

УДК 681.513.5

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В.К. Хлебников

Южно-Российский государственный  
технический университет  
(Новочеркасский политехнический институт)

South-Russian State  
Technical University  
(Novocherkassk Polytechnic Institute)

*На основании уравнения теплового баланса кабеля 6(10) кВ получено выражение для определения температуры жил кабелей при любом способе прокладки, не требующее вычисления термических сопротивлений элементов кабеля и окружающей среды. Показано, что увеличение плотности (коэффициента заполнения) графика нагрузки в большей степени влияет на рост годовых нагрузочных потерь электроэнергии в кабельных линиях при учёте нагрева жил, чем глубина прокладки кабелей в траншее. Влияние нагрева жил кабелей на потери электроэнергии возрастает с увеличением плотности графика нагрузки.*

*Ключевые слова:* кабельная линия, потери мощности, потери электроэнергии, температура жил, климатические условия.

*On the basis of the cable thermal balance equation 6 (10) kV there has been developed the expression for temperature test of cable conductors (any cabling method) not requiring calculations of thermal resistance of cable elements and environment. It has been shown that the increase in load schedule density (load factor) rather than cabling depth in trench influences the growth of annual electric power load losses in cable lines allowing for cable conductors heating. The influence of the cable conductors heating on the growth of electric power losses enhances with increasing of load schedule density.*

*Key words:* cable line, capacity losses, electric power loss, cable conductors temperature, climatic conditions.

**П**ОТЕРИ активной мощности и электроэнергии в кабельных линиях зависят от режима (тока и напряжения), параметров линий (активных сопротивлений и проводимостей), климатических условий (температуры окружающей среды), условий прокладки.

Активное сопротивление токоведущих жил кабельных линий, приводимое в справочниках [1–3], определено для постоянного тока при температуре +20°С. Увеличение активного сопротивления токоведущих жил сечением 150–240 мм<sup>2</sup> при переменном токе от поверхностного эффекта учитывается умножением на поправочный коэффициент  $k$  (для трехжильных кабелей с поясной изоляцией  $k=1,01 \div 1,035$  [4]). В значительной мере активное сопротивление жилы зависит от температуры её нагрева:

$$R_T = R_{20^\circ} [1 + \alpha(T_{\text{ж}} - 20^\circ)], \quad (1)$$

где  $R_{20^\circ}$  – активное сопротивление жилы переменному току при температуре 20°С, Ом/м;  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления ( $\alpha = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$ );  $T_{\text{ж}}$  – температура жилы, °С.

Активная проводимость кабеля может быть определена через емкостную проводимость  $B$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Значение  $\text{tg}\delta$  приводится в справочниках, как правило, при температуре 20°С [5]. При увеличении температуры значение  $\text{tg}\delta$  существенно увеличивается. При изменении температуры изоляции  $T_{\text{из}}$  в диапазоне 20–80°С  $\text{tg}\delta$  изменяется следующим образом [5]:

$$\text{tg}\delta_T = \text{tg}\delta_{20^\circ} e^{\gamma(T_{\text{из}} - 20^\circ)}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, зависящий от типа диэлектрика, конструкции и состояния изоляции.

Увеличение  $\text{tg}\delta_T$  по отношению к  $\text{tg}\delta_{20^\circ}$  по данным [6] показано на рис. 1.

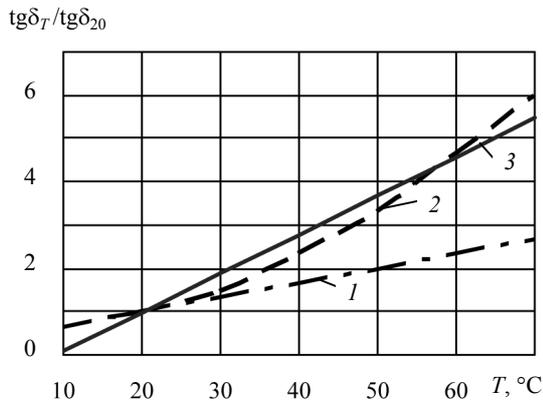


Рис. 1. Увеличение диэлектрических потерь при росте температуры: 1 – бумага пропитанная маслом; 2 – бумага пропитанная соволом; 3 – линейная аппроксимация

Если принять, что диэлектрические потери условно относятся к поверхности жилы, то температура жилы  $T_{ж}$  может быть определена из уравнения теплового баланса [2, 7]. Для упрощения вида уравнения теплового баланса используем линейную аппроксимацию зависимости (2), для изоляционных конструкций, показанных на рис. 1:

$$\text{tg}\delta_T \approx \text{tg}\delta_{20^\circ} [\beta_\delta + \alpha_\delta (T_{ж} - 20^\circ)], \quad (3)$$

где  $\alpha_\delta, \beta_\delta$  – коэффициенты ( $\beta_\delta = 0,981; \alpha_\delta = 0,09$ ).

Линейная аппроксимация (3) имеет остаточную дисперсию 0,223 и удовлетворяет критерию Фишера при 95-процентном уровне значимости.

Для трехжильного кабеля 6(10) кВ с секторными жилами и с поясной изоляцией уравнение теплового баланса [2, 7] с учетом (1) и (3) имеет вид

$$T_{ж} - T_0 = \Delta P_{н20^\circ} [1 + \alpha (T_{ж} - 20^\circ)] S_{ж\Sigma} + \Delta P_{из20^\circ} [\beta_\delta + \alpha_\delta (T_{ж} - 20^\circ)] S_{из\Sigma}. \quad (4)$$

Здесь

$$\Delta P_{н20^\circ} = 3I^2 R_{20^\circ}; \quad \Delta P_{из20^\circ} = Q_3 \text{tg}\delta_{20^\circ};$$

$$S_{ж\Sigma} = S_{из} + S_{п} + S_0; \quad S_{из\Sigma} = 0,5S_{из} + S_{п} + S_0,$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta P_{н20^\circ}$  – нагрузочные потери мощности при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;  $\Delta P_{из20^\circ}$  – потери в изоляции при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;  $S_{ж\Sigma}$  – суммарное термическое сопротивление по отношению к жиле

кабеля;  $S_{из\Sigma}$  – суммарное термическое сопротивление по отношению к изоляции кабеля;  $I$  – ток, протекающей по жиле кабеля, А;  $Q_3$  – зарядная мощность кабеля, вар/м;  $S_{из}, S_{п}, S_0$  – термические сопротивления изоляции, защитных покровов и окружающей среды,  $\frac{^\circ\text{C}\cdot\text{м}}{\text{Вт}}$ .

Термические сопротивления изоляции, защитного покрова и окружающей среды при прокладке одиночного кабеля в земляной траншее определяются следующим образом [2, 4]:

$$S_{из} = 1,1 \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{R_c + \Delta_\phi + \Delta_\pi}{R_c};$$

$$S_{п} = \frac{\sigma_{п}}{2\pi} \ln \frac{d_k}{d_{обол}};$$

$$S_0 = \frac{\sigma_{гр}}{2\pi} \ln \left( \frac{2H}{d_k} + \sqrt{\left( \frac{2H}{d_k} \right)^2 - 1} \right),$$

где  $\sigma_{из}, \sigma_{п}, \sigma_{гр}$  – удельные термические сопротивления изоляции, защитного покрова, грунта,  $\frac{^\circ\text{C}\cdot\text{м}}{\text{Вт}}$ ;  $R_c$  – радиус дуги сектора жилы, мм;  $\Delta_\phi, \Delta_\pi$  – толщина фазной и поясной изоляции, мм;  $d_k$  – внешний диаметр кабеля, мм;  $d_{обол}$  – диаметр кабеля под защитным покровом, мм;  $H$  – глубина прокладки кабеля, мм.

Формулы для расчета  $S_0$  при других способах прокладки приведены в [2, 4]. Значения термических сопротивлений для составления теплового баланса кабеля СБ 6(10) кВ показаны на рис. 2.

Уравнение (4) при допустимом превышении  $\Delta T_{доп}$  температуры жилы  $T_{ж доп}$  над заданной температурой окружающей среды  $T_{о норм}$  ( $\Delta T_{доп} = T_{ж доп} - T_{о норм}$ ) позволяет определить ток  $I_{доп}$ :

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{\Delta T_{доп} - \Delta P_{из20^\circ} (\beta_\delta + \alpha_\delta \Delta T_{20^\circ}) S_{из\Sigma}}{3R_{20^\circ} (1 + \alpha \Delta T_{20^\circ}) S_{ж\Sigma}}}, \quad (5)$$

где  $\Delta T_{20^\circ} = T_{ж доп} - 20^\circ$ .

Согласно правилам устройства электроустановок для кабелей 6 кВ с бумажной изоляцией с вязкой пропиткой и с нестекающей массой  $T_{ж доп} = 65^\circ\text{C}$ , для кабелей 10 кВ –  $60^\circ\text{C}$ . При улучшении качества изоляции кабелей, допустимая

температура нагрева кабелей 6 кВ с бумажной изоляцией с вязкой пропиткой повышается до 80 °С, 10 кВ – до 70 °С [2]. При расчете допусти-

мого тока  $T_{о\text{ норм}}$  принимается равной 15 °С [2]. Результаты расчета допустимой плотности тока  $j_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} / q$  приведены на рис. 3.

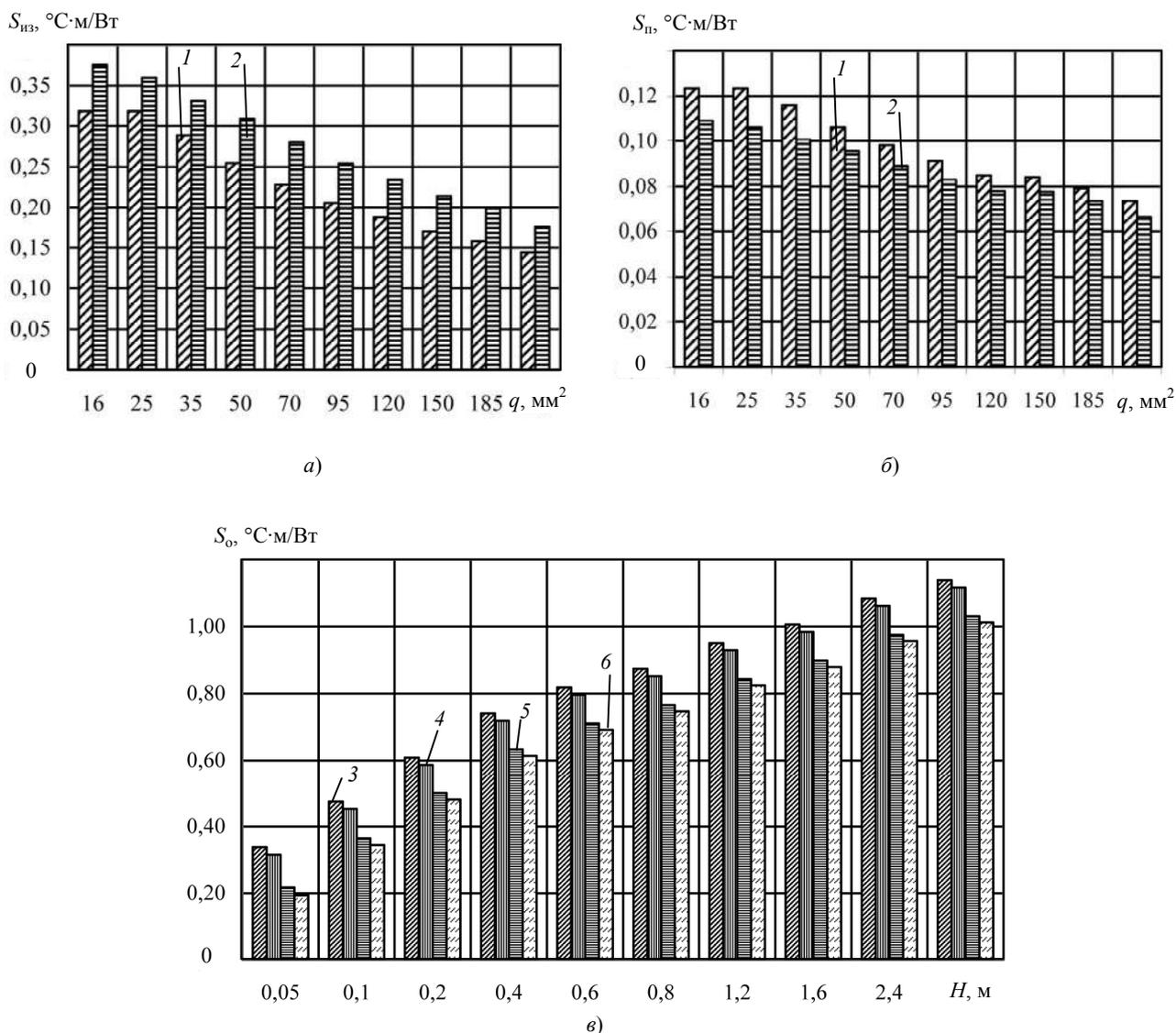


Рис. 2. Термическое сопротивление: а – кабельной изоляции с вязким составом при  $\sigma_{из} = 6 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ : 1 – 6 кВ; 2 – 10 кВ; б – джутового защитного покрова кабеля при  $\sigma_{п} = 6 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ : 1 – 6 кВ; 2 – 10 кВ; в – грунта при  $\sigma_{гр} = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$  для кабеля сечением  $q$ , напряжением  $U_n$ : 3 –  $q = 16 \text{ мм}^2$ ,  $U_n = 6 \text{ кВ}$ ; 4 –  $q = 16 \text{ мм}^2$ ,  $U_n = 10 \text{ кВ}$ ; 5 –  $q = 240 \text{ мм}^2$ ,  $U_n = 6 \text{ кВ}$ ; 6 –  $q = 240 \text{ мм}^2$ ,  $U_n = 10 \text{ кВ}$

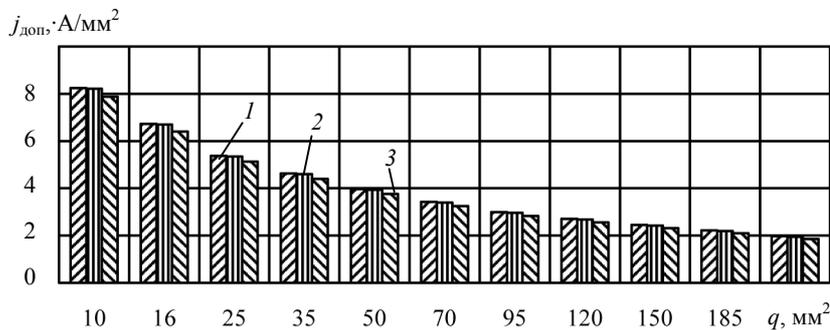


Рис. 3. Допустимая плотность тока кабеля СБ 6 кВ, проложенного в земле, при  $T_{ж\text{ доп}} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $T_{о\text{ норм}} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ : 1 – без учета диэлектрических потерь при  $H = 0,8 \text{ м}$ ; 2 – с учетом диэлектрических потерь при  $H = 0,8 \text{ м}$ ; 3 – без учета диэлектрических потерь при  $H = 1,6 \text{ м}$

Учет в (5) диэлектрических потерь приводит к снижению  $I_{\text{доп}}$  на 0,3 – 1,4 % по отношению к  $I_{\text{доп}}$ , вычисленному без их учета.

При заданной температуре окружающей среды  $T_0$  и некотором значении тока токоведущей жилы  $I$  уравнение (4) может быть использовано для определения  $T_{\text{ж}}$ :

$$T_{\text{ж}} = \frac{T_0 + \Delta P_{\text{н}20^\circ} S_{\text{ж}\Sigma} k_{\text{ж}} + \Delta P_{\text{из}20^\circ} S_{\text{из}\Sigma} k_{\text{из}}}{1 - \alpha \Delta P_{\text{н}20^\circ} S_{\text{ж}\Sigma} - \alpha_{\delta} \Delta P_{\text{из}20^\circ} S_{\text{из}\Sigma}}, \quad (6)$$

где  $k_{\text{ж}} = 1 - \alpha_{20^\circ}$ ;  $k_{\text{из}} = \beta_{\delta} - \alpha_{\delta} 20^\circ$ .

Если не учитывать увеличение нагрева, обусловленное диэлектрическими потерями, для кабелей 6(10) кВ [2], то выражения (5), (6) принимают следующий вид:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{\Delta T_{\text{доп}}}{3R_{20^\circ}(1 + \alpha \Delta T_{20^\circ})S_{\text{ж}\Sigma}}}; \quad (7)$$

$$T_{\text{ж}} = \frac{T_0 + \Delta P_{\text{н}20^\circ} S_{\text{ж}\Sigma} k_{\text{ж}}}{1 - \alpha \Delta P_{\text{н}20^\circ} S_{\text{ж}\Sigma}}. \quad (8)$$

Ток  $I$  в (8) представим в следующем виде:

$$I = I_* I_{\text{доп}}, \quad (9)$$

где  $I_*$  – ток кабеля в долях допустимого тока по нагреву.

Подставив (9) и (7) в (8) и учитывая, что  $\alpha = 0,004^\circ \text{C}^{-1}$ , получим

$$T_{\text{ж}} = \frac{T_0(0,92 + 0,004T_{\text{ж доп}}) + 0,92I_*^2 \Delta T_{\text{доп}}}{0,92 + 0,004T_{\text{ж доп}} - 0,004I_*^2 \Delta T_{\text{доп}}}. \quad (10)$$

Влияние нагрева токоведущих жил и изоляции на величину потерь мощности может быть оценено по величине относительных потерь мощности:

$$\Delta P_{\text{н}*} = \Delta P_{\text{н}T} / \Delta P_{\text{н}20^\circ} = 1 + \alpha(T_{\text{ж}} - 20^\circ). \quad (11)$$

Результаты расчета по (11) при определении температуры  $T_{\text{ж}}$  по (10) для кабелей 6 кВ для климатических условий г. Ростова-на-Дону [8] показаны на рис. 4.

При учете дополнительного нагрева кабеля диэлектрическими потерями нагрузочные потери увеличиваются на величину не более 1 %, а сами диэлектрические потери возрастают на 4 %. Для практических расчетов потерь мощности и энергии в кабельных линиях возможно определение температуры жил кабелей 6(10) кВ по (10).

На величину ежемесячных и годовых потерь электроэнергии в кабельных линиях влияют и нагрузка, и температура окружающей среды. На рис. 5 показаны изменения ежемесячного электропотребления коммунально-бытовых потребителей [2] и среднемесячной температуры [8].

$\Delta P_{\text{н}T} / \Delta P_{\text{н}20^\circ}, \%$

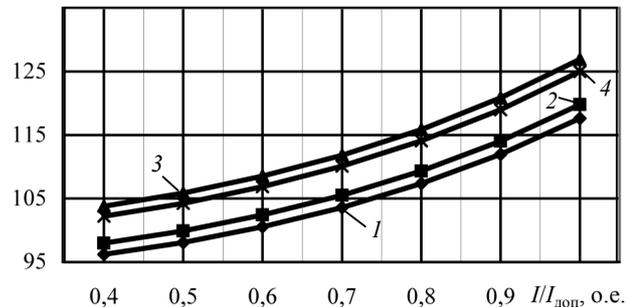


Рис. 4. Нагрузочные потери мощности в кабелях 6 кВ без учёта дополнительного нагрева диэлектрическими потерями: 1 –  $H = 0,8$  м, зима; 2 –  $H = 1,6$  м, зима; 3 –  $H = 0,8$  м, лето; 4 –  $H = 1,6$  м, лето

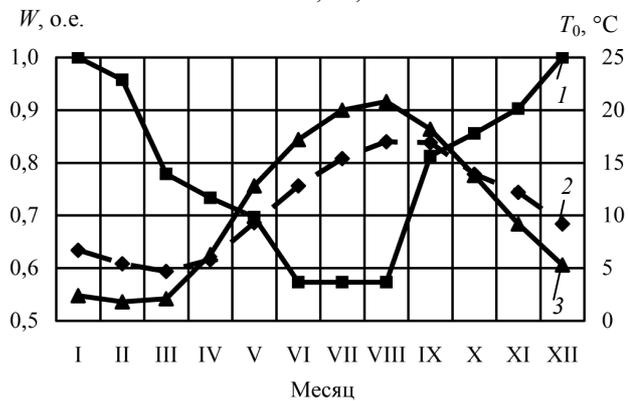


Рис. 5. Исходные данные для оценки влияния нагрева на потери электроэнергии: 1 – электропотребление; 2 – температура почвы на глубине 1,6 м; 3 – температура почвы на глубине 0,8 м

В качестве примера учета влияния температуры жил кабеля на нагрузочные потери электроэнергии выполнены расчеты для кабелей 6 кВ при различных видах нагрузки (коммунально-бытовой, производственной, смешанной, городского распределительного пункта (РП) 6 кВ [2, 9]) для климатических условий [8] при прокладке в траншее на глубине 0,8 и 1,6 м. Расчёт потерь электроэнергии выполнен методом расчётных суток с использованием типовых суточных графиков каждого месяца года. При выполнении расчетов потерь электроэнергии максимальная нагрузка принята равной допустимому току по нагреву ( $I_{\text{max}} = I_{\text{доп}}$ ). Граничные значения изменения ежемесячных нагрузочных потерь электроэнергии по отношению к потерям, вычисленным при  $20^\circ \text{C}$ , для некоторых видов нагрузок приведены в таблице и на рис. 6. Граничные значения изменения нагрузочных потерь, приведенные в таблице, приходится на различные месяцы для рассмотренных видов нагрузки. Как правило, минимальные значения – на март – апрель, максимальные – на август – сентябрь. Рассмотренные виды нагрузки имеют годовые графики различной плотности. С ростом плотности (коэффициента заполнения) графика нагрузки увеличивается влияние нагрева жил кабеля на величину нагрузочных потерь электроэнергии (рис. 7).

Таблица

Диапазон изменения нагрузочных ежемесячных потерь  
электроэнергии при учете нагрева кабелей 6 кВ, %

Вид нагрузки	Плотность (коэффициент заполнения) годового графика	$H = 1,6 \text{ м}$		$H = 0,8 \text{ м}$	
		min	max	min	max
Коммунально-бытовая	0,33	-0,42	5,41	-1,25	5,73
Производственная	0,47	-0,36	5,29	-0,20	5,01
Смешанная	0,52	0,13	5,49	0,34	5,44
Городской РП	0,59	2,74	11,22	1,60	11,81

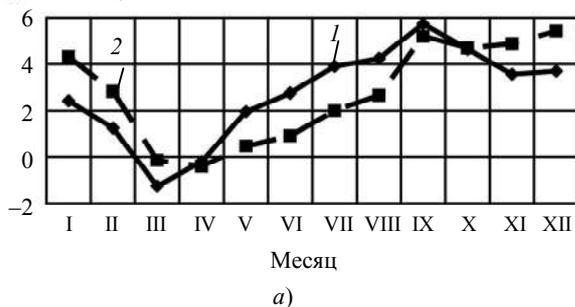
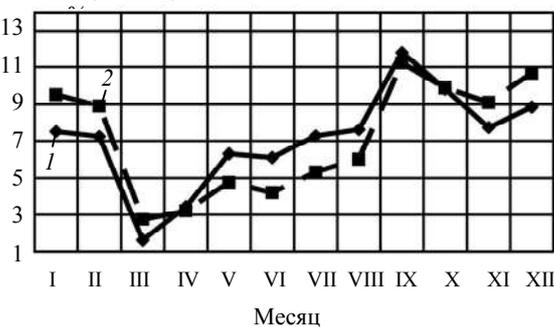
 $(\Delta W_T - \Delta W_{20}) / \Delta W_{20}, \%$ 

 $(\Delta W_T - \Delta W_{20}) / \Delta W_{20},$ 


Рис. 6. Увеличение (уменьшение) нагрузочных потерь электроэнергии в кабелях 6 кВ при учёте нагрева: а – питающих коммунально-бытовую нагрузку; б – питающих РП: 1 –  $H = 0,8 \text{ м}$ ; 2 –  $H = 1,6 \text{ м}$

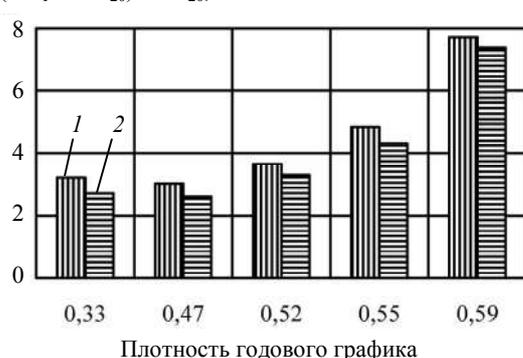
 $(\Delta W_T - \Delta W_{20}) / \Delta W_{20}, \%$ 


Рис. 7. Увеличение годовых нагрузочных потерь электроэнергии в кабелях 6 кВ при учёте нагрева и  $I_{\max} = I_{\text{доп}}$ : 1 –  $H = 1,6 \text{ м}$ ; 2 –  $H = 0,8 \text{ м}$

Увеличение годовых нагрузочных потерь, обусловленных учетом нагрева кабеля, в большей

степени зависит от плотности графика нагрузки, чем от температуры окружающей среды на различной глубине прокладки кабеля в траншее.

### ВЫВОДЫ

1. Выражение (10) может быть использовано для определения температуры жил кабелей 6(10) кВ при любом способе их прокладки.
2. Относительная погрешность неучета дополнительного нагрева, обусловленного диэлектрическими потерями в изоляции кабелей 6(10) кВ, при расчете потерь мощности не превышает 1 % по отношению к потерям, вычисленным с их учетом.
3. При увеличении плотности графиков нагрузки возрастает влияние нагрева кабеля на годовые потери электроэнергии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по проектированию электроснабжения городов / В.А. Козлов, Н.И. Билик, Д.Л. Файбисович. 2-е изд. Л.: 1986. 256 с.
2. Электротехнический справочник: в 4 т. Производство, передача и распределение электрической энергии/ под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. -8-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2001. Т. 3. 964 с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей/ под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. 320 с.
4. Электротехнический справочник / под общ. ред. П.Г. Грудинского и др. 5-е изд. -М.: Энергия, 1974. Т. 1. 776 с.
5. Локшин М.В., Сви П.М. Измерение диэлектрических потерь высоковольтной изоляции. М.-Л: Энергия, 1966. 144 с.
6. Корицкий Ю.В. Основы физики диэлектриков: учеб. для электромеханических техникумов. М.: Энергия, 1979. 248 с.
7. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кадомская К.П. и др. Техника высоких напряжений/ под ред. М. В. Костенко. М.: Высш. шк., 1973. 528 с.
8. Климат Ростова-на-Дону/ под ред. Ц.А. Швер и Т.Е. Иванченко. Л.: Гидрометиздат, 1987. 222 с.
9. Электротехнический справочник: в 3-т. Т.3. Кн. 1. Производство, передача и распределение электрической энергии/ под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. -6-е изд. М.: Энергоиздат, 1982. 656 с.

Поступила в редакцию

19 марта 2008 г.

Хлебников Владимир Константинович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института). Тел. (863-52) 55-6-11