

Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 2000. — № 5. — С. 13—26.

8. Копченова Н. В., Марон И. А. Вычислительная математика в примерах и задачах. — М.: Наука, 1972.

9. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А. Решение краевой задачи токораспределения в шинопроводе прямоугольного профиля итерационным методом // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1996. — № 3—4. — С. 3—8.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 30.06.2000

УДК 621.315

## АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО РАЗЛИЧНЫМ ФАКТОРАМ

Канд. техн. наук, проф. ФЕДИН В. Т.,  
инж. ЗОРИЧ А. М.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Под пропускной способностью линий электропередачи обычно понимают максимальную активную мощность, которую можно передавать в достаточно длительном установившемся режиме с учетом технических ограничений [1]. Из данного определения можно заметить, что пропускная способность является одной из важнейших функциональных характеристик электропередач, вследствие чего особый интерес представляют условия ее ограничения. Ими могут быть: предел по передаваемой мощности, допустимый ток по условиям нагрева проводов линии и допустимые потери напряжения.

Рассмотрим количественные данные, характеризующие технические ограничения пропускной способности.

Известно соотношение, характеризующее передачу мощности по линии электропередачи [1]:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta, \quad (1)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  — напряжение в начале и конце линии;

$X$  — реактивное сопротивление линии;

$\delta$  — угол сдвига между векторами напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

Из (1) видно, что предел передаваемой мощности при фиксированных напряжениях по концам идеализированной линии (без потерь), называемый идеальным пределом передаваемой мощности, достигается при угле  $\delta = 90^\circ$  [1]

$$P_{\text{пр}}^y = \frac{U_1 U_2}{X} \approx \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_B \sin \alpha l} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{\frac{X_0}{B_0} \sin \alpha l}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение линии;  
 $Z_{\text{в}}$  – волновое сопротивление линии;  
 $X_0$  – погонное индуктивное сопротивление линии;  
 $B_0$  – погонная емкостная проводимость линии;  
 $\alpha$  – коэффициент изменения фазы волны;  
 $l$  – длина линии.

Из приведенных выше формул можно заметить, что пропускная способность пропорциональна квадрату номинального напряжения линии электропередачи. Следовательно, для ее увеличения необходимо повышать класс напряжения. При фиксированном напряжении увеличения пропускной способности можно добиться уменьшением волнового сопротивления. Оно зависит от электрических и магнитных свойств среды, в которой распространяется электромагнитная волна, а также в значительной степени от взаимного расположения проводов в сложной системе проводов и земли. Причем изменение индуктивного сопротивления и емкостной проводимости происходит совместно – при уменьшении индуктивного сопротивления проводимость увеличивается и наоборот. Данное преимущество реализуется в компактных линиях электропередачи со сближенными до минимально допустимого расстояния между проводами различных фаз и в электропередачах с переменной структурой фаз (ЭП с ПСФ), состоящих из двух цепей с расщепленными и сближенными попарно фазами с приложенными напряжениями, сдвинутыми относительно друг друга на некоторый угол, изменяемый в зависимости от режима электропередачи [1, 2].

Фактическая пропускная способность, которую можно реализовать на практике, несколько меньше предела передаваемой мощности [1]

$$P_{\text{п.с}}^y = \frac{P_{\text{пр}} - \delta P}{1 + k_{\text{зап}}}. \quad (3)$$

Здесь  $\delta P$  – нерегулярные колебания потока мощности;  
 $k_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса статической устойчивости, принимаемый равным 0,2.

С учетом (2)

$$P_{\text{п.с}}^y = \left( \frac{U_{\text{ном}}^2}{\sqrt{\frac{X_0}{B_0}} \sin \alpha l} - \delta P \right) \frac{1}{(1 + k_{\text{зап}})}. \quad (4)$$

Индуктивное сопротивление и емкостная проводимость, изменением которых можно добиться увеличения пропускной способности линии электропередачи, зависят от сечения и количества проводов, входящих в состав воздушной линии (ВЛ), и, в немалой степени, от конструктивного исполнения линии.

Для ВЛ традиционного исполнения [2, 5]:

$$X_0 = \omega L = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left( \lg \frac{D_{\text{ср.г}}}{r_3} + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{1}{4n} \right) = 0,144 \left( \lg \frac{D_{\text{ср.г}}}{r_3} + \frac{0,157}{n} \right); \quad (5)$$

$$B_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{ср.г}}}{r_3}} 10^{-6}, \quad (6)$$

где  $L$  – погонная индуктивность 1 км провода;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота, при  $f = 50$  Гц  $\omega = 314$ ;

$\mu, \mu_0$  – магнитные проницаемости провода и вакуума соответственно;

$D_{\text{ср.г}}$  – среднегеометрическое расстояние между осями симметрии соседних фаз;

$r_3$  – эквивалентный радиус расщепленной фазы.

С учетом (5), (6)

$$Z_B = \sqrt{\frac{X_0}{B_0}} = \sqrt{\frac{0,144 \left( \lg \frac{D_{\text{ср.г}}}{r_3} + \frac{0,157}{n} \right)}{\frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{ср.г}}}{r_3}}}} = \sqrt{19 \cdot 10^3 \lg \frac{D_{\text{ср.г}}}{r_3} \left( \lg \frac{D_{\text{ср.г}}}{r_3} + \frac{0,157}{n} \right)}. \quad (7)$$

Для компактных линий с плоскими фазами [3]:

$$X_0 = \frac{\omega U_\Phi}{\epsilon v_B \Pi E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}} \approx \frac{6,28 \cdot 10^{-5} U_\Phi}{n r_0 E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}}; \quad (8)$$

$$Z_B = 60 \frac{U_\Phi}{n r_0 E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}}, \quad (9)$$

где  $E_{\text{доп}}$  – допустимая напряженность электрического поля на поверхности провода;

$k_{\text{исп}}$  – коэффициент использования поверхности провода;

$v_B$  – скорость распространения электромагнитной волны;

$\Pi = 2\pi n r_0$  – площадь поверхности единицы длины провода.

Эквивалентные индуктивное сопротивление и емкостная проводимость ЭП с ПСФ [1]:

$$X_0 = \text{Re} \omega \left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n M_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n M_{ij} e^{j\Theta_{ij}} \right); \quad (10)$$

$$B_0 = \text{Re} \omega \left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n C_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \tilde{C}_{ij} \left( 1 - \frac{U_i}{U_j} e^{j\Theta_{ij}} \right) \right); \quad (11)$$

$$Z_B = \operatorname{Re} \frac{\sqrt{\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n M_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n M_{ij} e^{j\Theta_{ij}} \right)}}{\sqrt{\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n C_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n C_{ij} \left( 1 - \frac{U_i}{U_j} e^{j\Theta_{ij}} \right) \right)}}. \quad (12)$$

Здесь  $M_{ii}$ ,  $M_{ij}$  – взаимные индуктивности внутри системы проводов своей цепи и между проводами разных цепей соответственно;

$\Theta_{ij}$  – угол фазового сдвига между токами попарно сближенных фаз разных цепей;

$C_{ii}$ ,  $C_{ij}$  – собственные и взаимные емкости проводов разных цепей.

С учетом (7), (9) и (12) пропускная способность ВЛ по устойчивости: традиционной конструкции –

$$P_{п.с}^y = \left( \frac{U_{НОМ}^2}{\sqrt{19 \cdot 10^3 \lg \frac{D_{ср.г}}{r_3} \left( \lg \frac{D_{ср.г}}{r_3} + \frac{0,157}{n} \right) \sin \alpha l}} - \delta P \right) \frac{1}{(1 + k_{зап})}; \quad (13)$$

компактных –

$$P_{п.с}^y = \left( \frac{U_{НОМ}^2 n r_0 E_{доп} k_{исп}}{60 U_{\phi} \sin \alpha l} - \delta P \right) \frac{1}{(1 + k_{зап})}; \quad (14)$$

ЭП с ПСФ –

$$P_{п.с}^y = \left( \frac{U_{НОМ}^2}{\operatorname{Re} \frac{\sqrt{\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n M_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n M_{ij} e^{j\Theta_{ij}} \right)}}{\sqrt{\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n C_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n C_{ij} \left( 1 - \frac{U_i}{U_j} e^{j\Theta_{ij}} \right) \right)}}} \sin \alpha l} - \delta P \right) \frac{1}{(1 + k_{зап})}. \quad (15)$$

На практике представляют интерес граничные значения  $Z_{\text{вmin}}$  и  $Z_{\text{вmax}}$ , что соответствует максимальной  $P_{\text{п.с. max}}^y$  и минимальной  $P_{\text{п.с. min}}^y$  пропускным способностям ВЛ по устойчивости. Очевидно, что граничные значения  $Z_{\text{в}}$  будут соответствовать минимальным и максимальным значениям количества  $n_{\text{min}}$ ,  $n_{\text{max}}$  и сечения  $F_{\text{min}}$ ,  $F_{\text{max}}$  проводов, принимаемых на линиях данных номинального напряжения и конструкции [7].

Диапазон изменения  $n$  и  $F$  приведен в табл. 1.

Используя (5)–(15), по данным табл. 1 можно определить минимальные и максимальные значения волнового сопротивления  $Z_{\text{в}}$  и пропускной способности  $P_{\text{п.с.}}^y$  по условиям статической устойчивости для различных типов линий электропередачи.

Таблица 1

Максимальные и минимальные сечения  
и количество проводов для различных линий электропередачи

Тип линии			Класс напряжения			
			35	110	220	330
Традиционные	Сечение проводов	min	70/11	70/11	240/32	240/32
		max	150/19	240/32	500/64	500/64
	Количество проводов	min	1	1	1	2
		max	1	1	1	2
Одноцепные компактные	Сечение проводов	min	35/11	70/11	150/19	240/32
		max	50/19	240/32	240/32	—
	Количество проводов	min	1	2	3	3
		max	10	10	10	10
ЭП с ПСФ	Сечение проводов	min	35/11	70/11	240/32	240/66
		max	120/19	240/32	400/64	400/64
	Количество проводов	min	2	2	2	4
		max	2	2	6	6

Пропускная способность ВЛ по условию нагрева проводов определяется из ограничения [1]

$$I \leq I_{\text{доп}} k_{\text{т}},$$

где  $I$ ,  $I_{\text{доп}}$  — рабочий и допустимый по нагреву токи при температуре окружающей среды  $+25^\circ\text{C}$ ;

$k_{\text{т}}$  — поправочный температурный коэффициент, зависящий от температуры.

Таким образом, пропускная способность линии по условиям нагрева проводов составит [1]:

$$P_{\text{п.с.}}^{\text{н}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} n I_{\text{доп}} \cos \varphi, \quad (16)$$

где  $\cos\varphi$  — коэффициент мощности;

$n$  — количество проводов в фазе.

Допустимый ток по линии определяется из условия, что при длительном его протекании проводник нагреется до допустимой температуры. Выражение для нахождения  $I_{\text{доп}}$  имеет вид [5]

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{\kappa_2}{\kappa_1} \frac{F(T_{\text{доп}} - T_{\text{окр}})F_{\text{охл}}}{\rho l}}, \quad (17)$$

где  $\kappa_1$  — коэффициент перевода электрической мощности в тепловую;

$\kappa_2$  — то же, теплопроводности;

$F$  — поперечное сечение проводника;

$F_{\text{охл}}$  — поверхность охлаждения проводника;

$\rho$  — удельное сопротивление;

$l$  — длина проводника.

Таким образом, для ВЛ в целом допустимый ток и, следовательно, пропускная способность линии по условиям нагрева зависят от суммарного сечения и площади поверхности проводников, входящих в состав линии электропередачи. Суммарное сечение электропередачи можно увеличить как посредством увеличения числа проводов в фазе, так и увеличением сечения одиночного провода. Площадь поверхности при постоянном суммарном сечении зависит от количества проводов, входящих в фазу ВЛ. Также необходимо отметить, что пропускная способность по условию допустимого нагрева практически не зависит от конструктивного исполнения электропередачи (обычного или компактного).

Из сказанного выше следует, что минимальное и максимальное значения пропускной способности по нагреву можно определить по (16), используя граничные значения  $n$  и  $F$  из табл. 1.

Ограничение пропускной способности линии по допустимой потере напряжения имеет место только на ВЛ напряжением  $U_n \leq 110$  кВ. Для линий напряжением 220 кВ пропускная способность ограничивается статической устойчивостью либо допустимым нагревом проводов напряжением 330 кВ и выше — статической устойчивостью [7]. В связи с этим рассмотрение пропускной способности по допустимой потере напряжения для ВЛ выше 110 кВ представляет только теоретический интерес.

Пропускную способность по условию допустимых потерь напряжения определяют из неравенства  $\delta U < \delta U_{\text{доп}}$ , где допустимое отклонение напряжения в сети до 1 кВ составляет: нормальное  $\delta U_{\text{доп}} = \pm 5\%$ , максимальное  $\delta U_{\text{доп}} = 10\%$ .

На вторичных шинах подстанций 35–220/6–20 кВ, как правило, должен обеспечиваться встречный режим регулирования напряжения, и в режиме максимальных нагрузок отклонение напряжения должно быть в пределах  $\pm 5\text{...}10\%$ . Из этого следует, что допустимые потери напряжения составляют  $\Delta U_{\text{доп}} = 15\text{...}20\%$ . Условие, ограничивающее пропускную способность, имеет вид [1]

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^n P_i (R_i + X_i \operatorname{tg} \varphi_i)}{U_{\text{ном}}^2} 100 \leq \Delta U_{\text{доп}}, \quad (18)$$

где  $R_i, X_i$  – параметры  $i$ -го участка сети;

$P_i, \text{tg}\varphi_i$  – активная мощность и  $\text{tg}\varphi$  на  $i$ -м участке сети;

$n$  – число участков сети.

В случае, когда сеть состоит из одного участка, пропускная способность по условию потерь напряжения [1] будет

$$P_{\text{п.с}}^{\Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{доп}} U_{\text{ном}}^2}{(R_0 + X_0 \text{tg}\varphi) \cdot 1 \cdot 100}. \quad (19)$$

Нахождение граничных значений пропускной способности по допустимой потере напряжения произведем по формулам:

$$P_{\text{п.с. max}}^{\Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{доп. max}} U_{\text{ном}}^2}{(R_{\text{min}} + X_{\text{min}} \text{tg}\varphi_{\text{min}}) \cdot 100}; \quad (20)$$

$$P_{\text{п.с. min}}^{\Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{доп. min}} U_{\text{ном}}^2}{(R_{\text{max}} + X_{\text{max}} \text{tg}\varphi_{\text{max}}) \cdot 100}. \quad (21)$$

Здесь  $R_{\text{min}}, R_{\text{max}}, X_{\text{min}}, X_{\text{max}}$  – активное и реактивное сопротивления ВЛ для минимального и максимального сечений проводов, применяемых на линиях данных номинального напряжения и конструкции (табл. 1).

Сказанное выше справедливо для нормального режима работы ВЛ. Рассмотрим ограничения пропускной способности ВЛ в ремонтных и послеаварийных режимах.

Для линий электропередачи традиционной конструкции характерны следующие режимы: 1) отключение одной фазы при устойчивых однофазных коротких замыканиях на землю; 2) отключение трех фаз при устойчивых трех-, двух- и однофазных коротких замыканиях.

В первом случае линия переходит в неполнофазный режим работы с резко несимметричными параметрами по фазам. При этом мощность, которую можно передать по ВЛ [1]:

$$P_{\text{п.с}} = k P_{\text{нат}}, \quad (22)$$

где  $k$  – коэффициент, который может быть равен лишь 0,18–0,2 [6].

Во втором случае происходит полное отключение ВЛ.

Для компактных одноцепных ВЛ и ЭП с ПСФ при определении пропускной способности в ремонтных и послеаварийных режимах большое значение имеет вид короткого замыкания (КЗ). В зависимости от вида КЗ и от схем конечных подстанций могут отключаться как одиночные провода (например, компактные коаксиальные четырехсегментные ВЛ [1] и ЭП с ПСФ), так и одна из цепей (ЭП с ПСФ).

Рассмотрим ограничение пропускной способности для различного количественного состава проводов ВЛ.

Для определения пропускной способности компактных ВЛ в ремонтных и послеаварийных режимах по условиям статической устойчи-

ности можно воспользоваться формулой (4) с учетом того, что изменится  $Z_B$  из-за изменения количества проводов в фазе ВЛ.

Для компактных ВЛ волновое сопротивление каждой из фаз:

$$\begin{aligned} Z_B^A &= 60 \frac{U_\Phi}{n_A r_0 E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}^A}; \\ Z_B^B &= 60 \frac{U_\Phi}{n_B r_0 E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}^B}; \\ Z_B^C &= 60 \frac{U_\Phi}{n_C r_0 E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}^C}, \end{aligned} \quad (23)$$

где  $n_A, n_B, n_C$  — количество оставшихся в работе проводов в фазах  $A, B, C$  соответственно;

$k_{\text{исп}}^A, k_{\text{исп}}^B, k_{\text{исп}}^C$  — коэффициенты использования поверхности проводов фаз  $A, B, C$ .

Среднее волновое сопротивление компактной ВЛ в ремонтных и послеаварийных режимах

$$Z_B = \frac{60}{3} \frac{U_\Phi}{r_0 E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}^{\text{ср}}} \frac{n_B n_C + n_A n_B + n_A n_C}{n_A n_B n_C}. \quad (24)$$

$$\text{Здесь } k_{\text{исп}}^{\text{ср}} = \frac{1}{3} k_{\text{исп}}^A k_{\text{исп}}^B k_{\text{исп}}^C.$$

Пренебрегая несимметрией  $Z_B$  по фазам, получим

$$P_{\text{п.с.ав}}^{\text{у}} = \left( \frac{U_{\text{ном}}^2 r_0 E_{\text{доп}} k_{\text{исп}}^{\text{ср}}}{U_\Phi \sin \alpha l} \frac{n_B n_C + n_A n_B + n_A n_C}{n_A n_B n_C} - \delta P \right) \frac{1}{(1 + k_{\text{зан}})}. \quad (25)$$

Волновое сопротивление ЭП с ПСФ в ремонтных и послеаварийных режимах с количеством проводов, оставшихся в работе,  $n_{\text{ав}}$  рассчитаем по формуле

$$Z_B^{\text{ав}} = \text{Re} \sqrt{\frac{\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} M_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} M_{ij} e^{j\theta_{ij}} \right)}{\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} C_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} C_{ij} \left( 1 - \frac{U_i}{U_j} \right) \right)}}}. \quad (26)$$

Пропускная способность ЭП с ПСФ в ремонтных и послеаварийных режимах по устойчивости составит



$$P_{\text{п.с.ав}}^y = \left( \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\operatorname{Re} \left[ \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} M_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} M_{ij} e^{j\theta_{ij}}}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} C_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_{\text{ав}}} C_{ij} \left(1 - \frac{U_i}{U_j} e^{j\theta_{ij}}\right)} \right]} \sin \alpha l \right) - \delta P \frac{1}{(1 + k_{\text{зап}})}. \quad (27)$$

Для определения пропускной способности ВЛ в ремонтных и послеаварийных режимах по условиям нагрева проводов при разном количестве оставшихся в работе проводов фаз можно воспользоваться формулой

$$P_{\text{п.с.ав}}^H = (P_A + P_B + P_C).$$

Здесь  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  — мощность, передаваемая по каждой фазе в ремонтном или послеаварийном режиме;

$$P_A = \frac{P_{\text{п.с.}}^H n_A}{nmk}; \quad P_B = \frac{P_{\text{п.с.}}^H n_B}{nmk}; \quad P_C = \frac{P_{\text{п.с.}}^H n_C}{nmk}, \quad (28)$$

где  $P_{\text{п.с.}}^H$  — пропускная способность ЛЭП по условиям нагрева проводов в нормальном режиме работы;

$m$  — количество фаз в линии;

$k$  — количество цепей.

Таким образом с учетом (28)

$$P_{\text{п.с.ав}}^H = \frac{P_{\text{п.с.}}^H (n_A + n_B + n_C)}{mk}. \quad (29)$$

Пропускная способность ВЛ в ремонтных и послеаварийных режимах по условиям допустимой потери напряжения определится по (19) с учетом изменившегося сопротивления линии

$$P_{\text{п.с. max}}^{\Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{доп. max}} U_{\text{НОМ}}^2}{(R_{\text{ав}} + X_{\text{ав}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{ав}}) 100}, \quad (30)$$

где  $X_{\text{ав}}$  — реактивное сопротивление линии в ремонтных и послеаварийных режимах;

$$X_{0ав} = \frac{1}{3} \frac{6,28 \cdot 10^{-5} U_{\phi}}{r_0 E_{доп} k_{исп}} \frac{n_B n_C + n_A n_B + n_A n_C}{n_A n_B n_C}; \quad (31)$$

$R_{ав}$  – активное сопротивление линии в ремонтных и послеаварийных режимах;

$$R_{0ав} = \frac{R_0}{3} \frac{n_B n_C + n_A n_B + n_A n_C}{n_A n_B n_C}. \quad (32)$$

Здесь  $R_0$  – погонное индуктивное сопротивление провода.

Пропускная способность линии в послеаварийном режиме по условиям допустимой потери напряжения компактных ЛЭП составит

$$\Delta P_{п.с.ав}^{\Delta U} = \frac{\delta U_{доп.ав} U_{ном}^2}{\frac{n_B n_C + n_A n_C + n_A n_B}{n_A n_B n_C} \left( R_0 + \frac{6,28 \cdot 10^{-5}}{3} \frac{U_{\phi} \operatorname{tg} \varphi}{r_0 E_{доп} k_{исп}} \right)} 100l, \quad (33)$$

ЭП с ПСФ –

$$\Delta P_{п.с.ав}^{\Delta U} = \frac{\delta U_{доп.ав} U_{ном}^2}{\left( R_0 \frac{n_B n_C + n_A n_C + n_A n_B}{n_A n_B n_C} + \operatorname{Re} \left( \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{n_{ав}} M_{ij} + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{n_{ав}} M_{ij} e^{j\theta_{ij}} \right) \operatorname{tg} \varphi \right)} 100l \quad (34)$$

По изложенной выше методике были проведены расчеты и построены зоны ограничения пропускной способности линий электропередачи разной конструкции для различных номинальных напряжений (35, 110, 220, 330 кВ) [7].

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены зависимости предела передаваемой мощности при использовании минимального и максимального сечений и количества проводов ВЛ (табл. 1) напряжением 110 кВ компактных электропередач (рис. 1) и ЭП с ПСФ трехконтурной разноцепной конструкции (рис. 2) от длины линии.

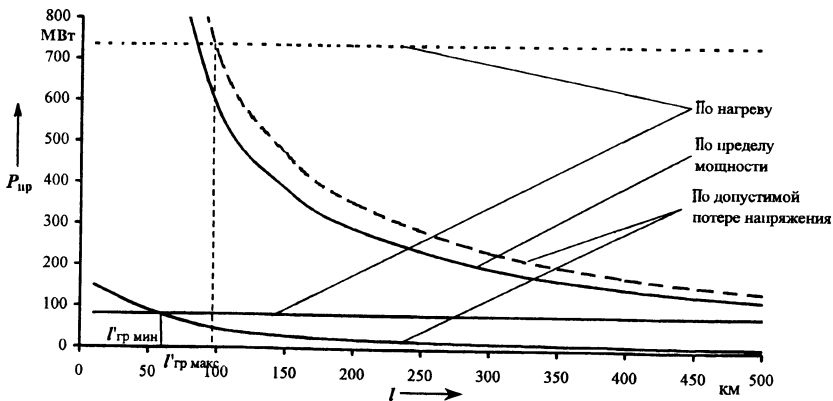


Рис. 1. --- — максимальное; ---- — минимальное сечения проводов

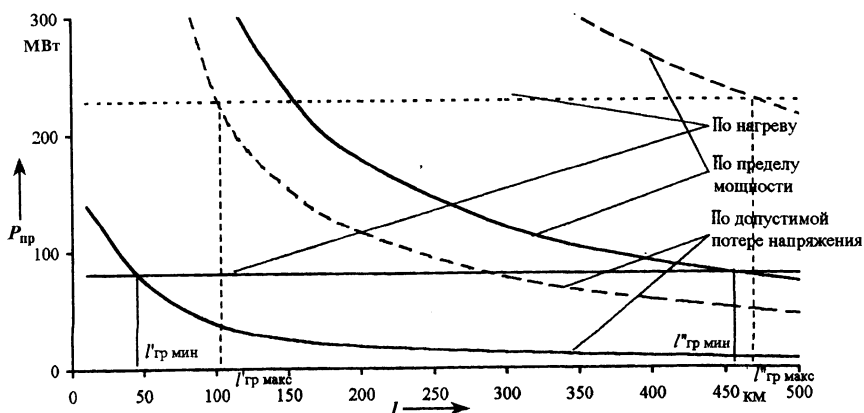


Рис. 2. --- — максимальное; — — минимальное сечения проводов

По данным зависимостям можно определить граничные длины линий, при которых происходит смена характера ограничения пропускной способности линий электропередачи.

Так, для ВЛ напряжением 110 кВ компактного исполнения (рис. 1) при использовании минимального сечения проводов предел передаваемой мощности для линий длиной до 60 км ограничивается, главным образом, нагревом проводов, при длинах свыше 60 км — допустимой потерей напряжения. Таким образом, граничная длина для минимального сечения проводов линий напряжением 110 кВ компактного исполнения, при которой происходит смена характера ограничения пропускной способности (с ограничения по нагреву к ограничению по допустимой потере напряжения), равна  $l_{гр\ мин} \approx 60$  км.

Аналогичным образом определяется граничная длина и для максимального сечения проводов  $l_{гр\ макс} \approx 90$  км.

Пересечения зависимостей пропускной способности по нагреву и пределу передаваемой мощности для минимального и максимального сечений проводов лежат вне области применения данного типа электропередач.

Для ЭП с ПСФ напряжением 110 кВ (рис. 2) граничная длина для минимального сечения проводов  $l_{гр\ мин} \approx 45$  км, для максимального сечения  $l_{гр\ макс} \approx 105$  км.

Пересечение зависимостей пропускной способности по нагреву и пределу передаваемой мощности дает граничную длину, при которой происходит смена характера ограничения пропускной способности для минимального сечения проводов (с ограничениями по нагреву и пределу мощности)  $l''_{гр\ мин} \approx 455$  км, для максимального сечения  $l''_{гр\ макс} \approx 470$  км.

Значения граничных длин ВЛ напряжением 35–330 кВ различных конструкций приведены в табл. 2.

$U_{\text{ном}}$ , кВ	Тип линии	$l_{\text{гр.мин}}$ , км	$l_{\text{гр.макс}}$ , км	$l'_{\text{гр.мин}}$ , км	$l'_{\text{гр.макс}}$ , км
35	Традиционные	30	60	455	470
	Компактные	45	105	—	—
	ЭП с ПСФ	15	25	180	260
110	Традиционные	55	90	—	340
	Компактные	60	95	—	—
	ЭП с ПСФ	45	105	455	470
220	Традиционные	90	140	440	670
	Компактные	90	150	620	680
	ЭП с ПСФ	60	180	410	—
330	Традиционные	75	190	310	390
	Компактные	80	120	—	580
	ЭП с ПСФ	60	120	160	660

### ВЫВОДЫ

1. Сформулированы условия технических ограничений пропускной способности и дано их теоретическое описание для различных конструкций ВЛ для нормального, ремонтных и послеаварийных режимов.

2. Произведена количественная оценка пропускной способности с учетом технических ограничений различных конструкций линий (традиционных, компактных, ЭП с ПСФ) и напряжений 35–330 кВ. Полученные результаты позволяют определять граничные длины, при которых происходит смена характера ограничения пропускной способности данных линий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В. Т. Федин, Ю. Д. Головач, Г. И. Селиверстов, М. С. Чернецкий. — Мн.: Навука і тэхніка, 1993.
2. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / Под ред. Г. Н. Александрова. — Л.: Изв. Ленинградского ун-та, 1987.
3. Александров Г. Н. Передача электрической энергии переменным током. — Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Электрические системы и сети: Проектирование. — Мн.: Выш. шк., 1998.
5. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учеб. для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Жанаев Д. Т. Линии электропередач с резервной фазой. — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1990.
7. Зувев Э. М. Выбор типа воздушной линии электропередачи по комплексному критерию // Электричество. — 1991. — № 11.