	1,0390
	600	0,6316	525	915,7	-9,94	505,3	884,0	+13,4	30,90	1,0390	31,70	3,58	1,0000	1,0070	1,0101
				940,2	0	506,1	906,9	-3,84	31,78	1,0374	33,24	3,66	1,0259	1,0340	1,0346
				909,4	-14,82	502,4	874,0	+17,1	35,16	1,0450	35,49	4,06	1,0000	1,0002	1,0044
				935,2	0	502,8	897,6	-2,55	36,26	1,0442	37,60	4,19	1,0270	1,0285	1,0307

Таблица 3

Воздушная линия	Параметры режимов передачи обычной и уточненной натуральной мощности														
	Длина, км	Волновая длина, рад.	$U_1$ , кВ	$P_1$ , МВт	$Q_1$ , Мвар	$U_2$ , кВ	$P_2$ , МВт	$Q_2$ , Мвар	$\delta$ , ° эл.	$U_1/U_2$ , отн. ед.	$\Delta P_{\text{н}}^*$ , МВт	$\Delta P_{\text{н}}/P_2$ , %	$P_2^*$ , отн. ед.	$I_1$ , кА	$I_1$ , кА
330 кВ; провода: 2×(АС 400/51); поперечное сечение проводниковой части 788 мм <sup>2</sup> ; $r_0/x_0 = 0,113$ ; $x_0 = 0,323$ Ом/км; $b_0 = 3,460 \cdot 10^{-6}$ См/км; $\varepsilon_{\text{в}} = 305,54$ Ом				367,2	-3,10	326,4	348,6	+9,11	26,30	1,06-1	18,58	5,33	1,0000	0,6127	0,6166
	450	0,4757	346	389,1	0	328,4	368,4	-6,77	27,80	1,0537	20,75	5,63	1,0568	0,6493	0,6477
	525	0,5530	769	2108,4	-18,60	746,2	2050,8	+23,6	31,10	1,0306	57,65	2,81	1,0000	1,5830	1,5868
750 кВ; провода: 5×(АС 400/51); поперечное сечение проводниковой части 1970 мм <sup>2</sup> ; $r_0/x_0 = 0,051$ ; $x_0 = 0,286$ Ом/км; $b_0 = 3,880 \cdot 10^{-6}$ См/км; $\varepsilon_{\text{в}} = 271,5$ Ом	450	0,4740	769	2118,9	-11,30	749,5	2068,9	+18,6	26,75	1,0261	49,92	2,41	1,0000	1,5908	1,5938
				2159,6	0	750,5	2107,8	-7,73	27,26	1,0246	51,84	2,46	1,0188	1,6214	1,6216
	525	0,5530	769	2150,6	0	746,9	2090,6	-5,43	31,76	1,0296	60,02	2,87	1,0194	1,6147	1,6161

крупными проводами превышение уточнённой натуральной мощности над обычной достигает 5,68%, тогда как для ВЛ 750 кВ это превышение составляет около 1,9%. Существенно отличаются относительные потери активной мощности и требуемые значения перепада напряжения. Для ВЛ 330 кВ эти значения оказались близкими к таким же значениям, как и у линии 500 кВ той же длины (450 км, табл. 2); для ВЛ 750 кВ упомянутые параметры предпочтительнее, чем у линии 500 кВ (450 и 525 км, табл. 2).

Выбор марок проводов и конструкций расщепленных фаз является ответственной проектной задачей, решаемой в условиях неполноты и неточности перспективной исходной информации с учётом технических ограничений. В действующей расчётной методике предписывается использовать дискретные значения нормированной плотности тока в проводниках применительно к режиму с наибольшим рабочим током в 5-м году нормальной эксплуатации ВЛ 330 и 500 кВ. Для алюминия и его сплавов упомянутые значения (0,8; 0,9; 1,0 А/мм<sup>2</sup>) выбираются в зависимости от предполагаемой плотности годового графика передачи электроэнергии [11].

Приведенные значения натуральной мощности (табл. 2 и 3), трактуемые как наибольшие передаваемые активные мощности, могут быть использованы для оценки пригодности типовых фазных конструкций проводов при сооружении ВЛ СВН различного номинального напряжения. В табл. 4 указаны параметры режимов передачи уточнённых натуральных мощностей, свойственных возможным типовым фазным конструкциям [11]. Оказа-

лось, что для конструкций с проводами марок АС 240/32 (п. 1) и АС 300/39 (пп. 2, 5) характерны значения плотности тока, превышающие наибольшее нормированное значение на 6–15% и даже на 30%, а потери активной мощности достигают 7–9%. Это означает, что для ВЛ 330 и 500 кВ провода указанных марок могут применяться только при передаваемых наибольших мощностях, сниженных по сравнению с натуральными мощностями. Остальные варианты типовых фазных конструкций за исключением 3×(АС 500/64) могут быть рекомендованы к применению. При плотности тока 0,708 А/мм<sup>2</sup> (табл. 4, п. 8) упомянутая конструкция должна применяться при передаваемых мощностях, превышающих натуральную мощность, или же на расстоянии более 450 км (см. табл. 2) из-за допустимости увеличения потерь активной мощности более 3,14%.

Потери активной мощности, приведенные в табл. 4, получены разными методами. В поз. 4, 5, 8 и 11 они продублированы из табл. 2, 3, т.е. рассчитаны точно по универсальному выражению (6). Практическое совпадение значений токов на концах ВЛ во всех режимах, представленных в табл. 4, позволяет применить более простое расчётное выражение, дающее хорошую точность результатов:

$$\Delta P_H = 3(I_1)^2 r_0 L = (P_1 / U_1)^2 r_0 L. \quad (11)$$

К примеру, для режима п.11 табл. 4 ( $r_0 = 0,0146$  Ом/км) получаем  $\Delta P_H = 51,82$  МВт.

Все расчёты вычислительного эксперимента, обсуждаемые здесь, проводились с учётом активных сопротивлений проводов, соответствующих

Таблица 4

Номер п/п	АС-провода (число, сечение)	Параметр						
		$U_1$ , кВ	$P_1$ , МВт	$U_2$ , кВ	$\Delta P$ , МВт	$\Delta P / P_2$ , %	$I_1$ , кА	$j_1$ , А/мм <sup>2</sup>
1	2×(240/32)	346	382,3	319,1	32,42	9,26	0,638	<b>1,307</b>
2	2×(300/39)	346	383,5	323,6	26,53	7,43	0,640	<b>1,063</b>
3	2×(330/43)	346	385,1	325,4	24,26	6,72	0,643	0,968
4	2×(400/51)	346	389,1	328,4	20,75	5,63	0,649	0,824
5	3×(300/39)	525	941,2	499,7	47,25	5,29	1,035	<b>1,146</b>
6	3×(330/43)	525	934,8	502,5	41,37	4,63	1,028	1,032
7	3×(400/51)	525	939,7	505,4	35,04	3,87	1,033	0,874
8	3×(500/64)	525	945,6	509,2	28,77	3,14	1,040	<b>0,708</b>
9	5×(300/39)	769	2137	745,2	66,75	3,22	1,605	1,066
10	5×(330/43)	769	2142	747,3	60,78	2,92	1,608	0,969
11	5×(400/51)	769	2160	750,5	51,84	2,46	1,621	0,823
12	3×(330/43)	525	934,2	505,0	36,36	4,05	1,027	1,032
13	3×(330/43)	525	935,7	500,0	46,43	5,22	1,029	1,033

температуре +20 °С. В действительности эта температура может варьироваться в широком диапазоне значений от отрицательных зимних до высоких положительных летних (при температуре воздуха 33—35 °С и солнечном облучении температура проводов может повышаться до 50 °С). Оценить изменение потерь активной мощности оказывается несложно с помощью выражения (11) и известной зависимости

$$r_0^{(t)} = r_0^{(+20)} [1 + 0,004(t - 20)]. \quad (12)$$

В табл. 4 даны значения потерь активной мощности и других параметров режимов передачи уточнённых натуральных мощностей для трёх значений температуры проводов 3×(АС 330/43): –10 °С (п. 12), +20 °С (п. 6) и +50 °С (п. 13). Сопоставление параметров этих режимов показывает, что значения мощности в начале ВЛ почти не изменились, так же как токи и их плотность. Кроме потерь активной мощности с повышением температуры увеличиваются требуемые значения перепада напряжения и, следовательно, снижаются значения уточнённой натуральной мощности в конце линии 500 кВ от 897,8 = (934,2–36,4) МВт до 889,3 = (935,7–46,4) МВт, т.е. приблизительно на 1%.

**Пример.** Расчёт параметров режима передачи уточнённой натуральной мощности (см. табл. 1, режим № 6). И с х о д н ы е д а н н ы е: Воздушная линия напряжением 750 кВ протяжённостью 525 км с фазными проводами 5×(АС 240/56) и промежуточными опорами типа «Набла». Удельные и волновые параметры:  $(r_0/x_0) = 0,085$  и  $g_{0к} = 0$ ;  $x_0 = 0,308$  Ом/км;  $b_0 = 3,76 \cdot 10^{-6}$  См/км;  $\lambda = 0,565$  рад.,  $z_B = 286,2$  Ом. Рассчитываются параметры П-образной схемы замещения.

Активная составляющая продольного сопротивления:

$$r_{\Pi} = z_B (r_0 / 2x_0) (\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) = (0,085/2) 286,2 \times (0,565 \cos 0,565 + \sin 0,565) = 12,32 \text{ Ом.}$$

Индуктивная составляющая продольного сопротивления:

$$x_{\Pi} = z_B \sin \lambda = 286,2 \sin 0,565 = 153,25 \text{ Ом.}$$

Значение модуля полного продольного сопротивления:

$$z_{\Pi} = \sqrt{r_{\Pi}^2 + x_{\Pi}^2} = 153,74 \text{ Ом.}$$

$$\text{Отношения: } r_{\Pi} / z_{\Pi} = 0,08014; \quad x_{\Pi} / z_{\Pi} = 0,9968;$$

$$z_B / z_{\Pi} = 1,8616.$$

Поперечная активная проводимость для концов схемы замещения:

$$g_{\Pi} = (1/z_B) (r_0 / 2x_0) (\lambda - \sin \lambda) (1 + \cos \lambda)^{-1} = (1/286,2) (0,085/2) (0,565 - \sin 0,565) \times (1 + \cos 0,565)^{-1} = 0,238 \cdot 10^{-5} \text{ См.}$$

Поперечная ёмкостная проводимость для концов схемы замещения:

$$b_{\Pi} = (1/z_B) \operatorname{tg}(\lambda/2) = (1/286,2) \operatorname{tg}(0,565/2) = 1,0143 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Решение квадратного уравнения (4):

$$(P_1')^2 + [0,085 \times 1,8616 (1 - \cos 0,565) (0,565 +$$

$$+ \operatorname{tg} 0,565)] P_1' + [(1/1,8616) \operatorname{tg} 0,2625]^2 +$$

$$+ (0,238 \cdot 10^{-5}) 286,2 (0,085) (0,565 + \operatorname{tg} 0,565) -$$

$$- (1/4) (0,085)^2 (0,565 / \sin 0,565 + \cos 0,565)^2 -$$

$$- [2 \sin 0,2625]^2 = (P_1')^2 + 0,029484 P_1' + (0,0243 +$$

$$+ 0,69410^{-4} - 0,00652 - 0,3108) = (P_1')^2 + 0,029484 P_1'$$

$$- 0,29296 = 0.$$

$$P_1' = -0,014742 + \sqrt{0,0002173 + 0,29296} =$$

$$= 0,54146 - 0,014742 = 0,52672.$$

Расчёт по преобразованному выражению (3) (см. приложение):

$$(U_2/U_1)^2 = 1 + 0,00652 - [0,52672 (286,2/153,74) +$$

$$+ (0,238 \cdot 10^{-5}) 286,2] (0,085) (0,565 + \operatorname{tg} 0,565) =$$

$$= 0,90652;$$

$$U_2/U_1 = (0,90652)^{(1/2)} = 0,95212.$$

Принимается, что  $U_1 = U_{\text{длд}} = 787,5$  кВ. При этом  $U_2 = 0,95212 \times 787,5 = 749,8$  кВ.

$$\text{Согласно [8] мощность } Q_1' = (x_{\Pi} / z_{\Pi}) - [(U_2/U_1)^2 -$$

$$- (P_1' - r_{\Pi} / z_{\Pi})^2]^{(1/2)} = 0,9968 - [0,90652 - (0,52672 -$$

$$- 0,08014)^2]^{(1/2)} = 0,15592;$$

$$S_{\text{БАЗ}} = U_1^2 / z_{\Pi} = 4033,8 \text{ МВ·А;}$$

$$Q_1' = 0,15592 \times 4033,8 = 628,95 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{Y1} = U_1^2 b_{\Pi} = (787,5)^2 \cdot 1,0143 \cdot 10^{-3} = 628,96;$$

$$Q_I = Q_1' - Q_{Y1} = -0,01 \text{ Мвар;}$$

$$P_I = P_1' + g_{\Pi} U_1^2 = 0,52672 \times 4033,8 + (0,238 \cdot 10^{-5}) \times$$

$$\times (787,5)^2 = 2124,7 + 1,48 = 2126,2 \text{ МВт.}$$

По выражению (5) рассчитывается угол фазового сдвига векторов напряжений:

$$\delta = \arcsin[(0,52672 - 0,08014) / (1/0,95212)] +$$

$$+ \arcsin(0,08014) = 0,48821 + 0,08023 = 0,5684 \text{ рад.}$$

Потери активной мощности вычисляются по выражению (6):

$$\Delta P_{\Pi} = (0,08014) [\sin^2 0,5684 + (0,95212 - \cos 0,5684)^2] \times 4033,8 + [(787,5)^2 + (749,8)^2] \times 0,238 \cdot 10^{-5} = 97,55 + 1,48 + 1,34 = 100,37 \text{ МВт.}$$

Активная мощность в конце ВЛ:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{\Pi} = 2126,2 - 100,37 = 2025,8 \text{ МВт.}$$

Реактивная мощность в конце ВЛ:

$$Q_2 = Q_1' - \Delta P_z (x_{\Pi} / r_{\Pi}) + U_2^2 b_{\Pi} = 628,95 - (153,25/12,32) \times$$

$$\times 97,55 + (1,0143 \cdot 10^{-3})(749,8)^2 = 628,95 - 1213,44 + 570,23 = -14,26 \text{ Мвар.}$$

$$(\Delta P_H / P_2) \times 100 = (100,37 / 2025,8) \times 100 = 4,95\%.$$

$$U_1 / U_2 = 1 / 0,95212 = 1,0503.$$

Расчёт режимных параметров по условию  $Q_2 = 0$  при  $Q_1 = 0$ .

Принимается значение  $P'_1 = 0,52287$  и подставляется в выражение (2):

$$(U_2 / U_1)^2 = (0,9968 - 153,74 \cdot 1,0143 \cdot 10^{-3})^2 + (0,52287 - 0,08014)^2 = 0,90308;$$

$$(U_2 / U_1) = 0,9503.$$

$$P'_1 = 0,52287 \cdot 4033,8 = 2109,2 \text{ МВт};$$

$$\Delta S_z = [(P'_1 / U_1)^2 + (Q'_1 / U_1)^2] (r_{\pi} + jx_{\pi}) = \\ = [(2109,2 / 787,5)^2 + (629 / 787,5)^2] (12,32 + j153,25) = \\ = 96,23 + j1197,1 \text{ МВА};$$

$$U_2 = 0,9503 \cdot 787,5 = 748,36 \text{ кВ.}$$

$$Q_2 = Q'_1 - \Delta Q_z + U_2^2 b_{\pi} = 629 - 1197,1 + (748,36)^2 \cdot 1,0143 \times \\ \times 10^{-3} = -0,05 \text{ Мвар.};$$

$$P_1 = 2109,2 + 1,48 = 2110,6 \text{ МВт};$$

$$P_2 = 2109,2 - 96,23 - 1,33 = 2011,6 \text{ МВт};$$

$$(\Delta P_H / P_2) \times 100 = (99,0 / 2011,6) \times 100 = 4,92\%;$$

$$U_1 / U_2 = 1 / 0,95212 = 1,0523.$$

Значения токов на концах линии в режиме № 6:

$$I_1 = P_1 (U_1 \sqrt{3})^{-1} = 2126,2 (787,5 \sqrt{3})^{-1} = 1,559 \text{ кА};$$

$$I_2 = P_2 (U_2 \sqrt{3})^{-1} = 2025,8 (749,8 \sqrt{3})^{-1} = 1,560 \text{ кА.}$$

$$\text{Плотность тока в конце линии: } j_2 = I_2 / F_A = \\ = 1,560 \cdot 10^3 / (5 \times 241) = 1,294 \text{ А/мм}^2.$$

Значения параметров в середине линии:

$$P_{cp} = (P_1 + P_2) / 2 = (2126,2 + 2025,8) / 2 = 2076,0 \text{ МВт};$$

$$U_{cp} = (U_1 + U_2) / 2 = (787,5 + 749,8) / 2 = 768,65;$$

$$I_{cp} = P_{cp} (U_{cp} \sqrt{3})^{-1} = 2076 (768,65 \sqrt{3})^{-1} = 1,559 \text{ кА.}$$

Потери активной мощности, вычисляемые по значениям параметров середины линии:

$$\Delta P_H = (P_{cp} / U_{cp})^2 (r_0 / x_0) x_0 L = (2076 / 768,65)^2 \times \\ \times (0,085) 0,308 \cdot 525 = 100,27 \text{ МВт.}$$

**Приложение. 1. Расчётные выражения для параметров П-образной схемы замещения ВЛ СВН. 1.1.** В отсутствие коронирования проводов, моделируемого удельной активной проводимостью ( $g_{0к} = 0$ ) [5, разделы 4.2.2, 4.2.3]:

$$r_{\pi} = z_B (r_0 / 2x_0) (\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) \approx r_0 L (1 - \lambda^2 / 3);$$

$$x_{\pi} = z_B \sin \lambda \approx x_0 L (1 - \lambda^2 / 6);$$

$$g_{\pi} = (1 / z_B) (r_0 / 2x_0) (\lambda - \sin \lambda) (1 + \cos \lambda)^{-1} \approx$$

$$\approx (r_0 / z_B^2) (L / 2) (\lambda^2 / 12);$$

$$b_{\pi} = (1 / z_B) \text{tg}(\lambda / 2) \approx b_0 (L / 2) (1 + \lambda^2 / 12).$$

1.2. С учётом коронирования проводов, моделируемого удельной активной проводимостью ( $g_{0к} \neq 0$ ) [9]:

$$r_{\pi} = z_B [(\lambda / 2) (r_0 / x_0 + g_{0к} / b_0) \cos \lambda + (1 / 2) (r_0 / x_0 - \\ - g_{0к} / b_0) \sin \lambda] = z_B [(r_0 / 2x_0) (\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) + \\ + (g_{0к} / 2b_0) (\lambda \cos \lambda - \sin \lambda)];$$

$$g_{\pi к} = (1 / z_B) [(r_0 / 2x_0) (\lambda - \sin \lambda) (1 + \cos \lambda)^{-1} + \\ + (g_{0к} / 2b_0) (\lambda + \sin \lambda) (1 + \cos \lambda)^{-1}];$$

$$g_{\pi к} - g_{\pi} = (g_{0к} / 2b_0) (1 / \sqrt{x_0 / b_0}) L \sqrt{x_0 / b_0} \times$$

$$\times (1 + (1 / \lambda) \sin \lambda) (1 - \cos \lambda) (1 + \cos \lambda)^{-1} (1 - \cos \lambda)^{-1} =$$

$$= g_{0к} (L / 2) [1 + (1 / \lambda) \sin \lambda - \cos \lambda - (1 / \lambda) (\sin \lambda) \cos \lambda] \times$$

$$\times (1 - \cos^2 \lambda)^{-1} = g_{0к} (L / 2) [1 / \sin^2 \lambda + 1 / (\lambda \sin \lambda) -$$

$$- (1 / \sin \lambda) \text{ctg} \lambda - (1 / \lambda) \text{ctg} \lambda] = g_{0к} (L / 2) (1 / \lambda + 1 / \sin \lambda) \times$$

$$\times (1 / \sin \lambda - \text{ctg} \lambda) = g_{0к} (L / 2) (1 / \lambda + 1 / \sin \lambda) \text{tg}(\lambda / 2) \approx$$

$$\approx g_{0к} (L / 2) (1 / \lambda + 1 / \lambda + \lambda / 6) (\lambda / 2 + \lambda^3 / 24) =$$

$$= g_{0к} (L / 2) (1 + 2\lambda^2 / 12 + \lambda^4 / 114) \approx g_{0к} (L / 2) (1 + \lambda^2 / 6).$$

2. Преобразование выражения (2):

$$(x_{\pi} / z_{\pi} - z_{\pi} b_{\pi})^2 + (P'_1 - r_{\pi} / z_{\pi})^2 = [(x_{\pi} / z_{\pi})^2 + (r_{\pi} / z_{\pi})^2] -$$

$$- 2(x_{\pi} / z_{\pi})(z_{\pi} b_{\pi}) + (z_{\pi} b_{\pi})^2 + (P'_1)^2 - 2P'_1(r_{\pi} / z_{\pi}) =$$

$$= 1 - 2(x_{\pi} b_{\pi}) + (z_{\pi} b_{\pi})^2 + (P'_1)^2 - 2P'_1(r_{\pi} / z_{\pi}) =$$

$$= 1 + (P'_1)^2 - 2P'_1(z_B / z_{\pi})(r_0 / 2x_0) (\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) -$$

$$- 2(z_B \sin \lambda) (1 / z_B) \text{tg}(\lambda / 2) + [(z_{\pi} / z_B) \text{tg}(\lambda / 2)]^2 =$$

$$= 1 + (P'_1)^2 - 2P'_1(z_B / z_{\pi})(r_0 / 2x_0) (\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) -$$

$$- 4 \sin^2(\lambda / 2) + [(z_{\pi} / z_B) \text{tg}(\lambda / 2)]^2 = (U_2 / U_1)^2.$$

3. Замена базисной мощности в выражении (3) и вывод квадратного уравнения (4):

В именованных единицах (МВт) мощность

$$P'_1 = P'_1 (U_1^2 / z_B) = P'_1 (U_1^2 / z_{\pi}),$$

следовательно,  $P'_1 = P'_1 (z_B / z_{\pi})$ . Выражение (3) принимает вид:

$$(U_2 / U_1)^2 = 1 + (1 / 4) (r_0 / x_0)^2 (\lambda / \sin \lambda + \cos \lambda)^2 -$$

$$- (P'_1 z_B / z_{\pi} + g_{\pi} z_B) (r_0 / x_0) (\lambda + \text{tg} \lambda).$$

Приравнивание преобразованных выражений (2) и (3) с перегруппировкой слагаемых:

$$(P'_1)^2 + P'_1 (z_B / z_{\pi}) (r_0 / x_0) [-(\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) + (\lambda + \text{tg} \lambda)] +$$

$$+ [(z_{\pi} / z_B) \text{tg}(\lambda / 2)]^2 + g_{\pi} z_B (r_0 / x_0) (\lambda + \text{tg} \lambda) -$$

$$- (1 / 4) (r_0 / x_0)^2 (\lambda / \sin \lambda + \cos \lambda)^2 - 4 \sin^2(\lambda / 2) = 0.$$

Здесь

$$[-(\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) + (\lambda + \text{tg} \lambda)] = [\lambda (1 - \cos \lambda) +$$

$$+ \sin \lambda / \cos \lambda - \sin \lambda] = [\lambda (1 - \cos \lambda) + (1 - \cos \lambda) \text{tg} \lambda] =$$

$$= (1 - \cos \lambda) (\lambda + \text{tg} \lambda).$$

Квадратное уравнение (4) в окончательном виде:



$$\begin{aligned} & (P_1')^2 + [(r_0/x_0)(z_B/z_{\Pi})(1-\cos\lambda)(\lambda+\operatorname{tg}\lambda)P_1']^2 + \\ & + [(z_{\Pi}/z_B)\operatorname{tg}(\lambda/2)]^2 + g_{\Pi}z_B(r_0/x_0)(\lambda+\operatorname{tg}\lambda) - \\ & - (1/4)(r_0/x_0)^2(\lambda/\sin\lambda+\cos\lambda)^2 - [2\sin(\lambda/2)]^2 = 0. \end{aligned}$$

4. Формула для расчёта угла фазового сдвига (5) и вывод выражения (6) для расчётов потерь активной мощности в продольном сопротивлении П-образной схемы замещения ВЛ [5, раздел 6.2.2]:

$$P_1' = (U_1^2/z_{\Pi})\sin\alpha_{\Pi} + (U_1U_2/z_{\Pi})\sin(\delta-\alpha_{\Pi});$$

$$P_2' = -(U_2^2/z_{\Pi})\sin\alpha_{\Pi} + (U_1U_2/z_{\Pi})\sin(\delta+\alpha_{\Pi}).$$

4.1. В относительных единицах при  $S_{\text{баз}} = U_1^2/z_{\Pi}$ :

$$P_1' = \sin\alpha_{\Pi} + (U_2/U_1)\sin(\delta-\alpha_{\Pi}),$$

откуда

$$\delta = \arcsin[(P_1' - \sin\alpha_{\Pi})(U_1/U_2)] + \alpha_{\Pi} =$$

$$= \arcsin[(P_1' - r_{\Pi}/z_{\Pi})(U_1/U_2)] + \arcsin(r_{\Pi}/z_{\Pi}).$$

$$\begin{aligned} 4.2. \quad P_1' - P_2' &= (U_1^2 + U_2^2)(\sin\alpha_{\Pi})/z_{\Pi} + (U_1U_2/z_{\Pi}) \times \\ & \times [\sin(\delta-\alpha_{\Pi}) - \sin(\delta+\alpha_{\Pi})] = (U_1^2 + U_2^2)(r_{\Pi}/z_{\Pi})/z_{\Pi} + \\ & + (U_1U_2/z_{\Pi})[\pm(\sin\delta)\cos\alpha_{\Pi} - 2(\cos\delta)(r_{\Pi}/z_{\Pi})] = \\ & = (U_1^2/z_{\Pi})(r_{\Pi}/z_{\Pi})[1 + (U_2/U_1)^2 - 2(U_2/U_1)\cos\delta \pm \\ & \pm \cos^2\delta] = (r_{\Pi}/z_{\Pi})[\sin^2\delta + (U_2/U_1 - \cos\delta)^2](U_1^2/z_{\Pi}). \end{aligned}$$

**Выводы.** 1. Получено аналитическим способом оригинальное квадратное уравнение для вычисления относительных значений уточнённой натуральной мощности на передающем конце реальной линии электропередачи СВН. Значения уточнённой натуральной мощности на приёмном конце линии на 1,9–5,7% больше значений обычной натуральной мощности, свойственных идеализированным линиям.

2. Режимы передачи натуральной мощности отличаются от других режимов тем, что при их реализации должны обеспечиваться вполне определённые значения перепада напряжения на концах линии с повышенным напряжением на передающем конце. Требуемые значения перепада напряжения однозначно зависят от передаваемой натуральной мощности, длины линии и от удельных первичных параметров.

3. Местное коронирование проводов, моделируемое удельной активной проводимостью, практически не влияет на значения реактивной мощности по концам воздушных линий СВН при потерях мощности менее 50% от нагрузочных потерь и неизменном распределении напряжения вдоль ВЛ средней протяжённости.

4. Для воздушных линий электропередачи напряжением 330 и 500 кВ протяженностью до 450 км значения плотности расчётных токов в режимах передачи натуральной мощности существенно превышают нормированные значения и потери активной мощности достигают 7–9 %, если применяются типовые фазные конструкции с проводами минимального диаметра по условиям коронирования и радиопомех.

5. Технологические (нагрузочные) потери активной мощности в режимах передачи натуральной мощности прямо пропорциональны протяжённости ВЛ, удельному активному сопротивлению проводов расщеплённой фазы при известной температуре и квадрату значения чисто активного тока, неизменного по всей длине линии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залесский А.М. Передача электрической энергии: Учебное пос. для вузов. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948, 368 с.
2. Рябков А.Я. Электрический расчёт линий электропередач высокого напряжения. 3-е изд. — М.; Л.: ГОНТИ, 1938, 235 с.
3. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов в 3 т./Под общ. ред. К.М. Поливанова. Т.2. Б.Я. Жуховицкий и И.Б. Негневицкий. Линейные электрические цепи (продолжение). Нелинейные цепи. — М.: Энергия, 1972, 200 с.
4. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. 2-е изд. — М.: Знак, 1998, 171 с.
5. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: Учебник для вузов. — М.: Издат. дом МЭИ, 2007, 488 с.
6. Веников В.А., Жуков Л.А., Сиуда И.П. Уточнение характеристик дальних электропередач в связи с оценкой экономичности их работы. — Труды МЭИ. Электроэнергетика, 1957, вып. XXVI, с. 75–96.
7. Сиуда И.П. Об экономичности режима натуральной мощности дальних электропередач. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1963, № 3, с. 298–303.
8. Зарудский Г.К., Самолюк Ю.С. О режимных особенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ. — Электричество, 2013, № 5, с. 8–13.
9. Зарудский Г.К. Анализ изменения режимных параметров воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения. — Электричество, 1998, № 5, с. 2–8.
10. Александров Г.Н. Сверхвысокие напряжения. — Л.: Энергия, 1973, 184 с.
11. Справочник по проектированию электрических сетей/Под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. — М.: ЭНАС, 2012, 376 с.

[15.12.2016]

*А в т о р: 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».*

## About Regime Parameters of Extra High Voltage Overhead Line Under Natural Power

**ZARUDSKY Georgy K.** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) – Professor of the Department of Electrical Power Systems, Cand. Sci. (Eng.)

*The square equation for accurate value of extra high voltage overhead line natural power calculation was obtained. The equation takes into account load and corona line power losses. The new expression for correction factor calculation is presented for taking into account distribution of specific active conductivity simulating corona line power losses in extra high voltage overhead line. The correction factor is used for calculation of conductivity in transmission line  $\Pi$ -type equivalent circuit. New equation for calculation of load active line power losses depending on voltage vectors phase difference and ratio between voltages of the line terminals, and line  $\Pi$ -type equivalent circuit parameters was showed. The results of parameters calculation for 330, 500 and 750 kV overhead lines of various lengths and usual phase construction were analyzed. The economically feasible cross section for aluminum steel reinforced wires to transmit natural power as a design power were recommended in the paper.*

**Key words:** overhead transmission line, extra high voltage, natural power, transmission line regime parameters, ratio between voltages of the line terminals, active power losses, corona power losses, density current

### REFERENCES

1. **Zalessky A.M.** *Peredacha elektricheskoi energii. Ucheb. posobiye dlya vtuzov* (Electric power transmission. Textbook for high schools). Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, 1948, 368 p.
2. **Ryabkov A.Ya.** *Elektricheskii raschet linii elektroperedachi vysokogo napryazheniya* (Electric calculation of high voltage transmission lines. 3rd edit.). Moscow; Leningrad. Publ. GONTI, 1938, 235 p.
3. **Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Uchebnik dlya vtuzov v. 3 t./Pod obshch. redaktsiyey K.M. Polivanova. T.2: B.Ya. Zhukhovitskii i I.B. Negnevitskii. Lineinye elektricheskiye tsepi (prodolzheniye). Nelineinye tsepi** (Teoretical foundation of electrical Engineering. Textbook for high schools in 3 volumes/Edit by K.M. Polivanov. Vol. 2 – B.Ya. Zhukhovitskii and I.B. Negnevitskii. Linear electrical circuits (continued). Nonlinear circuits). Moscow, Publ. «Energiya», 1972, 200 p.
4. **Aleksandrov G.N.** *Peredacha elektricheskoi energii peremennym tokom, 2-ye izd.* (AC power transmission, 2nd publ.). Moscow, Publ. «Znak», 1998, 171 p.
5. **Ryzhov Yu.P.** *Dalniye elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya: Uchebnik dlya vtuzov* (Long ENV power: Textbook for high schools). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2007, 448 p.
6. **Venikov V.A., Zhukov L.A., Siuda I.P.** *Trudy MEI. Elektroenergetika – in Russ. (Proc. of the Moscow Power Engineering Institute. Power Engineering)*, 1957, iss. XXVI, pp. 75–96.
7. **Siuda I.P.** *Izv. AN SSSR. Energetika i transport (News of the Academy of Sciences SSSR – in Russ. (Energetics and Transport)*, 1963, No. 3, pp. 298–303.
8. **Zarudsky G.K., Samolyuk Yu.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 5, pp. 8–13.
9. **Zarudsky G.K.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 5, pp. 2–8.
10. **Aleksandrov G.N.** *Sverkhvysokoye napryazheniye (ENV)*. Leningrad, Publ. «Energiya», 1973, 184 p.
11. **Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setei/Pod red. D.L. Faibisovicha** (Guide to the design of electrical circuits/ Edit. by D.L. Faibisovich). Moscow, Publ. «ENAS», 2012, 376 p.

[15,12,2016]