

МЕТОДИКА ВЫБОРА СЕЧЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГИБКИХ КАБЕЛЕЙ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры ЭИКТ)

Сечение токопроводящих жил кабелей выбирают, исходя из тока нагрузки и допустимой плотности тока [1]. Данный принцип выбора сечения токопроводящих жил основан на зависимости срока службы изоляции от температуры. Обычно для оценки срока службы изоляции при разных температурах используется уравнение Аррениуса [2], которое показывает, что с повышением температуры срок жизни изоляции уменьшается по экспоненте. Из этого правила следует, что понижение температуры изоляции кабеля повышает его долговечность. Такая закономерность прослеживается очень хорошо для кабелей стационарной прокладки.

В кабелях, применяемых для питания подвижных потребителей, например, экскаваторов, существенное значение приобретают внутренние механические напряжения в изоляции. При изгибе кабеля в изоляции появляются механические напряжения, величина которых тем больше, чем ниже температура. При повышении механических напряжений долговечность изоляции снижается.

Таким образом, повышение температуры, с одной стороны, вызывает ускоренный отказ изоляции, если отсутствует ее деформация, а с другой стороны, уменьшая механические напряжения, увеличивает ее долговечность.

Ниже описывается методика выбора сечения токопроводящих жил высоковольтных гибких кабелей типа КШВГМ. По таблицам допустимых токов выбирают сечение токопроводящих жил кабеля при условии: номинальный ток установки равен номинальному току кабеля. Одновременно выбирают два ближайших меньших стандартных сечения токопроводящих жил. Например, если по условию номинальный ток установки равен номинальному току кабеля, принято сечение 50 мм^2 , то дополнительно по таблицам выбирают два меньших сечения — 35 и 25 мм^2 .

По метеорологическим данным строят годовой график температур окружающей среды за год. На этом же графике наносят кривую токовой нагрузки установки за год, пользуясь методами, изложенными в [1, 3]. При каждом токе и температуре окружающей среды определяют температуру изоляции [4]:

$$T_{\text{и}} = T_0 + I^2 n R_{\text{ж}} S_{\text{т}}, \quad (1)$$

где

T_o — температура окружающей среды;
 I — ток нагрузки;
 n — число токопроводящих жил;
 $R_{ж}$ — сопротивление 1 см длины токопроводящей жилы;
 $S_{т}$ — тепловое сопротивление элементов кабеля от жилы к окружающему воздуху, *тепл. ом см.*
 Тепловое сопротивление подсчитывают

$$S_{т} = \frac{0,159 S_{тр} G_1}{n} + \frac{3,2}{D_k B}. \quad (2)$$

В этом выражении

G_1 — геометрический фактор;
 $S_{тр}$ — удельное тепловое сопротивление резины и оплетки, берется равным 650 *тепл. ом мм*;
 D_k — диаметр кабеля, *мм*;
 B — коэффициент теплоотдачи от кабеля в воздух, принимается при D_k больше 44,5 *мм* $\frac{1}{1200}$ *тепл. ом см²* и при D_k меньше 44,5 *мм*, подсчитывается по формуле

$$\frac{1}{12,6 D_k + 650} \cdot \frac{1}{\text{тепл. ом мм}^2}.$$

Геометрический фактор выбирается по рис. 1.

Проведенные расчеты позволяют построить годовой график температур изоляции по продолжительности для трех выбранных сечений кабеля. На основе графика температур по продолжительности подсчитывают эквивалентную температуру [4]:

$$T_{э} = \frac{D}{2 k \ln \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\tau_i}{\tau} \exp\left(-\frac{D}{2 k T_i}\right)}. \quad (3)$$

Наши эксперименты показали, что в изогнутом кабеле механическое напряжение в изоляции зависит от температуры по закону

$$\gamma \sigma = \gamma_0 \sigma_0 e^{-b_1 T}. \quad (4)$$

Эквивалентную величину $\gamma \sigma$ найдем [4]:

$$(\gamma \sigma)_{э} \ln \frac{2 D e}{(\gamma \sigma)_{э}} = D + 2 k T_{э} \ln \sum_{i=1}^{i=n} q \frac{\tau_i}{\tau} \exp\left[-\frac{D - (\gamma \sigma)_i \ln \frac{2 D e}{(\gamma \sigma)_i}}{2 k T_i}\right]. \quad (5)$$

Эквивалентную напряженность поля определяют из выражения

$$Ae^{-b T_{э}} \beta f E_{э} \ln \frac{2 D e}{Ae^{-b T_{э}} \beta f E_{э}} = D + 2 k T_{э} \ln \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\tau_i}{\tau} e^{-\frac{D}{2 k T_i}} \sum_{j=1}^{j=m} \frac{\tau_j}{\tau_i} \exp\left[\frac{Ae^{-b T_i} \beta f E_i \ln \frac{2 D e}{Ae^{-b T_i} \beta f E_j}}{2 k T_i}\right]. \quad (6)$$

Для расчета эквивалентной напряженности поля необходимо найти напряженность поля при перенапряжениях, которая вычисляется по известной формуле:

$$E_j = \frac{U_j}{R-r}. \quad (7)$$

Интегральную кривую распределения вероятностей амплитуд перенапряжений разбивают на интервалы. U_j соответствует среднему значению

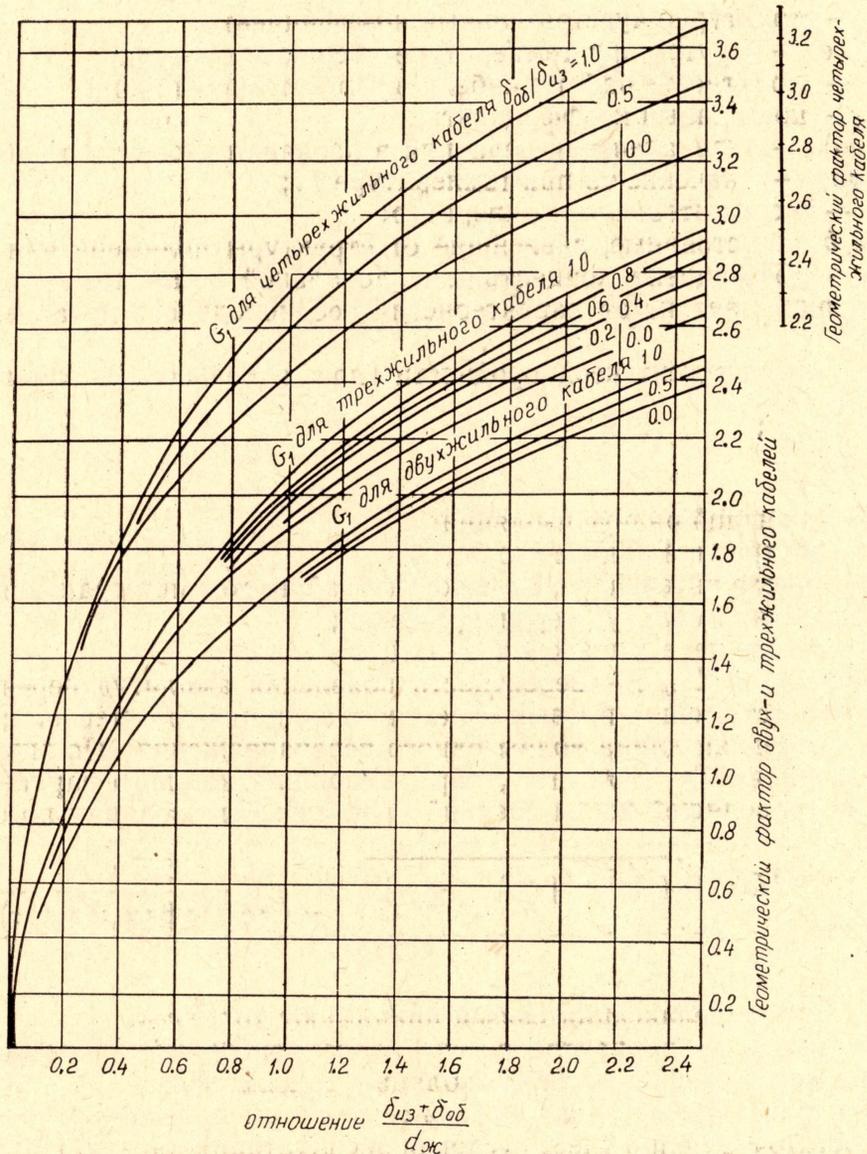


Рис. 1. Геометрический фактор G_1 для кабелей: $\delta_{из}$ — толщина изоляции, $\delta_{об}$ — толщина оболочки, $d_{ж}$ диаметр токопроводящей жилы

j -го интервала. U_1 равно рабочему напряжению. Время действия напряжения U_j находим

$$\tau_j = \tau_n \frac{N}{\tau} \tau_l [\Phi(U_{jп}) - \Phi(U_{jл})]. \quad (8)$$

В этих выражениях обозначено:

T_3 — эквивалентная температура изоляции;
 k — постоянная Больцмана;
 D — энергия диссоциации связи С—С в каучуке;
 T_i — температура i -го интервала графика температур по продолжительности;
 τ_i — время действия T_i ;
 τ — период изменения температур изоляции принимается $3,16 \cdot 10^7$ сек;
 σ — внутреннее механическое напряжение в изоляции изогнутого кабеля;
 γ — структурно-чувствительный коэффициент;
 γ_0, σ_0 — берутся при температуре абсолютного нуля;
 q — вероятность работы кабеля в изогнутом состоянии;
 b_1 — постоянный коэффициент;
 $(\gamma\sigma)_3$ — эквивалентная величина в изоляции изогнутого кабеля;
 $(\gamma\sigma)_i$ — значение $\gamma\sigma$ при температуре T_i ;
 n — число интервалов температур;
 A, b — постоянные, зависящие от структуры полимера или резины;
 β — коэффициент концентрации локальной напряженности поля в диэлектрике зависит от характеристик неоднородности и размеров изоляции;
 f — коэффициент неоднородности для кабельной изоляции равен
$$\frac{R-r}{r \ln \frac{R}{r}};$$

 R — внешний радиус изоляции;
 r — внутренний радиус изоляции;
 m — число интервалов, на которые разбивается интегральная кривая распределения амплитуд перенапряжений;
 N — число перенапряжений за год;
 $\Phi(U_{jп}), \Phi(U_{jл})$ — вероятности появления амплитуд перенапряжений, соответствующие правым и левым границам j -го интервала;
 τ_n — средняя длина волны одного перенапряжения. По эквивалентным значениям $T_3, (\gamma\sigma)_3$ и E_3 определяют для каждого варианта сечения токопроводящей жилы средний срок службы изоляции по формуле

$$\tau = \frac{1}{\tau_0} \exp \left\{ \frac{D - \sqrt{(Ae^{-bT_3} \beta f E_3)^2 + (\gamma\sigma)_3^2} \ln \frac{2De}{\sqrt{(Ae^{-bT_3} \beta f E_3)^2 + (\gamma\sigma)_3^2}}}{2kT_3} \right\}, \quad (9)$$

где τ_0 — время релаксации связей принимают 10^{-13} сек.

Из заданных вариантов сечения токопроводящей жилы выбирают тот, при котором срок службы изоляции максимален.

Предлагаемая методика выбора сечения токопроводящих жил позволяет достаточно полно учесть условия эксплуатации кабеля. Правильный выбор сечения токопроводящих жил позволит существенно повысить срок службы кабеля (см. приложение).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример выбора сечения токопроводящей жилы кабеля КШВГМ—
6 кв

Исходные данные: 1) номинальный ток экскаватора 102 а, 2) изменение тока за рабочий цикл показано на рис. 2, 3) экскаватор работает

по трехсменному графику в течение года, 4) годовой график температур показан на рис. 3, 5) вероятность появления амплитуд перенапряжений подчиняется нормальному закону с параметрами: математическое ожи-

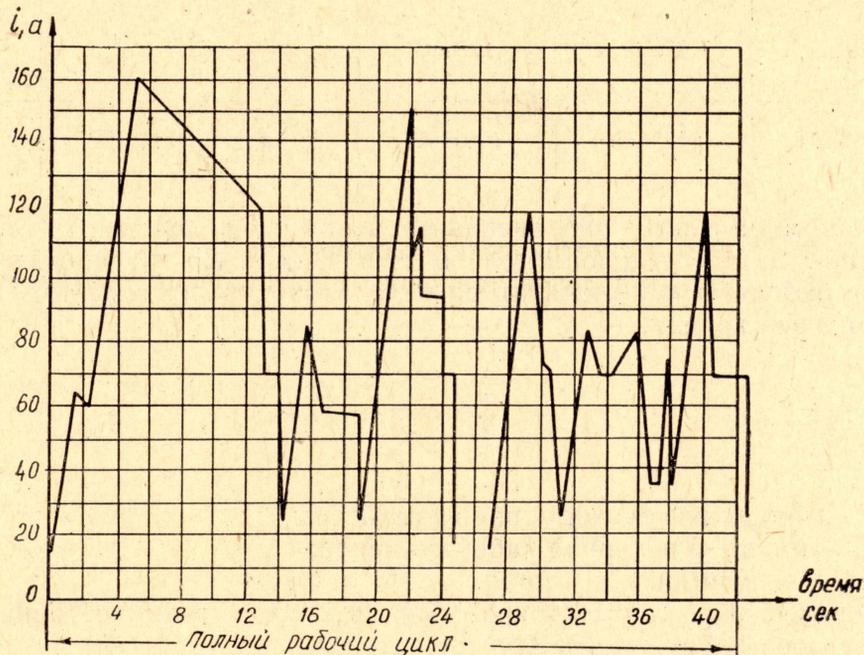


Рис. 2. График тока нагрузки экскаватора за рабочий цикл

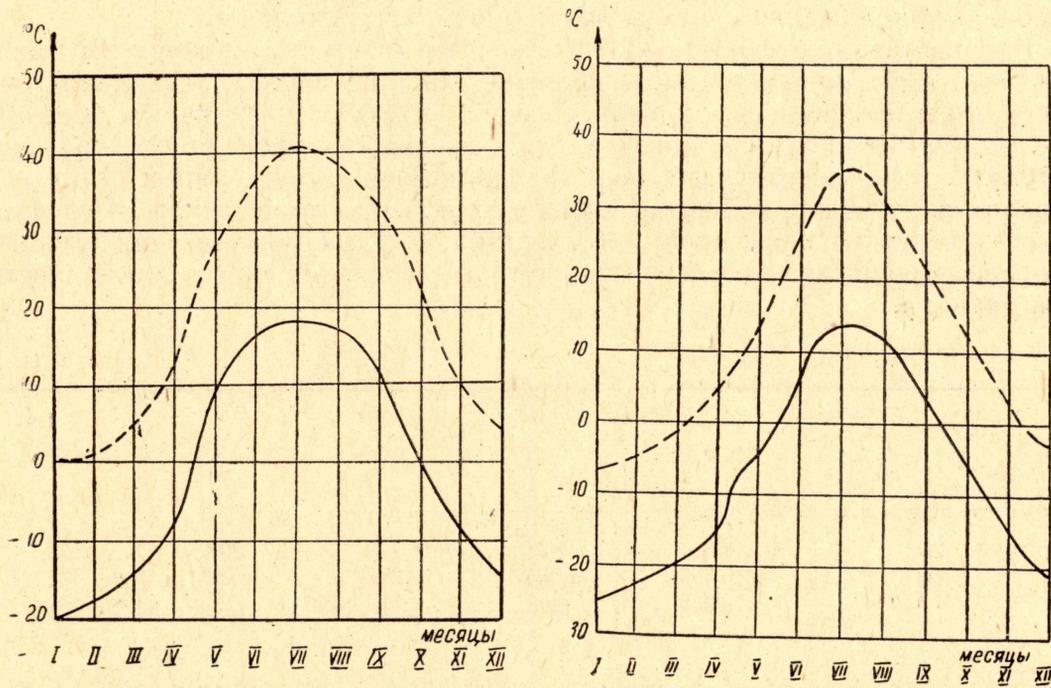


Рис. 3. Годовой график температур: _____ окружающей среды; _____ изоляции кабеля при сечении токопроводящей жилы 25 мм²

дание $U=4,25 U_{\phi}$ и среднеквадратичное отклонение $s=1,08 U_{\phi}$, б) число перенапряжений в год $N=2000$, 7) средняя длина волны перенапряжений равна 0,004 сек, 8) кабель постоянно работает в изогнутом состоянии ($q=1$), 9) характеристики изоляции, определенные по экспериментам, приводятся в табл. П-1.

Таблица П-1

D $\frac{\partial ж}{св}$	A $\frac{\partial ж \cdot в}{св}$	$в$ $\frac{1}{\text{°К}}$	$\gamma_0 \sigma_0$ $\frac{\partial ж}{св}$	b_1 $\frac{1}{\text{°К}}$	β
$5,51 \cdot 10^{-19}$	$0,4 \cdot 10^{-26}$	0,00351	$5,28 \cdot 10^{-18}$	0,0172	3,5

По номинальному току экскаватора выбираем сечение токопроводящей жилы 25 мм^2 и дополнительно 16 и 10 мм^2 . По графику изменения тока за рабочий цикл экскаватора находим эквивалентный ток, вызывающий нагрев кабеля,

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{\tau_p} \sum I_k^2 \Delta \tau_k}, \quad \text{П-1}$$

где

τ_p — продолжительность рабочего цикла;

I_k — ток в k -й интервал рабочего цикла;

$\Delta \tau_k$ — время его действия.

Формула (П-1) достаточно точна в случае, если постоянная времени нагрева кабеля много больше τ_p .

По графику рис. 1 и формуле (П-1) получено $T_{\text{э}} = 0,57 T_{\text{ом}}$. Так как работа экскаватора происходит непрерывно в течение всего года; то можно приближенно считать, что $T_{\text{э}}$ является постоянным.

Подставляя в формулу (1) $I_{\text{э}}$, подсчитываем температуру изоляции кабеля в различные моменты времени. На рис. 3 нанесена кривая температуры изоляции для кабеля сечением 25 мм^2 . Аналогичным образом вычисляем температуру изоляции для сечений токопроводящих жил 16 и 10 мм^2 . Для расчета разбиваем график температур изоляции на интервалы так, чтобы в каждом интервале отклонение температуры от среднего значения не превышало $\pm 5^\circ$. В табл. П-2 даются значения средних температур интервалов с указанием относительной продолжительности интервала.

Таблица П-2

τ_i / τ	0,1667	0,25	0,1667	1,1667	0,25
Сечение жилы, мм^2					
25	268	274	285	298	305
16	278	284	295	308	315
10	296	302	313	326	333

Пользуясь значениями температур табл. П-2, характеристиками изоляции табл. П-1 и формулами [3, 4, 5], находим эквивалентные величины $T_{\text{э}}$ и $(\gamma \sigma)_{\text{э}}$, которые приведены в табл. П-4.

Интегральную функцию распределения вероятностей разобьем на равные интервалы, ширину которых примем равной 2 кв . По формуле (7) для средней величины U_j подсчитываем E_j , учитывая, что $R-r=4 \text{ мм}$ для всех кабелей. По формуле (8) находим отношение $\frac{\tau_j}{\tau_i}$, которое остается неизменным для любой температуры. Значения вероятностей

Таблица П-3

$\frac{\tau_j}{\tau_i}$	1	$9,75 \cdot 10^{-10}$	$2,47 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$1,15 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$3,04 \cdot 10^{-8}$
$E_j 10^6 \frac{\delta}{M}$	1,225	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$\frac{\tau_j}{\tau_i}$	$3,98 \cdot 10^{-8}$	$4,52 \cdot 10^{-8}$	$4,43 \cdot 10^{-8}$	$3,84 \cdot 10^{-8}$	$2,76 \cdot 10^{-8}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$	$1,03 \cdot 10^{-8}$
$E_j \cdot 10^6 \frac{\delta}{M}$	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
$\frac{\tau_j}{\tau_i}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$	$2,18 \cdot 10^{-9}$	$6,96 \cdot 10^{-10}$	$2,74 \cdot 10^{-10}$			
$E_j 10^6 \frac{\delta}{M}$	8	8,5	9	9,5			

берутся из таблиц интеграла Лапласа [5]. В табл. П-3 даются $\frac{\tau_j}{\tau_i}$ и E_j . Данные табл. П-2 и П-3 позволяют рассчитать E_Σ по (6) для разных сечений токопроводящих жил кабеля. В табл. П-4 даются значения E

Таблица П-4

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	T_Σ °К	$(\gamma\sigma)_\Sigma$ $\frac{дж}{св}$	E_Σ $\frac{в}{м}$	Срок службы изоляции в годах	
				изогнутый кабель	прямой кабель
25	300	$3,49 \cdot 10^{-20}$	$2,30 \cdot 10^6$	0,4	8900
16	309	$2,92 \cdot 10^{-20}$	$2,00 \cdot 10^6$	1	4000
10	326	$2,05 \cdot 10^{-20}$	$1,60 \cdot 10^6$	4	1000

Выбираем наивыгоднейший вариант, дающий наибольшую долговечность, то есть сечение токопроводящей жилы должно равняться 10 мм².

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Н. Баптиданов, В. И. Тарасов. Электрооборудование электрических станций и подстанций. Т. I, Госэнергоиздат, 1960.
2. П. М. Глупушкин, А. Е. Саакян, Д. П. Щербаков. Кабельные резины. «Энергия», 1966.
3. В. С. Лившиц. Основы теории суммирования электрических нагрузок разнородных промышленных электроприемников. Известия вузов, «Электромеханика», № 8, 1970, стр. 900—904.
4. В. С. Дмитриевский. Расчет изоляции высоковольтных кабелей. «Кабельная техника», в печати.
5. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. «Наука», 1964.