

## Определяне на сечението на проводниците на електропровод по допустима загуба на напрежение и по икономическа плътност на тока

### Общи положения

Методите за избор на сечения по допустима на напрежение са разработени за проводници поставяни в мрежи с номинално напрежение до 20 кВ включително.

Като основа на тези методи за определяне на сечението по допустима загуба на напрежение се използва обстоятелство, че стойността на реактивното съпротивление на проводниците  $x_0$  слабо зависи от сечението на проводника  $F$ :

- за въздушни ЕП  $x_0 = 0,36 - 0,46$  Ом/км;
- за кабелни ЕП с напрежение 6 – 10 кВ  $x_0 = 0,06 - 0,09$  Ом/км;
- за кабелни ЕП напрежение 20 кВ  $x_0 = 0,11 - 0,13$  Ом/км.

Стойността на допустимата загуба на напрежение в ЕП се пресмята използвайки мощностите и съпротивленията на участъците съгласно формулата:

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{1}{U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot r_{0i} \cdot l_i}{U_{\text{ном}}} + \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_{0i} \cdot l_i}{U_{\text{ном}}} = \Delta U_{\text{допа}} + \Delta U_{\text{р}}$$

и се състои от две части – загуба на напрежение в активните съпротивления  $\Delta U_{\text{допа}}$  и загуба на напрежение в реактивните съпротивления  $\Delta U_{\text{р}}$ .

Отчитайки обстоятелството, че  $x_0$  практически не зависи от сечението на проводника, стойността на  $\Delta U_{\text{р}}$  може да се определи, използвайки средната стойност на реактивното съпротивление  $x_{0\text{ср}}$  съгласно указания горе диапазон на изменение:

$$\Delta U_{\text{р}} = \frac{x_{0\text{ср}}}{U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot l_i.$$

Използвайки предварително зададената стойност на допустимата загуба на напрежение в ЕП пресмятаме допустимата загуба на напрежение в активните съпротивления:

$$\Delta U_{\text{доп а}} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{\text{р}}.$$

От друга страна загубата на напрежение в активните съпротивления се определя както следва:

$$\Delta U_{\text{доп а}} = \frac{1}{U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot r_{0i} \cdot l_i,$$

от сечението зависи специфичното активно съпротивление  $r_0 = \frac{1}{\gamma \cdot F}$ ,

където  $\gamma$  – специфичната проводимост на материала на проводника.

Если ЕП се състои само от един участък, то стойността на сечението може да се определи съгласно израза за  $\Delta U_{\text{доп а}}$ :

$$F = \frac{P \cdot l}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп а}}}.$$

При голямо количество на участъци, тоест ЕП, е необходимо при пресмятане на сечението на проводниците са нужни допълнителни условия. Това са трите условия:

- постоянно сечение на проводниците на всички участъци  $F = \text{const}$ ;
- минимален разход на проводников материал  $V \rightarrow \text{min}$ ;
- минимални загуби на активна мощност  $\Delta P \rightarrow \text{min}$ .

### ***Избор на сеченията на участъците по допустима загуба на напрежение и постоянно сечение***

По конфигурация електрическите мрежи НН и СН в България най-често са отворени и разклонени. За да се определи сечението във всеки от нейните участъци цялата мрежа се разделя на магистрала и подмагистрали. Магистралата е съвкупността от последователно свързани участъци, започващи от началото на линията и завършващи до една от крайните ѝ точки, за която сумата от произведенията на протичащите мощности през участъците и дължината им е максимална. За даден участък  $i$  произведението на протичащата през него мощност  $S_i$  по дължината му  $l_i$  се нарича товаров момент и се означава с буквата  $M_i$ . За магистралата е валидно следното съотношение

$$M = \sum_1^k (S_i l_i) = \max ,$$

където  $k$  е номер на последния участък от магистралата.

При изпълняване на магистралата с еднакво сечение формулата за пресмятане на стойността на загубите на напрежение в активните съпротивления се представя по следния начин:

$$\Delta U_{\text{доп а}} = \frac{1}{U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot r_{0i} \cdot l_i = \frac{r_0}{U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i = \frac{1}{\gamma \cdot F \cdot U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i .$$

Използвайки я намираме стойността на сечението на проводника:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп а}}} .$$

Получената стойност на сечението се закръглява към най-близкото стандартно сечение. За него се определят стойностите на  $r_0$  и  $x_0$ . Правим проверка като определяме действителната загуба на напрежение

$$\Delta U = \frac{r_0}{U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i + \frac{x_0}{U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot l_i$$

и я сравняваме с допустимата. Ако действителната стойност на загубата на напрежение е по голяма от допустимата, то сечението се увеличава до следващото стандартно и пресмятането се повтаря.

Проверката може да не се изпълнява, ако за избраното стандартно сечение действителната стойност на  $x_0$  е по-малка от използваната  $x_{0\text{ср}}$ .

Окончателното избрано сечение се проверява по нагряване:

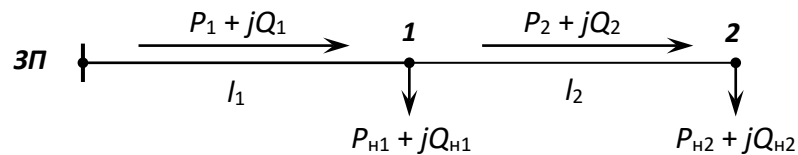
$$I \leq I_{\text{доп}} .$$

### ***Избор на сечението на проводниците по условие за допустима загуба на напрежение и минимален разход на метал***

Когато електропроводните линии са изпълнени във вид на магистрала, най-силно се натоварват началните участъци. Ако всички участъци са с еднакво сечение, първите от тях ще са

претоварени, а последните – недонатоварени. За ограничаване на този недостатък на линиите с постоянно сечение е необходимо да се знае как трябва да се намалява сечението увеличавайки разстоянието спрямо източника на захранване, така че да не се превишава стойността на  $\Delta U_{\text{доп}}$  и да имаме максимална икономия на проводников материал.

Ще разгледаме ЕП с два товара (фиг. 11.1).



Фиг 11.1 – Електропровод ЕП с два товара

В тази мрежа известни са следните величини:

- мощностите на товарите във възлите;
- дължините на участъците;
- допустимата загуба на напрежение.

Трябва да се определи сечението на проводниците на участъците по условие на минимален разход на метал  $V \rightarrow \min$ .

Определяме мощностите на отделните участъци по I закон на Кирхоф като започваме от крайния възел (точка 2):

$$P_2 + jQ_2 = P_{н2} + jQ_{н2};$$

$$P_1 + jQ_1 = P_{н1} + jQ_{н1} + P_2 + jQ_2 = P_{н1} + jQ_{н1} + P_{н2} + jQ_{н2}.$$

Предполагайки, че е известно средното значение за индуктивното съпротивление  $x_{0cp}$  на електропровода, с него се определят загубите на напрежение от протичащите реактивни мощности:

$$\Delta U_p = \frac{x_{0cp}}{U_{ном}} \cdot \sum_{i=1}^2 Q_i \cdot l_i$$

След това определяме допустимата загуба на напрежение в активните съпротивления:

$$\Delta U_{\text{доп а}} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{\text{р}}.$$

Предполагаме, че ни е известна стойността на загубата на напрежение в активното съпротивление на 1-я участък  $\Delta U_{\text{доп а 1}}$ . Тогава стойността на загубата на напрежение в активното съпротивление на 2-я участък се определя както следва:

$$\Delta U_{\text{доп а 2}} = \Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}}.$$

В този случай сеченията на участъците ще са равни:

$$F_1 = \frac{P_1 \cdot l_1}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп а 1}}} \quad \text{и} \quad F_2 = \frac{P_2 \cdot l_2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot (\Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}})}.$$

Разходът на материал за фазовия проводник в мрежата се определя както следва:

$$V = F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 = \frac{P_1 \cdot l_1^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп а 1}}} + \frac{P_2 \cdot l_2^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot (\Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}})}.$$

В тази формула всички величини с изключение на  $\Delta U_{\text{доп а 1}}$  са известни. За да определим минималния разход на проводников материал е необходимо да намерим частната производа по  $\Delta U_{\text{доп а 1}}$  и да я приравним на нула:

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta U_{\text{доп а 1}}} = -\frac{P_1 \cdot l_1^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп а 1}}^2} + \frac{P_2 \cdot l_2^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot (\Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}})^2} = 0.$$

Получава се равенството:

$$\frac{P_1 \cdot l_1^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп а 1}}^2} = \frac{P_2 \cdot l_2^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot (\Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}})^2}.$$

Умножавайки и разделяйки лявата част на равенството на  $P_1$ , а дясната – на  $P_2$  се получава израза:

$$\frac{1}{P_1} \cdot \frac{P_1^2 \cdot l_1^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп а 1}}^2} = \frac{1}{P_2} \cdot \frac{P_2^2 \cdot l_2^2}{\gamma \cdot U_{\text{ном}} \cdot (\Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}})^2}.$$

Умножавайки двете части на равенството на  $\frac{1}{\gamma \cdot U_{\text{НОМ}}}$  получаваме:

$$\frac{1}{P_1} \cdot \frac{P_1^2 \cdot l_1^2}{\gamma^2 \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot \Delta U_{\text{доп а 1}}^2} = \frac{1}{P_2} \cdot \frac{P_2^2 \cdot l_2^2}{\gamma^2 \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot (\Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}})^2}. \quad (11.1)$$

В горната формула изразите

$$\frac{P_1^2 \cdot l_1^2}{\gamma^2 \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot \Delta U_{\text{доп а 1}}^2} \quad \text{и} \quad \frac{P_2^2 \cdot l_2^2}{\gamma^2 \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot (\Delta U_{\text{доп а}} - \Delta U_{\text{доп а 1}})^2}$$

представяват квадратите на сеченията на участъците на ЕП.

Формулата (11.1) може да се представи по следния начин:

$$\frac{F_1^2}{P_1} = \frac{F_2^2}{P_2} \quad \text{или} \quad \frac{F_1}{\sqrt{P_1}} = \frac{F_2}{\sqrt{P_2}}.$$

По този начин ние получихме условието, което трябва да се спазва при определяне сечението на участъците от ЕП, за да не се превишава допустимата загуба на напрежение при минимален разход на метал. Този извод може да разпространи за магистрала с  $n$  участъка

$$\frac{F_1}{\sqrt{P_1}} = \frac{F_2}{\sqrt{P_2}} = \frac{F_n}{\sqrt{P_n}} = \text{const} = k_p$$

Стойността на коефициента  $k_p = \frac{F}{\sqrt{P}}$  се явява постоянна за всеки ЕП и се определя по допустимата загуба на напрежение в активните съпротивления както следва:

$$\Delta U_{\text{доп а}} = \frac{1}{\gamma \cdot U_{\text{НОМ}}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_i \cdot l_i}{F_i} = \frac{1}{\gamma \cdot U_{\text{НОМ}}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{P_i}}{F_i} \cdot \sqrt{P_i} \cdot l_i = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{1}{\gamma \cdot U_{\text{НОМ}}} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{P_i} \cdot l_i \Rightarrow$$

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{P_i} \cdot l_i}{\gamma \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \Delta U_{\text{доп а}}}.$$

След определянето на коефициента  $k_p$  пресмятаме сечението на всеки участък от магистралата:

$$F_i = k_p \cdot \sqrt{P_i}.$$

Сеченията на проводниците се закръглят до най-близките стандартни. Препоръчва се в началните участъци на линията сеченията да се закръгляват към по-големите стандартни сечения, а в крайните – към по-малките. Определят се специфичните активно и реактивно съпротивление за избраните проводници и се прави проверка по загуба на напрежение и нагряване. Ако сеченията не удовлетворяват условието по допустима загуба на напрежение, то се увеличават сечения на тези участъци, стойността на загубата на напрежение на които е най-голяма.

### ***Избор на сечението на проводниците по условие за допустима загуба на напрежение и минимални загуби на мощност***

Сеченията на проводниците, избрани по условие на минимален разход на проводников материал, не обезпечават минимална загуба на мощност.

Да намерим сечението на проводник, които отговарят на условието  $\Delta P \rightarrow \min$ .

За мрежата състояща се от два ЕП, представени на фиг.11.1, загубата на активна мощност се пресмята както следва:

$$\Delta P = \frac{S_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot R_1 + \frac{S_2^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot R_2 = \frac{S_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_1}{\gamma \cdot F_1} + \frac{S_2^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_2}{\gamma \cdot F_2}. \quad (11.2)$$

Да обозначим обема на проводника на една фаза на двата ЕП чрез  $V$ , на първия участък –  $V_1$ . Сеченията на двата участъка ще се определят по следния начин:

$$F_1 = \frac{V_1}{l_1} \quad \text{и} \quad F_2 = \frac{V - V_1}{l_2}.$$

Замествайки тези изрази във формулата (11.2) и получаваме:

$$\Delta P = \frac{S_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_1^2}{\gamma \cdot V_1} + \frac{S_2^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_2^2}{\gamma \cdot (V - V_1)}.$$

В тази формула всички величини с изключение на  $V_1$  са известни. За определене на минималната загуба на активна мощност е необходимо да се намери частната производна по  $V_1$  и да се приравни на нула:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial V_1} = -\frac{S_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_1^2}{\gamma \cdot V_1^2} + \frac{S_2^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_2^2}{\gamma \cdot (V - V_1)^2} = 0.$$

Получава се равенството:

$$\frac{S_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_1^2}{\gamma \cdot V_1^2} = \frac{S_2^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \frac{l_2^2}{\gamma \cdot (V - V_1)^2}.$$

Разделяйки на  $\gamma \cdot U_{\text{НОМ}}$  получаваме:

$$\frac{S_1^2 \cdot l_1^2}{V_1^2} = \frac{S_2^2 \cdot l_2^2}{(V - V_1)^2}. \quad (11.3)$$

Тъй като  $V_1 = F_1 \cdot l_1$ , а  $V - V_1 = F_2 \cdot l_2$ , то формулата (11.3) може да се преобразува както следва:

$$\frac{S_1^2 \cdot l_1^2}{F_1^2 \cdot l_1^2} = \frac{S_2^2 \cdot l_2^2}{F_2^2 \cdot l_2^2} \Rightarrow \frac{S_1^2}{F_1^2} = \frac{S_2^2}{F_2^2} \Rightarrow \frac{S_1}{F_1} = \frac{S_2}{F_2}.$$

Изразявайки пълната мощност на участъците чрез токовете и номиналното напрежение на ЕП получаваме:

$$\frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_1}{F_1} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_2}{F_2} \Rightarrow \frac{I_1}{F_1} = \frac{I_2}{F_2}.$$

Отношението на тока към сечението ни дава плътността на тока  $j_{\Delta P}$  (А/мм<sup>2</sup>). Последният резултат може да се разпространи за магистрала от  $n$  участъка:



$$\frac{I_1}{F_1} = \frac{I_2}{F_2} = \dots = \frac{I_n}{F_n} = \text{const} = j_{\Delta P}$$

По този начин се получава необходимото условие при избора на сечение да имаме минимална загуба на активна мощност:

$$j_{\Delta P} = \text{const.}$$

Стойността на плътността на тока  $j_{\Delta P}$  се определя по допустима загуба на напрежение в активните съпротивления както следва:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{доп а}} &= \frac{1}{\gamma \cdot U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_i \cdot l_i}{F_i} = \frac{1}{\gamma \cdot U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_i \cdot \cos \varphi_i \cdot l_i}{F_i} = \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot j_{\Delta P}}{\gamma} \cdot \sum_{i=1}^n \cos \varphi_i \cdot l_i \quad \Rightarrow \\ j_{\Delta P} &= \frac{\gamma \cdot U_{\text{доп а}}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^n \cos \varphi_i \cdot l_i}. \end{aligned}$$

Сеченията на проводниците се пресмятат чрез тока на участъците:

$$F_i = \frac{I_i}{j_{\Delta P}},$$

където  $I_i = \frac{S_i}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}.$

Сеченията на проводниците се закръглят до най-близките стандартни, определят се специфичните активно и реактивно съпротивление за избраните проводници и се прави проверка по допустима загуба на напрежение и нагряване. Ако сеченията не удовлетворяват условието по допустима загуба на напрежение, то се увеличават сечения на тези участъци, стойността на загубата на напрежение на които е най-голяма.

Сеченията на фазовите проводници на подмагистралите (отклоненията) се определят по остатъчните допустими загуби на

напрежение  $\Delta U_{\partial.ост}$  и чрез формулата за постоянно сечение на магистралния електропровод.

### ***Сравнителна характеристика на методите***

Изборът на сечения по условие на минимален разход на метал ( $V \rightarrow min$ ) и минимална загуба на активна мощност ( $\Delta P \rightarrow min$ ) дават по икономични резултати, по сравнение с метода постоянно сечение на магистралния електропровод ( $F=const$ ).

Изборът на сечения по условие на минимален разход на метал  $V \rightarrow min$  довежда до икономия на капитални и постоянни експлуатационни разходи (на обслужване и ремонт на ЕП). Методът се използва за потребители с малки стойности на времето на използване на максималния товар и малки токови натоварвания. За консуматори с големи мощностни товари и значителни стойности на  $T_m$  по-добре да се използва метода избор на сечение по условие на минимална загуба на мощност  $\Delta P \rightarrow min$ . Това води до намаляване на експлуатационните разходи, свързани със загубите на мощност (електроенергии) в ЕП.

Изборът на сечение по икономична плътност на тока на тока отчита и двата фактора. Ето защо този метод се явява основен.

Ако дължината на ЕП е голяма, то сечението, избрано по икономична плътност на тока  $j_{ик}$ , може да не обезпечи допустимата загуба на напрежение. Това води до необходимостта от ново пресмятане на сечението. Ето защо е нужно отново да се определи плътност на тока изхождайки от условието за допустима загуба на напрежение  $j_{\Delta P}$ . Ново изчислената плътност на тока се сравнява с икономическата. Сечението се определя използвайки плътност на тока, чиято стойност е по-малка.

### **Методика за избор на сечение по условие за икономическа плътност на тока**

1.Необходими изходни данни за проектираната линия. Приема се, че са зададени номинално напрежение  $U_H$  на проектираната линия, пълната мощност в режим на максимално

натоварване  $S_{\max}$ , материала и конструктивното изпълнение ( $\rho$ ), времето на максималния товар  $T_{\max}$ .

2.Изчислява се тока за режима на максимално натоварване

$$I_{\max} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3}U_n}$$

3.По данните за конструктивното изпълнение на линията, материала на проводника и времето на максималния товар от таблица се определя икономическата плътност на тока  $j_{ик}$ .

4.Изчислява се икономичното сечение по

$$F_{ик} = \frac{I_{\max}}{j_{ик}}$$

Това сечение се закръгля към най-близкото до него стандартно сечение  $F_{ст}$ .

5.Избраното стандартно сечение се проверява по всички технически ограничения.