

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ИСЛАМА КАРИМОВА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЕЙ**

Ташкент 2020

УДК 62-83.001.63(076)

Сост.: Иванова В.П. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Технология производства кабелей». – Ташкент: ТашГТУ, 2020. – 57 с.

Данные методические указания предназначены для выполнения курсового проекта студентами магистратуры специальности 5А310702 «Электроизоляционная и кабельная техника». Методические указания составлены согласно учебно-рабочему плану дисциплины «Технология производства кабельных изделий».

В методических указаниях определены задачи курсового проектирования, обозначены объемы и содержание пояснительной записки и графической части проектов (работ), даны рекомендации для разработки всех составляющих данной расчетной работы, приведен список рекомендуемых при проектировании источников.

Рецензенты: Суллиев А.Х., к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного транспортного университета;

Умаров Ш., к.т.н. доц. кафедры «Электромеханика и электротехнологии» Энергетического факультета Ташкентского государственного технического Университета имени Ислама Каримова;

©Ташкентский государственный технический университет, 2020

1. Введение

Кабельные изделия предназначены для передачи электрической энергии или информации на расстояние, т.е. для создания самых разнообразных электрических, электронных, радиотехнических и волоконно-оптических схем и цепей. Ни одно современное техническое устройство, работа которого связана с использованием электрических и электронных схем, не может работать без кабелей и проводов, которые образуют системы электроснабжения, информатики и управления работой этого устройства.

Технический прогресс в различных отраслях народного хозяйства вызвал рост потребности в кабельной продукции и необходимость создания новых типов кабелей и проводов с более высокими характеристиками.

Современная кабельная техника характеризуется применением высоких напряжений и высоких частот, увеличением передаваемых мощностей, созданием кабелей и проводов для работы в условиях высоких и низких температур, высокой влажности окружающей среды, воздействия радиации и химически активных веществ, наличия вибрации и т.п. Повышенные требования к свойствам кабелей и проводов ограничивают возможность их удовлетворения с использованием существующих электроизоляционных материалов и вызывают необходимость создания новых, более совершенных материалов. Без применения специальных материалов невозможно создание новых типов кабелей и проводов для различных отраслей народного хозяйства. Вообще, потребность в изолированных кабелях и проводах возникла, как только появились генераторы электрической энергии, и стала необходимой передача ее на большие расстояния .

1.1. Общие сведения о силовом высоковольтном кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (обозначение в странах СНГ-СПЭ, в Великобритании-XLPE, в Германии-VPE, в Швеции-PEX) в полной мере отвечают все более жестким требованиям по качественному и надежному обеспечению потребителя достаточной электрической мощностью.

Благодаря своей конструкции, современной технологии изготовления и совершенным материалам кабели среднего и высокого напряжения с СПЭ-изоляцией обладают наилучшими электрическими и механическими свойствами и самым длительным сроком службы среди других типов кабеля, выпускаемых серийно. Благодаря радиальной конструкции достигается равномерное распределение электрического поля внутри изоляции, что вкупе с диэлектрическими характеристиками СПЭ существенно увеличивает электрическую прочность изоляции. Именно за счет электрической прочности изоляции, радиальной конструкции и технологии изготовления (пероксидной сшивки) кабелей удается достичь рекордно низких показателей по количеству пробоев во время эксплуатации.

Основными преимуществами кабеля с СПЭ-изоляцией являются:

- большая пропускная способность за счет увеличения допустимой температуры жилы (допустимые токи нагрузки в зависимости от условий прокладки на 15–30% больше, чем у кабеля с бумажной изоляцией);

- высокий ток термической устойчивости при коротком замыкании, что особенно важно, когда сечение кабеля выбрано только на основании номинального тока короткого замыкания;

- низкий вес, меньший диаметр и радиус изгиба, что обеспечивает легкость прокладки кабеля как в кабельных сооружениях, так и в земле на сложных трассах;

– возможность вести прокладку кабеля при температуре до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ для кабеля 110 кВ без предварительного подогрева, благодаря использованию полимерных материалов для изоляции и оболочки;

– низкая удельная повреждаемость (практика применения кабеля с СПЭ-изоляцией показывает, что она как минимум на 1–2 порядка ниже, чем у кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией);

– отсутствие жидких компонентов (масла под давлением для кабеля 110 кВ) и, следовательно, дорогостоящего подпитывающего оборудования, что ведет к значительному уменьшению эксплуатационных расходов, упрощению монтажного оборудования, сокращению времени и стоимости работ по прокладке и монтажу и обеспечению сохранности окружающей среды;

– возможность быстрого ремонта в случае пробоя, учитывая, что основным видом повреждения на одножильном кабеле является однофазное замыкание;

– однофазная конструкция, позволяющая изготавливать кабель с жилой сечением до 1000 мм, оптимальным для передачи большой мощности;

– большие строительные длины до 1500 м для кабеля 110 кВ;

– твердая изоляция дает огромные преимущества при прокладке на местности с большими наклонами, возвышенностями и на пересеченной местности, то есть на трассах с большой разницей уровней, в вертикальных и наклонных коллекторах.

В таблице 1 приведены сравнительные данные изоляционных материалов.

Таблица 1 Сравнительные данные изоляционных материалов

Параметр/материал	СПЭ	ПВХ	БПИ
Относительная диэлектрическая проницаемость	2,3	5	3,5
$tg\delta$, при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0004	0,07	0,003

Удельное объемное сопротивление, при 20 °С, Ом*см	10 ¹⁶	10 ¹²	10 ¹³
Длительно допустимая рабочая температура, °С	90	70	70–80
Максимальная температура п.т.ж. при коротком замыкании, °С	250	160	150
Сопротивление к деформации, при 150 °С	Хорошее	Плохое	Хорошее

Условные обозначения в маркировке

А – алюминиевая жила (без обозначения – медная жила) сечение = 50...800мм²

Пв – изоляция из сшитого полиэтилена

П – оболочка из полиэтилена

Пу – оболочка из полиэтилена увеличенной толщины

В-оболочка из ПВХ-пластиката;

Внг – оболочка из ПВХ-пластиката пониженной горючести.

г – герметизация металлического экрана водоблокирующими лентами

2г – двойная герметизация водоблокирующими лентами и алюмополимерной лент

На рисунки 1 приведен пример кабеля



Рис. 1. Кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена АПвПг

Условные буквенно-цифровые обозначения (маркировка) кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена:

- А — алюминиевая токоведущая жила (с сечением 50÷800мм²), если нет обозначения — медная токоведущая жила,
- Пв — материал изоляции — сшитый (вулканизированный) полиэтилен,

- П или В — оболочка из полиэтилена или ПВХ-пластиката,
- у — усиленная полиэтиленовая оболочка увеличенной толщины,
- нг — оболочка из ПВХ-пластиката пониженной горючести,
- нгд — оболочка из ПВХ-пластиката пониженного дымогазовыделения,
- г — продольная герметизация металлического экрана водоблокирующими лентами,
- 2г — двойная герметизация водоблокирующими лентами и алюмополимерной лент
- 1 или 3 — количество токоведущих жил,
- 50—800 — сечение токоведущей жилы, мм²,
- гж — герметизация токоведущей жилы, 2 16—35 — сечение экрана, мм,
- 1—500 — номинальное напряжение, кВ.

Пример обозначения: АПвПг 1х240/35—10 — кабель с алюминиевой жилой (А), СПЭ-изоляцией (Пв), полиэтиленовой оболочкой (П), герметизацией экрана (г), одножильный (1), сечение жилы 240 мм, сечение экрана 35 мм, номинальное напряжение 10 кВ.



Рис. 2. Пример конструкции силового кабеля

2. Обоснование выбора конструкции силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена

В качестве примера для расчета выбран силовой кабель на напряжение 110 кВ, с ТПЖ круглой формы сечением 500 мм² марки ПвПГ 1х500/120-110

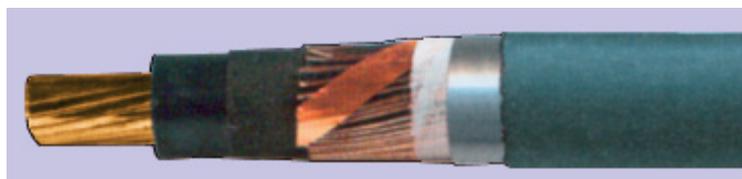


Рис. 3. Внешний вид силового кабеля ПвПГ 1х500/120-110

Конструкция

1. Круглая многопроволочная уплотнённая медная жила, МЭК (IEC) 60228 класс 2.

2. Экран по жиле из экструдированный полупроводящий сшитый полиэтилен толщиной 0,8 мм.

3. Изоляция экструдированный пероксидно сшитый полиэтилен 18 мм.

4. Экструдированный полупроводящий сшитый полиэтилен толщиной 0,8 мм. Экран по жиле, изоляция и экран по изоляции экструдируются одновременно за одну технологическую операцию.

5. Слой из электропроводящей водоблокирующей ленты толщиной 0,3 мм.

6. Повив из медных проволок 1,4 мм. Поверх медных проволок спирально наложена медная лента толщиной 0,1 мм.

7. Разделительный слой из водоблокирующей ленты толщиной 0,35 мм.

8. Оболочка из полиэтилена высокой плотности толщиной 4 мм.

Хотя медь имеет большую плотность, по сравнению с алюминием, она обладает меньшим удельным сопротивлением. Поэтому в качестве материала ТПЖ выбрана медь.

Полупроводящий экран жилы, предназначенный для выравнивания скачка напряженности электрического поля на границе токопроводящей жилы и слоя изоляции с помощью создания промежуточного полупроводящего слоя между токопроводящей жилой и изоляцией из сшитого полиэтилена. Также он сглаживает поверхность ТПЖ.

Полупроводящий экран изоляции. Он позволяет получить плавное изменение напряженности электрического поля между изоляцией, где напряженность электрического поля не равна нулю, и проводником (металлический экран кабеля), где напряженность электрического поля равна нулю.

Металлический экран. Основным назначением, которого является устранение электрического поля на поверхности кабеля. Экран формирует второй электрод конденсатора, образуемого кабелем (первым является токопроводящая жила кабеля). Сечение экрана выбрана исходя из наиболее оптимального соотношения сечения жилы и экрана.

Слои из водонабухающих лент предотвращают проникновение влаги в кабель.

Внешняя оболочка должна защищать кабель от механических воздействий, возникающих при его установке и эксплуатации, а также от специфических вредных воздействий (таких как, например, термиты, углеводороды и т.п.). Наиболее подходящим материалом для защитной оболочки является полиэтилен. Оболочки из ПВХ еще используются в настоящее время, но применение этого материала сокращается. Одним из основных преимуществ ПВХ является его высокая огнестойкость, но из-за того, что при горении ПВХ выделяются токсичные и коррозионные дымы, этот материал запрещен многими пользователями.

3. Общая методика расчета конструктивных элементов силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена

3.1 Токопроводящая жила

1. Сечение токопроводящей жилы $S_0=500 \text{ мм}^2$ (сечение по металлу).

2.Класс гибкости 2. Число повивов $n=5$. Больше число повивов соответствует большему классу гибкости.

3.Выбираем систему скрутки: нормальная (все проволоки одного диаметра) правильная (повивная) скрутка с одной проволокой в центре: 1+6+12+18+24. Для такой системы скрутки число проволок в жиле равно:

$$N = 3n(n - 1) + 1; N = 3 \cdot 5(5 - 1) + 1 = 61$$

4.Определяем сечение одной проволоки:

$$s_{\text{пр}} = S_0 / N \quad s_{\text{пр}} = 500 / 61 = 8,197 \text{ мм}^2$$

5.Вычисляем диаметр проволоки:

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4s_{\text{пр}}}{\pi}}, \quad d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8,197}{3,14}} = 3,231 \text{ мм}$$

6.Вычисляем диаметр скрученной жилы:

$$D_{\text{ж}} = (2n - 1)d_{\text{пр}}; \quad D_{\text{ж}} = (2 \cdot 5 - 1) \cdot 3,231 = 29,079 \text{ мм}$$

7.Определим коэффициент заполнения:

$$f = \frac{[3n(n - 1) + 1]}{[(2n - 1)]^2} \quad f = \frac{[3 \cdot 5(5 - 1) + 1]}{[(2 \cdot 5 - 1)]^2} = 0,753$$

8.Сделаем проверку коэффициента заполнения:

$$f = N \frac{d_{\text{пр}}^2}{D_{\text{ж}}^2} \quad f = 61 \frac{3,231^2}{29,079^2} = 0,753$$

9. Задаемся кратностью шага скрутки по каждому повиву (центральная проволока считается за повив), например, $m_2=16$, $m_3=15$, $m_4=14$, $m_5=13$.

10. Вычисляем диаметр по каждому повиву:

$$D = (2n - 1)d_{\text{пр}},$$

$$D_1 = (2 \cdot 1 - 1) \cdot 3,231 = 3,231 \text{ мм}$$

$$D_2 = (2 \cdot 2 - 1) \cdot 3,231 = 9,693 \text{ мм}$$

$$D_3 = (2 \cdot 3 - 1) \cdot 3,231 = 16,155 \text{ мм}$$

$$D_4 = (2 \cdot 4 - 1) \cdot 3,231 = 22,617 \text{ мм}$$

$$D_5 = (2 \cdot 5 - 1) \cdot 3,231 = 29,079 \text{ мм}$$

11. Вычисляем средний диаметр по каждому повиву:

$$D_{\text{ср}} = D - d_{\text{пр}}$$

$$D_{\text{ср}2} = D_2 - d_{\text{пр}} = 9,693 - 3,231 = 6,462 \text{ мм}$$

$$D_{\text{ср}3} = D_3 - d_{\text{пр}} = 16,155 - 3,231 = 12,924 \text{ мм}$$

$$D_{\text{ср}4} = D_4 - d_{\text{пр}} = 22,617 - 3,231 = 19,386 \text{ мм}$$

$$D_{\text{ср}5} = D_5 - d_{\text{пр}} = 29,079 - 3,231 = 25,848 \text{ мм}$$

12. Вычисляем шаги скрутки каждого повива:

$$h = m_T \cdot D_{\text{ср}}$$

$$h_2 = 16 \cdot 6,462 = 103,392 \text{ мм}$$

$$h_3 = 15 \cdot 12,924 = 193,86 \text{ мм}$$

$$h_4 = 14 \cdot 19,386 = 271,404 \text{ мм}$$

$$h_5 = 13 \cdot 25,848 = 336,024 \text{ мм}$$

13. Вычисляем коэффициент укрутки каждого повива:

$$k_y = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m_T^2}} \quad k_{y2} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{16^2}} = 1,019$$

$$k_{y3} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{15^2}} = 1,022 \quad k_{y4} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{14^2}} = 1,025$$

$$k_{y4} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{13^2}} = 1,028$$

14. Вычисляем общий коэффициент укрутки:

$$k_y = \frac{n_1 \cdot k_1 + n_2 \cdot k_2 + n_3 \cdot k_3 + n_4 \cdot k_4 + n_5 \cdot k_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5}$$

$$k_y = \frac{1+6 \cdot 1,019+12 \cdot 1,022+18 \cdot 1,025+24 \cdot 1,028}{1+6+12+18+24} = 1,025$$

15. Сделаем проверку диаметра жилы:

$$D_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_0}{\pi \cdot f}} \quad D_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi \cdot f}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 500}{3,14 \cdot 0,753}} = 29,084 \text{ мм}$$

Для уплотненных жил коэффициент заполнения до 0,9, поэтому диаметр жилы будет меньше. При применении уплотненных жил достигается уменьшение на 5 – 9% расхода изоляционных материалов и на 7-9% меди. Кроме того получается более гладкая поверхность жил и в связи с этим некоторое повышение электрической прочности изоляции.

При уплотнении токопроводящие жилы становятся несколько более твердыми, т.е. частично нагартовываются. Однако снижение электрической проводимости медных жил при этом составляет не более 0,6-0,8%, поэтому нагартовка не может служить препятствием для применения уплотненных жил.

Поэтому диаметр жилы:

$$D_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi \cdot f}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 500}{3,14 \cdot 0,88}} = 26,9 \text{ мм.}$$

3.2 Изоляция. Расчет зависимости напряженности электрического поля в изоляции от радиуса

На ТПЖ накладывается экран из экструдированного полупроводящего сшитого полиэтилена толщиной 0,8 мм.

Радиус ТПЖ с полупроводящим экраном:

$$r_1 = r_{\text{жс}} + \Delta_{\text{Э.жс}}$$

где $r_{\text{жс}}$ – радиус жилы, мм; $\Delta_{\text{Э.жс}}$ – толщина экрана по жиле, мм

$$r_1 = 13,45 + 0,8 = 14,25 \text{ мм}$$

1) Класс напряжения $U_f = 110 \text{ кВ}$ – это номинальное линейное напряжение на приемнике электроэнергии. Кабель рассчитывается на

наибольшее рабочее напряжение ($U_{\text{раб max}}$), так как на генераторе напряжение выше, $k = 1,15$, [10]:

$$U_{\delta\delta i_{\text{max}}} = k \cdot U_i = 1,15 \cdot 110 = 126,5 \text{ кВ} \quad (3.2.2)$$

Кабели на напряжения от 110 кВ и более работают с заземленной нейтралью, поэтому при однофазном коротком замыкании на землю происходит отключение и напряжение на фазах не может быть больше фазного.

$$U_0 = \frac{1,15 \cdot U_i}{\sqrt{3}} = \frac{1,15 \cdot 110}{\sqrt{3}} = 73 \text{ кВ}$$

$$r_2 = r_1 e^{\frac{U_0}{E_{\text{max}} \cdot r_1}}$$

r_1 – радиус экрана по жиле

r_2 – радиус по изоляции

$E_{\text{max}} = 6,3 \text{ кВ/мм}$ – допустимая напряженность электрического поля

на жиле

$$r_2 = 14,25 \cdot e^{\frac{73 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 14,25}} = 32,25 \text{ мм}$$

Толщина изоляции:

$$\Delta_{\text{из}} = r_2 - r_1 = 32,25 - 14,25 = 18 \text{ мм}$$

Зависимость напряженности электрического поля в изоляции от радиуса:

$$E = \frac{U_0}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Результаты вычислений сведены в таблицу 6. По данным таблицы построен график зависимости напряженности от радиуса рис. 4.

Таблица 6. Распределение напряженности электрического поля в изоляции от радиуса

г, мм	Е, кВ/мм
14,25	6,28
16	5,59
18	4,97
20	4,47
22	4,06
24	3,73
26	3,44
28	3,19
30	2,98
32	2,79
32,25	2,77

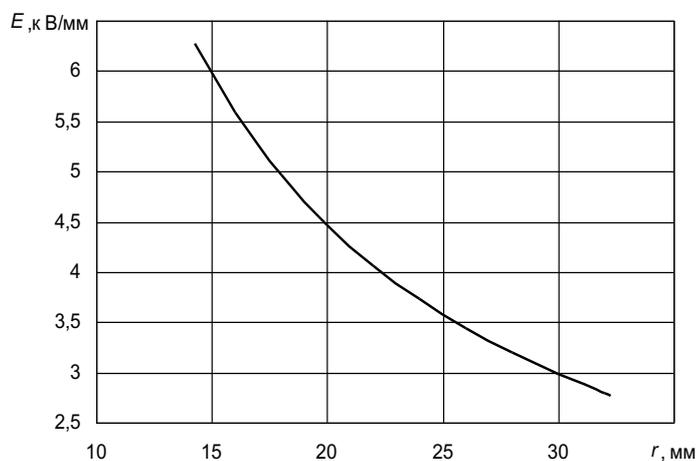


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля

3.3 Защитные покрытия

Расчет диаметра кабеля:

На изоляцию накладывается экран из экструдированного полупроводящего сшитого полиэтилена толщиной 0,8 мм.

r_3 – радиус по экрану изоляции.

$$r_3 = r_2 + \Delta э.и.,$$

$\Delta э.и.$ – толщина экрана по изоляции.

$$r_3 = 32,25 + 0,8 = 34,05 \text{ мм}$$

На экран по изоляции накладывается полупроводящая водонабухающая лента толщиной 0,3 мм

r_4 – радиус по полупроводящей водонабухающей ленте.

$$r_4 = r_3 + \Delta_{в.л.1},$$

$\Delta_{в.л.1}$ – толщина полупроводящей водонабухающей ленты.

$$r_4 = 33,05 + 0,3 = 33,35 \text{ мм.}$$

Затем накладывается экран, состоящий из медных проволок диаметром 1,4 мм, поверх которых спирально наложена медная лента толщиной 0,1 мм. Ширина ленты 8 мм.

r_5 – радиус по металлическому экрану.

$$r_5 = r_4 + d_{np} + \Delta_{м.л.},$$

d_{np} – диаметр медной проволоки экрана, $\Delta_{м.л.}$ – толщина медной ленты экрана.

$$r_5 = 33,35 + 1,4 + 0,1 = 34,85 \text{ мм.}$$

N – количество проволок.

$$N = \frac{S_{\dot{y}}}{\frac{\pi d_{i\delta}^2}{4}} = \frac{50}{\frac{3,14 \cdot 1,4^2}{4}} \approx 32$$

Выразим количество проволок через диаметр про волоки и зазор между ними:

$$N = \frac{l_{cp}}{d_{np} + \Delta_{np}}$$

l_{cp} – средняя длина окружности проходящая через центр проволок, мм

Δ_{np} – зазор между проволоками, мм

$$\Delta_{np} = \frac{l_{cp}}{N} - d_{np}$$

$$l_{cp} = 2 \cdot \pi \cdot r_{cp}$$

r_{cp} – средний радиус, расстояние от центра жилы до центра проволоки экрана.

$$r_{cp} = r_4 + \frac{d_{np}}{2} = 33,35 + \frac{1,4}{2} = 34,05 \text{ мм}$$

$$l_{cp} = 2 \cdot 3,14 \cdot 34,05 = 213,8 \text{ мм}$$

$$\Delta_{r\delta} = \frac{213,8}{32} - 1,4 = 5,28 \text{ мм}$$

На экран накладывается слой из водонабухающей ленты толщиной 0,35 мм:

r_6 – радиус по водонабухающей ленте.

$$r_6 = r_5 + \Delta_{в.л.2},$$

$\Delta_{в.л.2}$ – толщина водонабухающей ленты.

$$r_6 = 34,85 + 0,35 = 35,2 \text{ мм.}$$

Далее накладывается полиэтиленовая оболочка толщиной 4 мм:

r_7 – радиус по наружной оболочке.

$$r_7 = r_6 + \Delta_{об},$$

$\Delta_{об}$ – толщина оболочки.

$$r_7 = 35,2 + 4 = 39,2 \text{ мм.}$$

Диаметр кабеля:

$r_k = r_k$, r_k – радиус кабеля.

$$D_k = 2r_7 = 2r_k$$

$$D_k = 2 \cdot 39,2 = 78,4 \text{ мм.}$$

4. Общая методика расчета электрических параметров силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена

4.1 Сопротивление токопроводящей жилы постоянному и переменному току

Сопротивление токопроводящей жилы постоянному току:

$$R_{ae} = \frac{\rho_{20} l}{S_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{ae} - 20)] \cdot k_{\delta} \quad (4.1.1)$$

где $\rho_{20} = 0,0172, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – удельное сопротивление меди при 20°C ,

l – длина жилы;

S_0 – сечение жилы, мм^2

$\alpha = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ – температурный коэффициент сопротивления, .

$T_{жс}$ – максимальная допустимая рабочая температура, табл.

k_y – коэффициент укрутки.

$$R_{жс} = \frac{0,0172 \cdot 1}{500} \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (90 - 20)] \cdot 1,025 = 4,496 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Сопротивление жилы переменному току:

$$R_{жс} \sim = R_{жс} \cdot [1 + 1(y_{\Pi} + y_{\delta})],$$

где $y_{\Pi} = f(x)$ – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект

$y_{\delta} = f(x)$ – коэффициент, учитывающий эффект близости:

$$y_{\Pi} = \frac{x^4}{192 + 0,8x^4}, \quad y_{\delta} = y_{\Pi} \left(\frac{d_{ж}}{h} \right)^2 \left[\frac{1,18}{y_{\Pi} + 0,27} + 0,312 \left(\frac{d_{ж}}{h} \right)^2 \right], \quad (4.1.3)$$

где h – расстояние между осями кабелей, $d_{ж}$ – диаметр жилы.

Приближенные формулы (3.28) справедливы для $x < 2,8$,

$$x = \sqrt{\frac{2f \mu \mu_0 k}{R_{\sim}}}$$

где $f = 50 \text{ Гц}$ – частота переменного тока

$k=1$ – коэффициент, зависящий от конструкции ТПЖ, табл.

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{4,496 \cdot 10^{-4}}} = 1,6714$$

$$y_{\Pi} = \frac{1,6714^2}{192 + 0,8 \cdot 1,6714^2} = 39,367 \cdot 10^{-3}$$

$$h = 2 \cdot r_k + r_k = 2 \cdot 39,2 + 39,2 = 117,6 \text{ мм},$$

где r_k радиус кабеля, мм

$$y_{\sigma} = 39,367 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{13,45}{117,6} \right)^2 \cdot \left[\frac{1,18}{39,367 \cdot 10^{-3} + 0,27} + 0,312 \cdot \left(\frac{13,45}{117,6} \right)^2 \right] = 7,89 \cdot 10^{-3}$$

$$R_{\approx} = 4,496 \cdot 10^{-5} \cdot [1 + 39,367 \cdot 10^{-3} + 7,89 \cdot 10^{-3}] = 4,7084 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

4.2 Диэлектрические потери в изоляции, сопротивление изоляции, электрическая емкость кабеля, индуктивность жилы при замкнутых оболочках на землю

Сопротивление изоляции кабеля:

$$R_{uz} = \frac{\rho_v}{2\pi l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

где ρ_v , Ом·м - удельное объемное сопротивление изоляции,

r_1 – радиус экрана по жиле, мм

r_2 – радиус по изоляции, мм

l – длина кабеля, м

$$R_{uz} = \frac{10^{-16}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} \cdot \ln \frac{32,25}{14,25} = 1,3 \cdot 10^{-17} \text{ Ом}$$

Электрическая емкость кабеля,

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость изоляции $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$

Ф/м – диэлектрическая постоянная, L – длина кабеля.

$$C = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{\ln \left(\frac{32,25}{14,25} \right)} = 156 \cdot 10^{-12} = 0,156 \text{ нФ}.$$

Индуктивность жилы при замкнутых оболочках на землю,

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{S}{r_0} + \frac{1}{2} \right)$$

S – расстояние между осями жил, мм

r_0 – радиус жилы, мм

Кабели расположены треугольником и касаются друг друга:

$S = D_K = 78,4$ мм, где D_K – диаметр кабеля

$$L = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 3,14} \left(\ln \frac{78,4}{13,45} + 0,5 \right) = 4,5 \cdot 10^{-7} = 0,45 \text{ мкГн}$$

Кабели расположены в горизонтальной плоскости на расстоянии

r_K :

$$S = D_K + r_K = 78,4 + 39,2 = 117,6 \text{ мм}$$

$$L = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 3,14} \left(\ln \frac{78,4}{13,45} + 0,5 \right) = 5,3 \cdot 10^{-7} = 0,53 \text{ мкГн}$$

Диэлектрические потери в изоляции,

$$P_o = U_\phi^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta,$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока

$\text{tg}\delta = 0,0004$ тангенс диэлектрических потерь изоляции

U_ϕ – фазное напряжение, В

C – емкость изоляции, Ф/м

$$P_o = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,156 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{1,15 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 0,0004 = 0,105 \text{ Вт/м.}$$

4.3 Потери полезной энергии в металлических оболочках кабеля

Потери в металлическом экране.

Отношение потерь в экране P_ε к потерям в жиле $P_{ж}$,

$$\gamma_\varepsilon = \frac{P_\varepsilon}{P_{ж}} = \frac{R_\varepsilon}{R_{ж}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_\varepsilon^2}{(\omega M)^2} + 1 \right)},$$

где $R_э$ – электрическое сопротивление экрана, Ом/м

$R_{жс}$ – электрическое сопротивление жилы постоянному току, Ом/м

M – коэффициент взаимной индукции,

$$M = \frac{\mu\mu_0 L}{2\pi} \ln \frac{h}{r_э}$$

μ – магнитная проницаемость

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м

h – расстояние между осью жилы кабеля и металлического экрана соседнего кабеля, мм

$r_э$ – радиус по экрану, мм

$$h' = h - r_э = 117,6 - 34,85 = 82,75 \text{ мм.}$$

$$M = \frac{1 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 3,14} \ln \frac{82,75}{34,85} = 1,729 \cdot 10^{-7}$$

$$R_э = \frac{\rho_{cu} l k_y}{S_э},$$

где ρ_{cu} – удельное сопротивление меди при 20 °С

$S_э$ – сечение экрана,

$$R_э = \frac{0,0172 \cdot 1}{50} \cdot 1,025 = 3,526 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$$\gamma_э = \frac{3,526 \cdot 10^{-4}}{4,496 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{(3,526 \cdot 10^{-4})}{(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,729 \cdot 10^{-7})^2}\right)} = 0,1735$$

5. Общая методика теплового расчета силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена

5.1 Расчёт тепловых сопротивлений конструктивных элементов и окружающей среды

Тепловое сопротивление экрана по жиле,

$$S_{\text{э.ж}} = \frac{\sigma_{\text{э.ж}}}{2\pi L} \ln \frac{r_1}{r_{\text{ж}}}$$

где $\sigma_{\text{из}}=3,5$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление сшитого полиэтилена,

$r_{\text{ж}}$ – радиус жилы.

r_1 – радиус кабеля по экрану жилы, мм

$$S_{\text{э.ж}} = \frac{3,5}{2\cdot 3,14\cdot 1} \ln \frac{14,25}{13,25} = 0,0322 \text{ } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$$

Тепловое сопротивление изоляции:

$$S_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

где $\sigma_{\text{из}}=3,5$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление сшитого полиэтилена

r_2 – радиус кабеля по изоляции, мм

$$S_{\text{из}} = \frac{3,5}{2\cdot 3,14\cdot 1} \ln \frac{32,25}{14,25} = 0,455 \text{ } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$$

Тепловое сопротивление экрана по изоляции:

$$S_{\text{э.и}} = \frac{\sigma_{\text{э.и}}}{2\pi L} \ln \frac{r_3}{r_2}$$

r_3 – радиус по экрану изоляции.

где $\sigma_{\text{э.и}}=3,5$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление сшитого полиэтилена

$$S_{\text{э.и}} = \frac{3,5}{2\cdot 3,14\cdot 1} \ln \frac{33,05}{32,25} = 0,01365 \text{ } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$$

Тепловое сопротивление полупроводящей водонабухающей ленты:

$$S_{\text{в.л.1}} = \frac{\sigma_{\text{в.л}}}{2\pi L} \ln \frac{r_4}{r_3}$$

где $\sigma_{\text{в.л}}=6$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление полупроводящей водонабухающей ленты

r_4 – радиус по полупроводящей водонабухающей ленте.

$$S_{e.l.1} = \frac{6}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} \ln \frac{33,35}{33,05} = 0,0086 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

Медный экран имеет тепловое сопротивление $S_{эк}$, которое много меньше, чем тепловые сопротивления иных элементов конструкции кабеля, поэтому не учитывается.

Тепловое сопротивление водонабухающей ленты:

$$S_{e.l.2} = \frac{\sigma_{e.l.}}{2\pi L} \ln \frac{r_6}{r_5}$$

где $\sigma_{e.l.} = 6$ ($^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление водонабухающей ленты

r_5 – радиус по металлическому экрану.

r_6 – радиус по водонабухающей ленте.

$$S_{e.l.2} = \frac{6}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} \ln \frac{35,2}{34,85} = 0,0095 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

Тепловое сопротивление оболочки:

$$S_{i\dot{a}} = \frac{\sigma_{i\dot{a}}}{2\pi L} \ln \frac{r_7}{r_6}$$

r_7 – радиус по наружной оболочке (радиус кабеля)

$$S_{об.} = \frac{6}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} \ln \frac{39,2}{35,2} = 0,0599 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

$\sigma_{i\dot{a}} = 3,5$ ($^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление

полиэтилена

Тепловое сопротивление воздуха:

Критерий Грасгофа,

$$Gr = \frac{\beta \cdot D_H^3 \cdot g \cdot \theta}{\nu^2},$$

где D_H – наружный диаметр кабеля, мм

g – ускорение свободного падения

ν – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2 / \text{с}$, табл.

θ – перепад температуры между поверхностью кабеля и окружающей средой, °C

β – коэффициент температурного расширения воздуха, 1/К

$$\beta = \frac{1}{T_{cp}}$$

где T_{cp} – средняя температура воздуха, К

$$T_{cp} = T_0 + \frac{\theta}{2}$$

где $T_0 = 10^\circ\text{C}$ - температура окружающей среды

$$\theta = T_{II} - T_0$$

где T_{II} - температура поверхности кабеля, °C

Примем $T_{II} = 50^\circ\text{C}$, тогда

$$\theta = 50 - 10 = 40^\circ\text{C}$$

$$T_{cp} = 10 + \frac{40}{2} = 30^\circ\text{C}$$

$$\beta = \frac{1}{(273 + 30)} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$$

$$Gr = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot (78,4 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9,8 \cdot 40}{(16 \cdot 10^{-6})^2} = 2,43 \cdot 10^6$$

Критерий Прандтля:

$$Pr = 0,72$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^n$$

где c и n – постоянные коэффициенты, значения которых для различных произведений $Gr \cdot Pr$ приведены в табл.

$$Gr \cdot Pr = 2,4352955 \cdot 0,72 = 1,75 \cdot 10^7$$

$$Nu = 0,54 \cdot (1,75 \cdot 10^7)^{1/4} = 19,65$$

Коэффициент конвективной теплопередачи:

$$h = Nu \frac{\lambda}{D_H}$$

где $\lambda = 2,67 \cdot 10^{-2} \text{Вт/м} \cdot \text{°C}$ - теплопроводность воздуха

D_H – наружный диаметр кабеля, мм

$$h = 19,65 \frac{2,67 \cdot 10^{-2}}{78,4 \cdot 10^{-3}} = 6,67 \text{Вт/м} \cdot \text{°C}$$

Тепловое сопротивление воздуха,

$$S_{\epsilon} = \frac{1}{\pi \cdot D_H (h + \epsilon_n \cdot c_0 \cdot \theta_1)},$$

где ϵ_n – степень черноты кабеля, $\epsilon_n = 0,8$,

D_H – наружный диаметр кабеля, мм

$c_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$ - постоянная излучения абсолютно черного

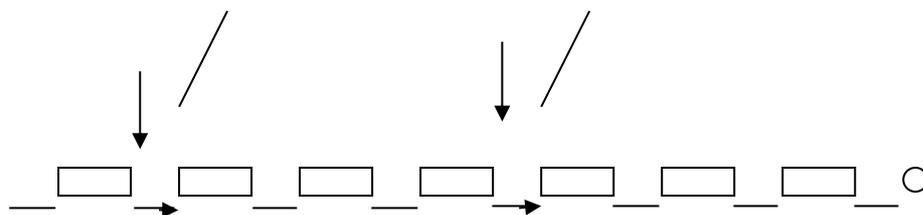
тела

$$\theta_1 = \frac{T_H^4 - T_0^4}{\theta} = \frac{(273 + 50)^4 - (273 + 10)^4}{10} = 111757308 \text{K}^3$$

$$S_{\epsilon} = \frac{1}{3,14 \cdot 78,4 \cdot 10^{-3} (6,67 + 0,8 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 111757308)} = 0,3446 \text{°C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

5.2 Расчёт допустимого тока нагрузки, передаваемой мощности

$$P_{\text{ж}} P_{\text{д}} P_{\text{ж}} + P_{\text{д}} P_{\text{э}} P_{\text{ж}} + P_{\text{д}} + P_{\text{э}}$$



$$T_{\text{ж}} S_{\text{э,ж}} \frac{S_{\text{из}}}{2} \frac{S_{\text{из}}}{2} S_{\text{э,и}} S_{\text{в.л.1}} S_{\text{в.л.2}} S_{\text{об}} S_{\epsilon} T_0$$

Рис. 5. Тепловая схема замещения кабеля при прокладке в воздухе

Тепловой закон Ома, :

$$\theta = PS$$

Уравнение для тепловой схемы замещения, используя тепловой закон:

$$T_{жс} - T_0 = P_{жс} \left(S_{э.жс.} + \frac{S_{из}}{2} \right) + (P_{жс} + P_{\partial}) \left(\frac{S_{из}}{2} + S_{э.и} + S_{в.л.1} \right) + (P_{жс} + P_{\partial} + P_{\varepsilon}) (S_{в.л.2} + S_{об} + S_0)$$

Согласно закону Джоуля – Ленца:

$$P_{жс} = I^2 \cdot R_{жс\sim}$$

Из отношения потерь найдем:

$$P_{\varepsilon} = y_{\varepsilon} \cdot P_{жс}$$

где $P_{жс}$ – количество теплоты, выделяющееся в жиле, Вт/м

P_{∂} – диэлектрические потери в изоляции, Вт/м

P_{ε} – потери в металлическом экране, Вт/м

I – допустимый ток нагрузки, А

$R_{жс\sim}$ – сопротивление токопроводящей жилы переменному току,

Ом

Преобразуем формулу:

$$T_{жс} - T_0 = P_{жс} \left(S_{э.жс.} + S_{из} + S_{э.и} + S_{в.л.1} + (1 + y_{\varepsilon}) (S_{в.л.2} + S_{об} + S_{\varepsilon}) \right) + P_{\partial} \left(\frac{S_{из}}{2} + S_{э.и} + S_{в.л.1} + S_{в.л.2} + S_{об} + S_{\varepsilon} \right)$$

Допустимый ток нагрузки при прокладке кабеля в воздухе:

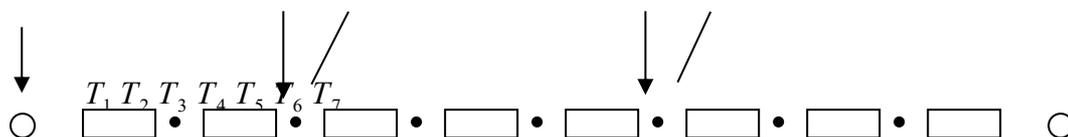
$$I_{доп} = \sqrt{\frac{T_{жс} - T_0 - P_{\partial} \left(\frac{S_{из}}{2} + S_{э.и} + S_{в.л.1} + S_{в.л.2} + S_{об} + S_{\varepsilon} \right)}{R_{жс\sim} \left[\left(S_{э.жс.} + S_{из} + S_{э.и} + S_{в.л.1} + (1 + y_{\varepsilon}) (S_{в.л.2} + S_{об} + S_{\varepsilon}) \right) \right]}}$$

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{90 - 10 - 0,105 \cdot \left(\frac{0,455}{2} + 0,01365 + 0,0086 + 0,0095 + 0,0599 + 0,3446 \right)}{4,7085 \cdot 10^{-5} \cdot \left[\left(0,0322 + 0,455 + 0,01365 + 0,0086 + (1 + 0,1735) (0,0095 + 0,0599 + 0,3446) \right) \right]}}$$

= 1305,74 А.

$P_{жс}$

$$P_{\partial} P_{жс} + P_{\varepsilon} P_{жс} + P_{\partial} + P_{\varepsilon}$$



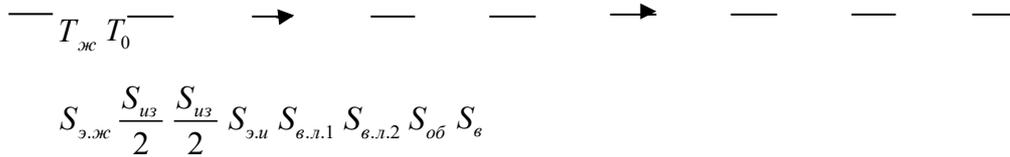


Рис. 6. Тепловая схема замещения кабеля при прокладке в воздухе

Рассчитаем температуру поверхности:

$$T_{\gamma} = T_{II}$$

$$T_{II} - T_0 = (P_{жс} + P_{\delta} + P_{\varepsilon}) S_{\varepsilon}$$

$$T_{II} = T_0 + (P_{жс} + P_{\delta} + P_{\varepsilon}) S_{\varepsilon}$$

$$P_{жс} = I^2 R_{жс\sim}$$

$$P_{\varepsilon} = y_{\varepsilon} \cdot P_{жс}$$

$$P_{жс} = 1305,74^2 \cdot 4,7085 \cdot 10^{-5} = 80,277 \text{ Вт/м}$$

$$P_{\varepsilon} = 0,1735 \cdot 80,277 = 13,93 \text{ Вт/м}$$

$$T_{\gamma} = 10 + (80,277 + 0,105 + 13,93) \cdot 0,3446 = 42,499 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Теперь сделаем перерасчет теплового сопротивления воздуха и допустимого тока. Результаты вычислений занесем в таблицу 7.

Таблица 7. Зависимость параметров от температуры поверхности кабеля

№	$T_{II}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{cp}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$Gr, \times 10^6$	Nu	$h, \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$	$S_{\varepsilon}, \text{ м} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$	$I_{доп}, \text{ А}$
1	50	30	2,44	19,65	6,69	0,3446	1353,91
2	42,499	26,25	20,03	18,71	6,37	0,36	1293,84
3	43,361	26,68	20,54	18,83	6,41	0,3583	1295,3
4	43,255	26,63	20,47	18,82	6,4	0,3585	1295,16

Посчитаем тепловое сопротивление кабеля:

$$S_{К\epsilon} = S'_{\text{э.жс}} + S'_{\text{из}} + S'_{\text{э.и}} + S'_{\text{б.л.1}} + S'_{\text{б.л.2}} + S'_{\text{об}} + S'_{\text{г}}$$

$$S_{К\epsilon} = 0,0322 + 0,455 + 0,01365 + 0,0086 + 0,0095 + 0,0599 + 0,3585 = 0,93735$$

°C / Вт

Допустимый ток нагрузки при прокладке кабеля в земле.

Тепловое сопротивление земли:

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{\pi} \ln \frac{2L}{r_k}$$

σ_3 – удельное тепловое сопротивление земли, °C · м / Вт

L – глубина прокладки кабеля в земле, м

r_k – радиус кабеля.

Согласно руководству по эксплуатации, прокладке и монтажу кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ,

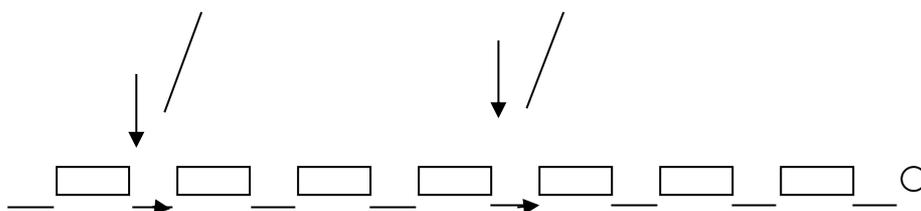
$$\sigma_3 = 1,2 \text{ °C} \cdot \text{м} / \text{Вт},$$

$$L = 1,5 \text{ м},$$

$$S_3 = \frac{1,2}{3,14} \ln \frac{2 \cdot 1,5}{39,2 \cdot 10^{-3}} = 1,658$$

Допустимый ток нагрузки:

$$P_{\text{жс}} P_{\text{д}} P_{\text{жс}} + P_{\text{д}} P_{\text{э}} P_{\text{жс}} + P_{\text{д}} + P_{\text{э}}$$



$$T_{ж} S_{э.ж} \frac{S_{уз}}{2} \frac{S_{уз}}{2} S_{э.и} S_{б.л.1} S_{б.л.2} S_{об} S_3 T_0$$

Рис. 7. Тепловая схема замещения кабеля при прокладке в земле

Тепловой закон Ома:

$$\theta = PS$$

Составим уравнение для тепловой схемы замещения, используя тепловой закон:

$$T_{ж} - T_0 = P_{ж} \left(S_{э.ж} + \frac{S_{уз}}{2} \right) + (P_{ж} + P_{\partial}) \left(\frac{S_{уз}}{2} + S_{э.и} + S_{б.л.1} \right) + (P_{ж} + P_{\partial} + P_3) (S_{б.л.2} + S_{об} + S_3)$$

$$P_{ж} = I^2 \cdot R_{ж\sim}$$

$$P_3 = y_3 \cdot P_{ж}$$

где $P_{ж}$ – количество теплоты, выделяющееся в жиле, Вт/м

D_a – диэлектрические потери в изоляции, Вт/м

D_y – потери в металлическом экране, Вт/м

I – допустимый ток нагрузки, А

$R_{ж\sim}$ – сопротивление токопроводящей жилы переменному току,

Ом

$$T_{ж} - T_0 = P_{ж} (S_{э.ж} + S_{уз} + S_{э.и} + S_{б.л.1} + (1 + y_3)(S_{б.л.2} + S_{об} + S_3)) + P_{\partial} \left(\frac{S_{уз}}{2} + S_{э.и} + S_{б.л.1} + S_{б.л.2} + S_{об} + S_3 \right)$$

Допустимый ток нагрузки при прокладке кабеля в земле:

$$I_{дон} = \sqrt{\frac{T_{ж} - T_0 - P_{\partial} \left(\frac{S_{уз}}{2} + S_{э.и} + S_{б.л.1} + S_{б.л.2} + S_{об} + S_3 \right)}{R_{ж\sim} \left[(S_{э.ж} + S_{уз} + S_{э.и} + S_{б.л.1} + (1 + y_3)(S_{б.л.2} + S_{об} + S_3)) \right]}}$$

$$I_{дон} = \sqrt{\frac{90 - 10 - 0,105 \cdot \left(\frac{0,455}{2} + 0,01365 + 0,0086 + 0,0095 + 0,0599 + 1,658 \right)}{4,7085 \cdot 10^{-5} \cdot \left[(0,0322 + 0,455 + 0,01365 + 0,0086 + (1 + 0,1735)(0,0095 + 0,0599 + 1,658)) \right]}}$$

$$= 817,36 \text{ А.}$$

Посчитаем тепловое сопротивление кабеля:

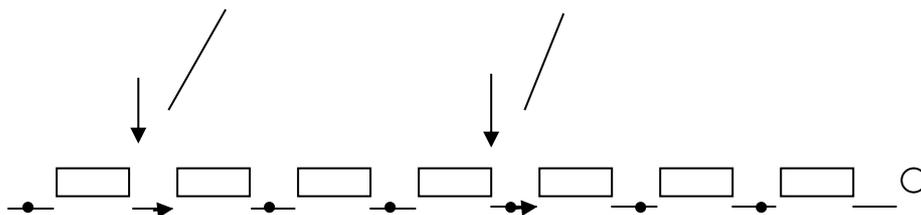
$$S_{K3} = S_{э.жс} + S_{из} + S_{э.и} + S_{в.л.1} + S_{в.л.2} + S_{об} + S_3$$

$$S_{K3} = 0,0322 + 0,455 + 0,01365 + 0,0086 + 0,0095 + 0,0599 + 1,658 = 2,23685$$

°C / Вт

5.3 Расчет распределения температуры в кабеле

$$P_{э} P_{а} P_{э} + P_{а} P_{э} P_{э} + P_{а} + P_{э}$$



$$\dot{Q}_{э} S_{э.э} T_6 \frac{S_{э.э}}{2} \frac{S_{э.э}}{2} T_5 S_{э.э} T_4 S_{а.э.1} T_3 S_{а.э.2} T_2 S_{и.а} T_1 S_{э} T_0$$

Рис. 8. Тепловая схема замещения кабеля

а) Кабель проложен в воздухе.

I – допустимый ток нагрузки при прокладке кабеля на воздухе, А

Вычислим потери (5.2.9) и (5.2.10):

$$P_{жс} = 1295,16^2 \cdot 4,7085 \cdot 10^{-5} = 78,982 \text{ Вт/м}$$

$$P_{\partial} = 0,105 \text{ Вт/м}$$

$$P_{э} = 0,1735 \cdot 78,982 = 13,703 \text{ Вт/м}$$

Вычислим температуры:

$$T_1 = T_0 + (P_{жс} + P_{\partial} + P_{э}) \cdot S_0 = 10 + (78,982 + 0,105 + 13,703) \cdot 0,3585 = 43,3^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = T_1 + (P_{жс} + P_{\partial} + P_{э}) \cdot S_{об} = 43,3 + (78,982 + 0,105 + 13,703) \cdot 0,0599 = 48,9^{\circ}\text{C}$$

$$T_3 = T_2 + (P_{жс} + P_{\partial} + P_{э}) \cdot S_{в.л.2} = 48,9 + (78,982 + 0,105 + 13,703) \cdot 0,0092 = 49,8^{\circ}\text{C}$$

$$T_4 = T_3 + (P_{жс} + P_{\partial}) \cdot S_{в.л.1} = 49,8 + (78,982 + 0,105) \cdot 0,0086 = 50,5^{\circ}\text{C}$$

$$T_5 = T_4 + (P_{жс} + P_{\partial}) \cdot S_{э.и} = 50,5 + (78,982 + 0,105) \cdot 0,567 = 51,6^{\circ}\text{C}$$

$$T_6 = T_5 + \left(P_{жс} + \frac{P_{\partial}}{2} \right) \cdot S_{из} = 51,6 + \left(78,982 + \frac{0,105}{2} \right) \cdot 0,455 = 87,6^{\circ}\text{C}$$

$$T_{ж} = T_7 + P_{ж} \cdot S_{э.ж} = 87,6 + 78,982 \cdot 0,0322 \approx 90^{\circ}C$$

б) Кабель проложен в земле.

I – допустимый ток нагрузки при прокладке кабеля в земле, А

$$P_{ж} = 817,36^2 \cdot 4,7085 \cdot 10^{-5} = 31,457 \text{ Вт/м}$$

$$P_{\delta} = 0,105 \text{ Вт/м}$$

$$P_{\vartheta} = 0,1735 \cdot 31,457 = 5,458 \text{ Вт/м}$$

Вычислим температуры:

$$T_1 = T_0 + (P_{ж} + P_{\delta} + P_{\vartheta}) \cdot S_0 = 10 + (31,457 + 0,105 + 5,458) \cdot 1,658 = 71,4^{\circ}C$$

$$T_2 = T_1 + (P_{ж} + P_{\delta} + P_{\vartheta}) \cdot S_{об} = 71,4 + (31,457 + 0,105 + 5,458) \cdot 0,0599 = 73,6^{\circ}C$$

$$T_3 = T_2 + (P_{ж} + P_{\delta} + P_{\vartheta}) \cdot S_{с.л.2} = 73,6 + (31,457 + 0,105 + 5,458) \cdot 0,0095 = 74^{\circ}C$$

$$T_4 = T_3 + (P_{ж} + P_{\delta}) \cdot S_{с.л.1} = 74 + (31,457 + 0,105) \cdot 0,0086 = 74,3^{\circ}C$$

$$T_5 = T_4 + (P_{ж} + P_{\delta}) \cdot S_{э.и} = 74,4 + (31,457 + 0,105) \cdot 0,01365 = 74,7^{\circ}C$$

$$T_6 = T_5 + \left(P_{ж} + \frac{P_{\delta}}{2} \right) \cdot S_{из} = 74,7 + \left(31,457 + \frac{0,105}{2} \right) \cdot 0,455 = 89^{\circ}C$$

$$T_{ж} = T_6 + P_{ж} \cdot S_{э.ж} = 89 + 31,457 \cdot 0,0322 \approx 90^{\circ}C$$

1. Распределение температуры по оболочке:

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_6}{r_7}} \ln \frac{r}{r_7} \quad r \in [r_6 \div r_7]$$

r_7 – радиус кабеля, мм

r_6 – радиус по водонабухающей ленте, мм

а) Кабель проложен в воздухе.

$$T = 43,3 - \frac{43,3 - 48,9}{\ln \frac{35,2}{39,2}} \ln \frac{36}{39,2} = 4,7^{\circ}C$$

36 мм – промежуточное значение радиуса, находящиеся на оболочке кабеля

б) Кабель проложен в земле.

$$T = 71,4 - \frac{71,4 - 73,6}{\ln \frac{35,2}{39,2}} \ln \frac{36}{39,2} = 73,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Распределение температуры по водонабухающей ленте:

$$T = T_2 - \frac{T_2 - T_3}{\ln \frac{r_5}{r_6}} \ln \frac{r}{r_6} \quad r \in [r_5 \div r_6]$$

r_5 – радиус по медному экрану, мм

а) Кабель проложен в воздухе.

$$T = 48,9 - \frac{48,9 - 49,8}{\ln \frac{34,85}{35,2}} \ln \frac{34,9}{35,2} = 49,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

34,9 мм – промежуточное значение радиуса, находящиеся на водонабухающей ленте

б) Кабель проложен в земле.

$$T = 73,6 - \frac{73,6 - 74}{\ln \frac{34,85}{35,2}} \ln \frac{34,9}{35,2} = 73,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3. Распределение температуры по полупроводящей водонабухающей ленте:

$$T = T_3 - \frac{T_3 - T_4}{\ln \frac{r_3}{r_4}} \ln \frac{r}{r_3} \quad r \in [r_3 \div r_4]$$

r_4 – радиус по полупроводящей водонабухающей ленте, мм

r_3 – радиус по экрану изоляции, мм

а) Кабель проложен в воздухе.

$$T = 49,8 - \frac{49,8 - 50,5}{\ln \frac{33,05}{33,35}} \ln \frac{33,15}{33,35} = 50,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

33,15 мм – промежуточное значение радиуса, находящиеся на полупроводящей водонабухающей ленте

$$б) T = 74 - \frac{74 - 74,3}{\ln \frac{33,05}{33,35}} \ln \frac{33,15}{33,35} = 74,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4. Распределение температуры по экрану изоляции:

$$T = T_4 - \frac{T_4 - T_5}{\ln \frac{r_2}{r_3}} \ln \frac{r}{r_3} \quad r \in [r_2 \div r_3]$$

r_2 – радиус по изоляции, мм

а) Кабель проложен в воздухе.

$$T = 50,5 - \frac{50,5 - 51,6}{\ln \frac{32,25}{33,05}} \ln \frac{32,6}{33,05} = 51,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

32,6 мм – промежуточное значение радиуса, находящиеся на экране по изоляции

б) Кабель проложен в земле.

$$T = 74,3 - \frac{74,3 - 74,7}{\ln \frac{32,25}{33,05}} \ln \frac{32,6}{33,05} = 74,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5. Распределение температуры по изоляции:

$$T = T_5 - \frac{T_5 - T_6}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \ln \frac{r}{r_2} \quad r \in [r_1 \div r_2]$$

r_1 – радиус экрана по жилы, мм

а) Кабель проложен в воздухе.

$$T = 51,6 - \frac{51,6 - 87,6}{\ln \frac{14,05}{32,25}} \ln \frac{16}{32,25} = 82,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

16 мм – промежуточное значение радиуса, находящиеся на изоляции

б) Кабель проложен в земле.

$$T = 74,7 - \frac{74,7 - 89}{\ln \frac{14,05}{32,25}} \ln \frac{16}{32,25} = 87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6. Распределение температуры по экрану жилы:

$$T = T_6 - \frac{T_{\text{жс}} - T_6}{\ln \frac{r_{\text{жс}}}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1} \quad r \in [r_{\text{жс}} \div r_1]$$

$r_{\text{жс}}$ – радиус жилы, мм

а) Кабель проложен в воздухе.

$$T = 87,6 - \frac{87,6 - 90}{\ln \frac{13,45}{14,25}} \ln \frac{13,6}{14,25} = 89,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

13,6 мм – промежуточное значение радиуса, находящиеся на экране по жиле

б) Кабель проложен в земле.

$$T = 89 - \frac{89 - 90}{\ln \frac{13,45}{14,25}} \ln \frac{13,6}{14,25} = 89,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Результаты вычислений занесены в таблицу 8.

Таблица 8. Распределения температуры по радиусу кабеля

r, мм	Прокладка кабеля на воздухе	Прокладка кабеля в земле
	T, °C	T, °C
0	90	90
13,45	90	90
13,6	89,5	89,8
13,8	88,9	89,6
14	88,3	89,3
14,25	87,6	89
16	82,5	87
20	72,7	83,1
24	64,6	79,9
28	57,8	77,2
32,25	51,6	74,7
32,6	51,1	74,5
33,05	50,5	74,3
33,15	50,3	74,2
33,35	49,8	74
34,85	49,8	74
34,9	49,7	73,9
35,2	48,9	73,6

36	47,7	73,1
38	44,9	72
39,2	43,3	71,4

По данным таблицы построено распределение температуры в кабеле на рис. 9.

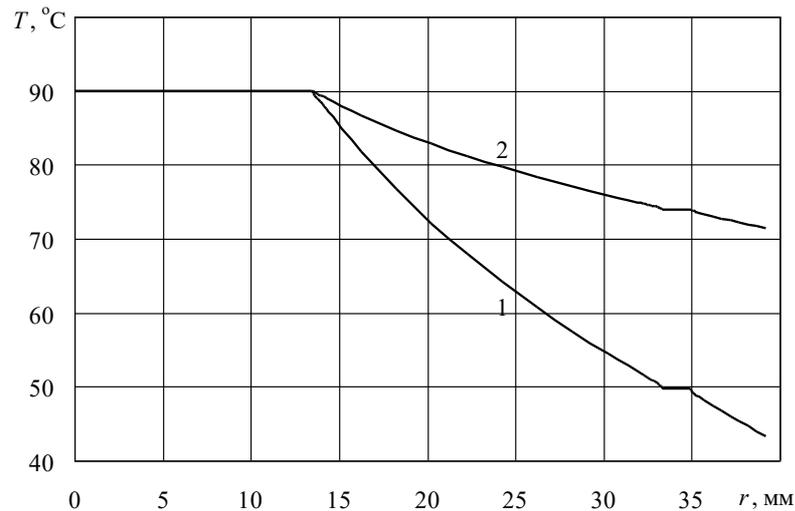


Рис. 9. Распределение температуры по радиусу кабеля: 1 – прокладка кабеля на воздухе, 2 – прокладка кабеля в земле

5.4 Расчёт теплоёмкости конструктивных элементов. Расчёт постоянной времени нагрева. Кривые нагрева и охлаждения

Расчёт теплоёмкости конструктивных элементов

Теплоёмкость любого i -го элемента цилиндрического элемента конструкции кабеля вычисляется по формуле:

$$C_i = c_i \rho_i V = c_i \rho_i \pi (r_2^2 - r_1^2) L$$

где V – объём, м^3 ; c_i – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/\text{м}^3\text{°C}$; ρ_i – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; L – длина цилиндра, м.

Значение удельной теплоёмкости и плотности конструктивных элементов приведены в таблице №

Теплоемкость жилы:

$$C_{ж} = c_{удси} \cdot \rho_{си} \cdot S_{ж} \cdot L,$$

$$C_{ж} = 380 \cdot 8800 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 1672 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость экрана по жиле:

$$C_{э.ж} = c_{э.жс} \rho_{э.жс} \pi (r_1^2 - r_{ж}^2) L$$

$$C_{э.ж} = 3750 \cdot 950 \cdot 3,14 \cdot (14,25^2 - 13,45^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 247,887 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость изоляции:

$$C_{из} = c_{из} \rho_{из} \pi (r_2^2 - r_1^2) L$$

$$C_{э.жс} = 3750 \cdot 950 \cdot 3,14 \cdot (32,25^2 - 14,25^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 9362,891 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость экрана по изоляции:

$$C_{э.и} = c_{э.и} \rho_{э.и} \pi (r_3^2 - r_2^2) L$$

$$C_{э.жс} = 3750 \cdot 950 \cdot 3,14 \cdot (33,05^2 - 32,25^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 584,369 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость полупроводящей водонабухающей ленты:

$$C_{в.л.1} = c_{в.л} \rho_{в.л} \pi (r_4^2 - r_3^2) L$$

$$C_{э.жс} = 1330 \cdot 500 \cdot 3,14 \cdot (33,35^2 - 33,05^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 41,595 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость металлического экрана:

$$C_э = c_{си} \rho_{си} \pi (r_5^2 - r_4^2) L$$

$$C_{э.жс} = 380 \cdot 8800 \cdot 3,14 \cdot (34,85^2 - 33,35^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 1074,166 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость водонабухающей ленты:

$$C_{в.л.2} = c_{в.л} \rho_{в.л} \pi (r_6^2 - r_5^2) L$$

$$C_{э.жс} = 1330 \cdot 500 \cdot 3,14 \cdot (35,2^2 - 34,85^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 51,192 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость оболочки:

$$C_{об} = c_{об} \rho_{об} \pi (r_7^2 - r_6^2) L$$

$$C_{э.жс} = 3750 \cdot 950 \cdot 3,14 \cdot (39,2^2 - 35,2^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 3329,028 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Теплоемкость кабеля:

$$C_{\kappa} = C_{ж} + 0,5 \cdot (C_{э.жс} + C_{из} + C_{э.и} + C_{в.л.1} + C_э + C_{в.л.2} + C_{об})$$

$$C_k = 1672 + 0,5 \cdot (247,887 + 9362,891 + 584,369 + 41,595 + 1074,166 + 51,192 + 3329,028) = 9017,566 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$$

Расчёт постоянной времени нагрева.

$$\beta = C_K \cdot S_K,$$

В воздухе:

$$\beta_a = C_K \cdot S_{K_a}$$

$$\beta_a = 9017,566 \cdot 0,94265 = 8504,6 \text{ сек} = 140,93 \text{ мин}$$

В земле:

$$\beta_z = C_K \cdot S_{K_z}$$

$$\beta_z = 9017,566 \cdot 2,23685 = 20171,8 \text{ сек} = 336,19 \text{ мин.}$$

Кривые нагрева и охлаждения.

Нагрев кабеля в воздухе:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\beta_a}}),$$

T – текущая температура, $^\circ\text{C}$

$T_0 = 10^\circ\text{C}$ температура окружающей среды

$T_{\max} = 90^\circ\text{C}$ максимальная температура

β_a – постоянная времени нагрева кабеля в воздухе, час

t – время нагрева, мин

$$T = 10 + (90 - 10) \cdot (1 - e^{-\frac{20}{140,93}}) = 19,8^\circ\text{C}$$

Охлаждения кабеля в воздухе:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0) \cdot e^{-\frac{t}{\beta_a}}$$

$$T = 10 + (90 - 10) \cdot e^{-\frac{20}{140,93}} = 74,3^\circ\text{C}$$

Нагрев кабеля в земле:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\beta_z}})$$

β_z – постоянная времени нагрева кабеля в земле, час.

$$T = 10 + (90 - 10) \cdot (1 - e^{-\frac{20}{336,19}}) = 14,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Охлаждения кабеля в земле:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0) \cdot e^{-\frac{t}{\beta_c}}$$

$$T = 10 + (90 - 10) \cdot e^{-\frac{20}{336,19}}$$

Результаты вычислений записаны в таблицу 9.

Таблица 9. Нагрев и охлаждение кабеля

Время (мин)	Температура, °C			
	На воздухе		В земле	
	Нагрев	Охлаждение	Нагрев	Охлаждение
0	10	90	10	90
20	20,6	79,4	14,6	85,4
40	29,8	70,2	19	81
60	37,7	62,3	23,1	76,9
80	44,7	55,3	26,9	73,1
100	50,7	49,3	30,6	69,4
160	64,3	35,7	40,3	59,7
260	77,4	22,6	53,1	46,9
360	83,8	16,2	62,6	37,4
460	86,9	13,1	69,6	30,4
560	88,5	11,5	74,9	25,1
660	89,3	10,7	78,8	21,2
760	89,6	10,4	81,7	18,3
860	89,8	10,2	83,8	16,2
920	89,9	10,1	84,8	15,2
940	89,9	10,1	85,1	14,9
960	89,9	10,1	85,4	14,6
1000	89,9	10,1	85,9	14,1
1100	90	10	87	13
1200	90	10	87,7	12,3
1300	90	10	88,3	11,7
1400	90	10	88,8	11,2
1500	90	10	89,1	10,9

5.5 Расчет зависимости температуры жилы от времени для тока нагрузки и тока перегрузки

Расчет будем производить при токе перегрузки в момент времени 360 мин.

а) при прокладке кабеля на воздухе:

$$I_{пер} = \frac{I_{дон}}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t_{пер}}{\beta}\right)}} = \frac{1295,16}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{360}{140,93}\right)}} = 1348,64 A,$$

а) при прокладке кабеля в земле:

$$I_{пер} = \frac{I_{дон}}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t_{пер}}{\beta}\right)}} = \frac{817,36}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{360}{336,19}\right)}} = 1008,19 A.$$

Температура жилы при токе перегрузки:

а) при прокладке кабеля на воздухе:

$$T = T_0 + \theta_{\max.пер} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{пер}}{\beta_в}}\right)$$

$$\text{где } \theta_{\max.пер} = P_{ж} \cdot S_{Кз} = I_{пер}^2 \cdot R_{ж\approx} \cdot S_{Кз} = 1348,64^2 \cdot 4,7085 \cdot 10^{-5} \cdot 0,93735 = 80,31$$

°C

$$T = 10 + 80,31 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{пер}}{140,93}}\right)$$

б) при прокладке кабеля в земле:

$$T = T_0 + \theta_{\max.пер} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{пер}}{\beta_з}}\right) \quad (5.5.5)$$

где

$$\theta_{\max.пер} = P_{ж} \cdot S_{Кз} = I_{пер}^2 \cdot R_{ж\approx} \cdot S_{Кз} = 1008,19^2 \cdot 4,7085 \cdot 10^{-5} \cdot 2,23685 = 107,06^\circ C$$

$$T = 10 + 107,06 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{пер}}{336,19}}\right)$$

Результаты вычислений занесены в таблицу 10.

Таблица 10. Значения температуры жилы от времени от времени при токе перегрузки

Время, час	Температура, °C
	Нагрев

	На воздухе	В земле
0	10	10
20	21,1	16,9
40	30,8	23,4
60	39,1	29,5
80	46,4	35,2
100	52,7	40,7
120	58,2	45,8
140	62,9	50,6
160	67,1	55,1
260	80,8	74,2
360	87,5	88,3
460	90,9	98,9
560	92,5	106,7
660	93,3	112,5
760	93,7	116,8
860	93,9	120,0
960	94,0	122,3
1060	94,0	124,1

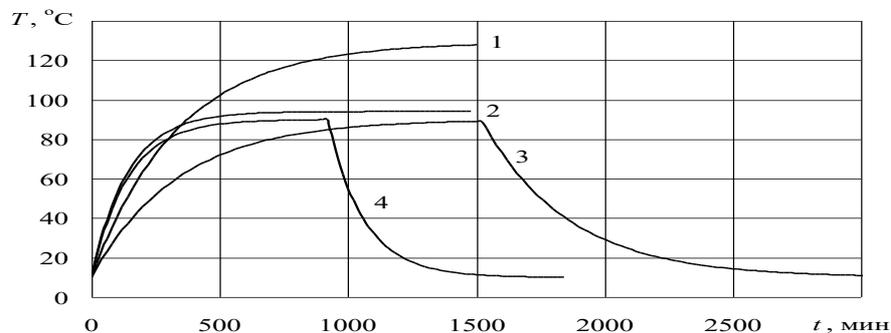


Рис. 10. Расчет зависимости температуры жилы от времени для тока нагрузки и тока перегрузки: 1 – нагрев кабеля в земле при токе перегрузки; 2 – нагрев кабеля на воздухе при токе перегрузки; 3 – нагрев и охлаждение кабеля в земле при токе нагрузки; 4 – нагрев и охлаждение кабеля на воздухе при токе нагрузки

5.6 Расчет зависимости тока перегрузки от времени перегрузки

а) При прокладке кабеля на воздухе:

$$I_{пер} = \frac{I_{доп}}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t_{пер}}{\beta_6}\right)}}$$

$$I_{пер} = \frac{1259,16}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{20}{140,93}\right)}} = 3,56 \text{ кА}$$

б) При прокладке кабеля в земле:

$$I_{пер} = \frac{I_{доп}}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t_{пер}}{\beta_3}\right)}}$$

$$I_{пер} = \frac{817,36}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{20}{336,19}\right)}} = 3,4 \text{ кА}$$

Результаты вычислений занесены в таблицу 11.

Таблица 11. Значения тока перегрузки при различном времени перегрузки

Время, мин	Ток перегрузки, кА	
	На воздухе	В земле
1	15,403	14,998
20	3,561	3,401
40	2,605	2,440
60	2,2	2,022
80	1,968	1,776
100	1,817	1,611
120	1,711	1,492
140	1,632	1,401
150	1,600	1,362
250	1,421	1,128
350	1,353	1,016
450	1,323	0,952
550	1,308	0,911
650	1,302	0,884
750	1,298	0,865
850	1,297	0,852
950	1,296	0,843

1050	1,296	0,836
1150	1,295	0,831
1250	1,295	0,827
1350	1,295	0,825
1450	1,295	0,823
1550	1,295	0,821
1650	1,295	0,82
1700	1,295	0,82

По данным таблицы построена зависимость тока перегрузки от времени перегрузки на рис. 11.

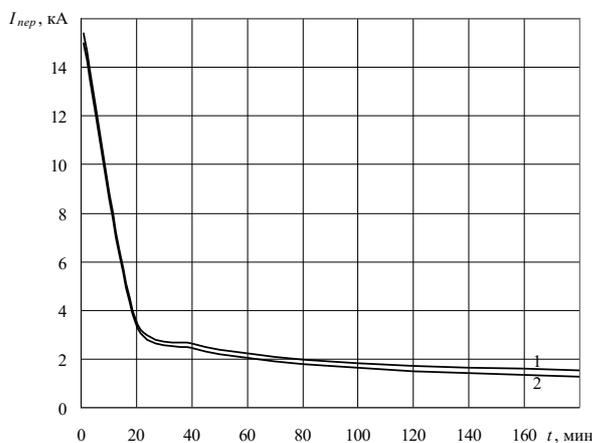


Рис. 11. Зависимость тока перегрузки от времени перегрузки: 1 – при прокладке кабеля на воздухе; 2 – при прокладке кабеля в земле

5.7 Расчет зависимости тока короткого замыкания (с предшествующей и без предшествующей нагрузки) от времени срабатывания защиты

1. Короткое замыкание с предшествующей нагрузкой,

$$I_{к.з.} = \sqrt{\frac{C_{ж}}{\alpha \cdot R_{T_0} \cdot \tau_{к.з.}} \ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_{к.з.} - T_{раб})}{1 + \alpha \cdot (T_{раб} - T_0)}} \quad (5.7.1)$$

где $C_{ж}$ – теплоемкость жилы,

$T_{к.з.} = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура, до которой можно кратковременно нагреть изоляцию,

$\tau_{к.з.}$ – время короткого замыкания, для данного типа изоляции.

Примем его равным промежутку $0,01 \div 1$ с,

$T_{раб} = 90$ °С – длительно допустимая температура нагрева жилы кабеля,

$\alpha = 0,00393$ $1/^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент удельного объёмного сопротивления меди.

$$I_{к.з.} = \sqrt{\frac{1672}{0,00393 \cdot 4,496 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01} \ln \frac{1 + 0,00393(250 - 90)}{1 + 0,00393(90 - 10)}} = 450,5 \text{ кА}$$

2. Короткое замыкание без предшествующей нагрузки:

$$I_{к.з.} = \sqrt{\frac{C_{ж}}{\alpha \cdot R_{T_0} \cdot \tau_{к.з.}} \ln(1 + \alpha \cdot (T_{к.з.} - T_0))}$$

$$R_{ж} = \frac{\rho_{20} \cdot l}{S_0} [1 + \alpha(T_0 - 20)] \cdot k_y = \frac{0,0172 \cdot 1}{500} \cdot [1 + 0,00393 \cdot (10 - 20)] \cdot 1,025 = 3,387 \cdot 10^{-5}$$

Ом

$R_{ж}$ – сопротивление токопроводящей жилы при температуре T_0 ,

$\rho_{20} = 0,0172$ Ом·мм²/м – удельное сопротивление меди при 20 °С,

$k_y = 1,025$ – коэффициент укрутки.

$$I_{к.з.} = \sqrt{\frac{1672}{0,00393 \cdot 3,387 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01} \ln(1 + 0,00393 \cdot (250 - 10))} = 913,4 \text{ кА}$$

Таблица 12. Значения токов короткого замыкания в различное время короткого замыкания

Время к. з., с	Токи короткого замыкания (жилы)	
	Без предшествующей нагрузки, кА	С предшествующей нагрузкой, кА
0,01	913,4	450,5
0,1	288,9	142,5

0,2	204,3	100,7
0,3	166,8	82,2
0,4	144,4	71,2
0,5	129,2	63,7
0,6	117,9	58,2
0,7	109,2	53,8

По данным таблицы на рисунке 12 построена зависимость токов короткого замыкания от времени короткого замыкания.

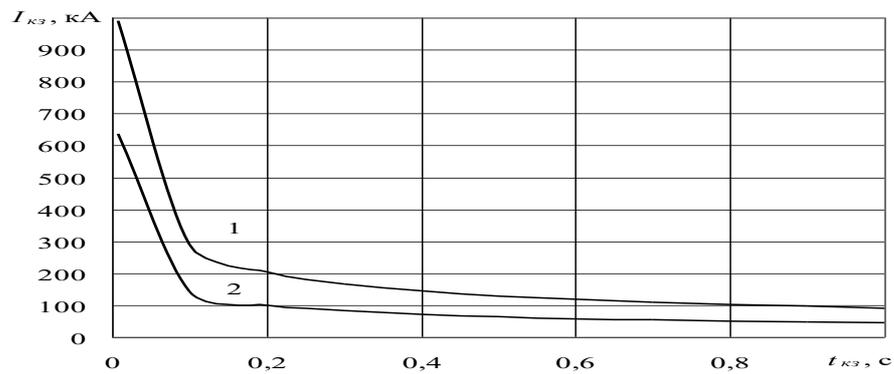


Рис. 12. Зависимость тока короткого замыкания от времени срабатывания защиты: 1 – короткое замыкание без предшествующей нагрузки; 2 – с предшествующей нагрузкой

6. Общая методика расчета массы материалов силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена

1. Масса токопроводящей жилы:

$$m_{жс} = \rho_{cu} S_{жс} l k_y$$

ρ_{cu} - плотность меди,

$S_{жс}$ – сечение жилы,

l – длина кабеля,

k_y – коэффициент укрутки.

$$m_{жс} = 8800 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1,025 = 4,51 \text{ кг.}$$

2. Масса экрана по жиле:

$$m_{э.жс} = \rho_{п} \cdot \pi \cdot (r_1^2 - r_{жс}^2) \cdot l$$

ρ_i – плотность сшитого полиэтилена,

$r_{жс}$ – радиус по жиле,

r_1 – радиус по экрану по жиле

$$m_{э.жс} = 950 \cdot 3,14 \cdot (14,25^2 - 13,45^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,066 \text{ кг}$$

3. Масса изоляции:

$$m_{из} = \rho_{II} \cdot \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot l$$

r_2 – радиус по изоляции,

$$m_{из} = 950 \cdot 3,14 \cdot (32,25^2 - 14,25^2) \cdot 1 = 2,469 \text{ кг}$$

4. Масса экрана по изоляции:

$$m_{э.и} = \rho_{II} \cdot \pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \cdot l$$

r_3 – радиус по экрану изоляции,

$$m_{э.и} = 950 \cdot 3,14 \cdot (33,05^2 - 33,35^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,156 \text{ кг}$$

5. Масса полупроводящей водонабухающей ленты:

$$m_{а.э} = \rho_{а.э} \cdot \pi \cdot (r_4^2 - r_3^2) \cdot l \cdot k_{\delta}$$

r_4 – радиус по медному экрану,

k_{δ} - коэффициент укрутки полупроводящей водонабухающей

ленты

$$k_{\delta} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m_T^2}}$$

m_T - кратность шага скрутки

$$m_T = \frac{h}{D_{\tilde{n}\delta}}$$

где h - шаг скрутки, мм

$D_{\tilde{n}\delta}$ - средний диаметр по полупроводящей водонабухающей

ленты

$$D_{\tilde{n}\delta} = r_3 + \frac{\Delta_{а.э}}{2}$$

r_3 - радиус по экрану изоляции, мм

$\Delta_{a.e}$ - толщина полупроводящей водонабухающей ленты

$$D_{н\delta} = 33,05 + \frac{0,3}{2} = 33,2 \text{ мм}$$

$$\cos \alpha = \frac{b}{h+e}$$

где α - угол скрутки,

b - ширина полупроводящей водонабухающей ленты, мм

e - перекрытие

получаем:

$$h = \frac{b}{\cos \alpha} - e$$

Шаг скрутки полупроводящей водонабухающей ленты:

$$h = \frac{30}{\cos 20} - 0,3 = 31,6$$

Кратность шага скрутки:

$$m_T = \frac{31,6}{33,2} = 0,95$$

Коэффициент укрутки полупроводящей водонабухающей ленты:

$$k_{\delta} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{0,95^2}} = 3,45$$

$$m_{a.i.e} = 500 \cdot 3,14 \cdot (33,35^2 - 33,05^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 3,36 = 0,104 \text{ кг}$$

6. Масса экрана:

r_5 – радиус по медному экрану,

$$m_{ЭК} = \rho_{Cu} \cdot S_{ЭК} \cdot k_y \cdot l = 8890 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 1,025 = 0,45 \text{ кг}$$

Для расчета массы медной ленты рассчитаем шаг скрутки:

$$h = \frac{b}{\cos \alpha} - e$$

где h - шаг скрутки, мм

α - угол скрутки

b - ширина медной ленты, мм

e - перекрытие

$$h = \frac{8}{\cos 25} - 0,3 = 8,5 \text{ мм}$$

Кратность шага скрутки:

$$m_T = \frac{h}{D_{\text{н\ddot{o}}}}$$

где $D_{\text{н\ddot{o}}}$ - средний диаметр по медной ленте

$$D_{\text{н\ddot{o}}} = r_5 - \frac{\Delta_{i.\ddot{e}}}{2}$$

r_5 - радиус по медному экрану, мм

$\Delta_{i.\ddot{e}}$ - толщина медной ленты

$$D_{\text{н\ddot{o}}} = 34,85 - \frac{0,1}{2} = 34,8 \text{ мм}$$

Кратность шага скрутки:

$$m_T = \frac{8,5}{34,8} = 0,24$$

Коэффициент укрутки медной ленты:

$$k_{\ddot{o}} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{0,24^2}} = 13,12$$

$$m_{i.\ddot{e}} = b \cdot \Delta_{i.\ddot{e}} \cdot \rho_{CU} \cdot k_{\ddot{o}}$$

$$m_{i.\ddot{e}} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 8800 \cdot 13,12 = 0,092$$

7. Масса водонабухающей ленты:

Для расчета массы водонабухающей ленты рассчитаем шаг скрутки:

$$h = \frac{b}{\cos \alpha} - e$$

где h - шаг скрутки, мм

α - угол скрутки

b - ширина водонабухающей ленты, мм

e - перекрытие

$$h = \frac{30}{\cos 20} - 0,3 = 31,6 \text{ мм}$$

Кратность шага скрутки:

$$m_T = \frac{h}{D_{\text{нб}}}$$

где $D_{\text{нб}}$ - средний диаметр по водонабухающей ленте

$$D_{\text{нб}} = r_5 + \frac{\Delta_{\text{а.э}}}{2}$$

r_5 - радиус по медному экрану, мм

$\Delta_{\text{а.э}}$ - толщина медной ленты

$$D_{\text{нб}} = 34,85 + \frac{0,35}{2} = 35,025 \text{ мм}$$

Кратность шага скрутки:

$$m_T = \frac{31,6}{35,025} = 0,9$$

Коэффициент укрутки медной ленты:

$$k_{\delta} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{0,9^2}} = 3,63$$

$$m_{\text{а.э}} = \rho_{\text{а.э}} \cdot \pi \cdot (r_6^2 - r_5^2) \cdot l \cdot k_{\delta}$$

r_6 - радиус по водонабухающей ленте,

$$m_{\text{а.э}} = 500 \cdot 3,14 \cdot (35,2^2 - 39,2^2) \cdot 1 \cdot 3,63 = 0,141 \text{ кг}$$

7. Масса оболочки:

$$m_{\text{об}} = \rho_{\text{II}} \cdot \pi \cdot (r_7^2 - r_6^2) \cdot l$$

r_7 - радиус по оболочке.

$$m_{\text{об}} = 950 \cdot 3,14 \cdot (39,2^2 - 35,2^2) \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,888 \text{ кг}.$$

Масса кабеля:

$$M = m_{\text{е}} + m_{\text{y.ае}} + m_{\text{эс}} + m_{\text{y.э}} + m_{\text{а.р.э}} + m_{\text{y.É}} + m_{\text{i.э}} + m_{\text{а.э}} + m_{\text{r.á}}$$

$$M = 4,51 + 0,066 + 2,469 + 0,156 + 0,104 + 0,45 + 0,092 + 0,141 + 0,888 = 8,876$$

кг.

7. Варианты к курсовому проектированию

Номер варианта	Номинальное сечение ТПЖ	Номинальное напряжение	Число повивов	Тип и система скрутки
	<i>мм²</i>	<i>кВ</i>	-	-
1	2	3	4	5
1	185	110	4	1+6+12+18
2	240	110	4	1+6+12+18
3	300	110	4	1+6+12+18
4	350	110	5	1+6+12+18+24
5	400	110	5	1+6+12+18+24
6	500	110	5	1+6+12+18+24
7	630	110	6	1+6+12+18+24+30
8	800	110	6	1+6+12+18+24+30
9	500	110	6	1+6+12+18+24+30
10	400	110	5	1+6+12+18+24

8. Приложение

Тип	Производитель	Уном, кВ	Исполнение	Сж, мм2	Мат. жидк.	Плот.ж.- Ом/км	Творим, град.	Сжк, мм2	Мат. экрана	д.ж- э.мм	д.п.ж. мм	д.п.н. мм	д.п.з. мм	д.зв. мм	д.об, мм	D_квб, мм	S3- ф	ерз
ПвПвДр-1х185/95-110	Москвабель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	4	62	2,4	
ПвВвВр-1х185/95-110	Севалбель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	62	2,4	
ПвВвВр-1х185/95-110	Москвабель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	60	2,4	
ПвПвДр-1х185/95-110	Севалбель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	4	64	2,4	
АПвПв-1х185/95-110	Севалбель	110	1	185	Al	0,164	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	62	2,4	
ПвПв-1х185/95-110	Севалбель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	62	2,4	
ПвПвВр-1х185/95-110	Севалбель	110	1	185	Al	0,164	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	62	2,4	
ПвПвДр-1х185/95-110	Москвабель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	60	2,4	
ПвВвВр-1х185/95-110	Москвабель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	60	2,4	
АПвВВ-1х185/95-110	Москвабель	110	1	185	Al	0,164	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	60	2,4	
АПвВВ-1х185/95-110	Севалбель	110	1	185	Al	0,164	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	62	2,4	
ПвВВ-1х185/95-110	Севалбель	110	1	185	Cu	0,0891	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3	62	2,4	
ПвПвДр-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	4,4	64	2,4	
АПвВвВр-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
ПвПвДр-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	4,2	67	2,4	
АПвВВ-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	64	2,4	
АПвПвДр-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	64	2,4	
АПвПвДр-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	4,2	67	2,4	
ПвВВ-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	64	2,4	
ПвВВ-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
XXS(FL)2Y 1х240RM/50 127/220 kV	NKT Cables	220	1	240	Cu	0,0754	20	50	Cu	25	0,8	0,8	0,5	1,5	4	83	2,4	
АПвПвДр-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	4,4	64	2,4	
АПвПв-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
ПвПв-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
ПвПвДр-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	64	2,4	
ПвВвВр-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
АПвВВ-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
ПвВвВр-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
АХХS(FL)2Y 1х240RM/50 127/220 kV	NKT Cables	220	1	240	Al	0,125	20	50	Cu	25	0,8	0,8	0,5	1,5	4	83	2,4	
АПвВвВр-1х240/95-110	Москвабель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	15	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	62	2,4	
АПвВВр-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	64	2,4	
АНХСНВМК-1х240/95- 110 (Финляндия)	REKA Cables	110	1	240	Al	0,125	20	95	Cu	18	0,8	0,8	0,5	1,5	3,1	69	2,4	
ПвВвВр-1х240/95-110	Севалбель	110	1	240	Cu	0,0754	20	95	Cu	16	0,4	0,4	0,4	1,5	3,2	64	2,4	

Тип	Производитель	Уном. кВ	Исполнение	Сж. ток, А	Мат. ядро	Флос. ж.- Ом/км	Творм. грд.	Сж. ток, А	Мат. ядро	д. ж. з. мм	д. п. ж. мм	д. п. л. мм	д. п. з. мм	д. эк. мм	д. об. мм	D_хвб. мм	S3-φ	eps
FXLJ-1x630/185-230	ABB	220	1	630	Cu	0.0283	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	92		2,4
АЛПДЛ-1x630/150-110	Севкабель	110	1	630	Al	0.0469	20	150	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4,6	78		2,4
ПДЛД-1x630/150-110	Севкабель	110	1	630	Cu	0.0283	20	150	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4,6	78		2,4
АЛПДБ-1x630/150-110	Севкабель	110	1	630	Al	0.0469	20	150	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	75		2,4
ПДБД-1x630/150-110	Севкабель	110	1	630	Cu	0.0283	20	150	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	75		2,4
АЛПДВ-1x630/150-110	Севкабель	110	1	630	Al	0.0469	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
АНХСНМК-1x630/50-110	РЕКА Cables (Финляндия)	110	1	630	Al	0.0469	20	95	Cu	18	0.8	0.8	0.5	1.5	4	84		2,4
АХХС(FL)2Y	NKT Cables	220	1	630	Al	0.0469	20	50	Cu	22	0.8	0.8	0.5	1.5	4	90		2,4
1x630RM/50 127/230 kV																		
АЛПДЛ-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Al	0.0469	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	4,6	71		2,4
АЛПДБ-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Al	0.0469	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
ПДЛД-1x630/150-110	Севкабель	110	1	630	Cu	0.0283	20	150	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	75		2,4
АЛПДВ-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Al	0.0469	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
АЛПДЛ-1x630/150-110	Севкабель	110	1	630	Al	0.0469	20	150	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	75		2,4
ПДБД-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Cu	0.0283	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
ПДВД-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Cu	0.0283	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
АЛПДВ-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Al	0.0469	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
АЛПДЛ-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Al	0.0469	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
ПДЛД-1x630/150-110	Москвабель	110	1	630	Cu	0.0283	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,6	69		2,4
2X5(FL)2Y	NKT Cables	220	1	630	Cu	0.0283	20	50	Cu	22	0.8	0.8	0.5	1.5	4	90		2,4
1x630RM/50 127/230 kV																		
АЛПДЛ-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Al	0.0367	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	74		2,4
ПДЛД-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	74		2,4
ПДВД-1x800/185-110	Севкабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	80		2,4
АЛПДБ-1x800/185-110	Севкабель	110	1	800	Al	0.0367	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	80		2,4
2X5(FL)2Y	NKT Cables	500	1	800	Cu	0.0221	20	170	Cu	35	0.8	0.8	0.5	1.5	4	126		2,4
1x800RM/50 290/500 kV																		
ПДВ-1x800/185-110	Севкабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	80		2,4
FXLJ-1x800/185-230	ABB	220	1	800	Cu	0.0221	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	97		2,4
АХХС(FL)2Y	NKT Cables	220	1	800	Al	0.0367	20	50	Cu	19	0.8	0.8	0.5	1.5	4	88		2,4
1x800RM/50 127/230 kV																		
2X5(FL)2Y	NKT Cables	220	1	800	Cu	0.0221	20	50	Cu	19	0.8	0.8	0.5	1.5	4	88		2,4
1x800RM/50 127/230 kV																		
АЛПДВ-1x800/185-110	Севкабель	110	1	800	Al	0.0367	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	80		2,4
АЛПДЛ-1x800/185-110	Севкабель	110	1	800	Al	0.0367	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4,8	82		2,4
АЛПДВ-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Al	0.0367	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	74		2,4
АХХС(FL)2Y	NKT Cables	500	1	800	Cu	0.0367	20	170	Cu	35	0.8	0.8	0.5	1.5	4	126		2,4
1x800RM/50 290/500 kV																		
ПДВ-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	74		2,4
АЛПДВ-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Al	0.0367	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	74		2,4
ПДЛД-1x800/185-110	Севкабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4,8	82		2,4
ПДВ-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	74		2,4
АЛПДБ-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Al	0.0367	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	3,8	74		2,4

Тип	Производитель	Уном. кВ	Исполнение	Сж. мсС	Мат. жила	Рлог.ж- Осжм	Тнорм. год.	Сж. мсС	Мат. жила	д.ж. з. мм	д.п.ж. мм	д.п.з. мм	д.зк. мм	д.об. мм	Д. клб. мм	S3-φ	eps
ПвБ-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	3.8	74		2.4
ПвП-1x800/185-110	Севзабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	3.8	80		2.4
АПвПз-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Al	0.0367	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4.8	76		2.4
ПвПз-1x800/185-110	Москвабель	110	1	800	Cu	0.0331	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4.8	76		2.4
АПвП-1x800/185-110	Севзабель	110	1	800	Al	0.0367	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	3.8	80		2.4
АПвП-1x1000/185-110	Севзабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	84		2.4
А2XS(FL)2Y 1x1000RМ/50 290/500 kV	NKT Cables	500	1	1000	Cu	0.0291	20	170	Cu	33	0.8	0.5	1.5	4	126		2.4
А2XS(FL)2Y 1x1000RМ/50 127/220 kV	NKT Cables	220	1	1000	Al	0.0291	20	50	Cu	19	0.8	0.5	1.5	4	92		2.4
АПвПз-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	5	81		2.4
АПвБ-1x1000/185-110	Севзабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	84		2.4
ПвБ-1x1000/185-110	Севзабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	84		2.4
2XS(FL)2Y 1x1000RМ/50 127/220 kV	NKT Cables	220	1	1000	Cu	0.0176	20	50	Cu	19	0.8	0.5	1.5	4	92		2.4
ПвП-1x1000/185-110	Севзабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	84		2.4
ПвВз-1x1000/185-110	Севзабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	84		2.4
ПвВз-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	79		2.4
АПвВз-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	79		2.4
АПвБ-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	5	86		2.4
ПвП-1x1000/185-110	Севзабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	86		2.4
ПвП-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	5	81		2.4
АПвП-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	79		2.4
АПвВз-1x1000/185-110	Севзабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	84		2.4
FLJ-1x1000/185-220	ABB	220	1	1000	Cu	0.0176	20	185	Cu	23	0.4	0.4	1.5	5	101		2.4
ПвП-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	79		2.4
ПвВз-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	79		2.4
АПвВз-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Cu	0.0176	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	79		2.4
АПвВз-1x1000/185-110	Москвабель	110	1	1000	Al	0.0291	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	79		2.4
2XS(FL)2Y 1x1000RМ/50 290/5000 kV	NKT Cables	500	1	1000	Cu	0.0176	20	170	Cu	33	0.8	0.5	1.5	4	126		2.4
АПвП-1x1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	5	90		2.4
АПвП-1x1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	185	Cu	15	0.4	0.4	1.5	4	88		2.4
ПвБ-1x1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	85		2.4
АПвП-1x1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	95	Cu	13	0.4	0.4	1.5	4	85		2.4

Тип	Производитель	Утом. хВ	Исполнение	Ск. код	Мат. жила	Флог.ж.- Ом/км	Тенорм. град.	Связ. код	Мат. экран	д.ж. з. мм	д.п.ж. мм	д.п.н. мм	д.п.з. мм	д.эк. мм	д.об. мм	Д. каб. мм	S3-φ	eps
ПвП-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	4	85		2,4
АПвВ-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	4	85		2,4
ПвВнг-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	4	85		2,4
АПвВнг-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	4	85		2,4
АПвВнг-1х1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4	88		2,4
ПвВ-1х1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4	88		2,4
АПвВ-1х1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4	88		2,4
АПвВнг-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	4	85		2,4
FXLJ-1х1200/185-220	ABB	220	1	1200	Cu	0.0151	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	109		2,4
ПвПр-1х1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4	88		2,4
ПвВнг-1х1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	4	88		2,4
ПвПг2r-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	5	87		2,4
АПвПг2r-1х1200/185-110	Севзабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	185	Cu	15	0.4	0.4	0.4	1.5	5	90		2,4
ПвВнг-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Cu	0.0151	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	4	85		2,4
АПвПг2r-1х1200/185-110	Москвабель	110	1	1200	Al	0.0247	20	95	Cu	13	0.4	0.4	0.4	1.5	5	87		2,4
FXLJ-1х1400/185-220	ABB	220	1	1400	Cu	0.0129	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	114		2,4
FXLJ-1х1600/185-220	ABB	220	1	1600	Cu	0.0113	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	118		2,4
FXLJ-1х2000/185-220	ABB	220	1	2000	Cu	0.009	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	122		2,4
FXLJ-1х2500/185-220	ABB	220	1	2500	Cu	0.0072	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	133		2,4
FXLJ-1х3000/185-220	ABB	220	1	3000	Cu	0.006	20	185	Cu	23	0.4	0.4	0.4	1.5	5	139		2,4

10. Литература

1. Лавров Ю. Кабели высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Журнал «Новости Электротехники» №2 (50) 2008 г.
2. Кожевников А. Современная кабельная изоляция. Журнал «Новости Электротехники» №2 (38) 2006 г.
3. Миткевич А.С., Паверман Н.Г., Елагина А.Н. Кабельные композиции на основе полиэтилена и поливинилхлорида. Тенденции развития в России. Журнал «Кабели и провода» №1 (302) 2007 г.
4. Технический справочник Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии. 3-е издание, 2006 г.
5. Основы кабельной техники: учебное пособие /Л.А. Ковригин. – Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2006. – 94 с.
6. Силовые кабели и кабельные линии: Учебное пособие для вузов/ Э.Т. Ларина – М.: Энергоатомиздат, – 1984, 368 с.
7. Основы кабельной техники: учебник для студентов высших учебных заведений/ В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
8. Основы кабельной техники. Учебное пособие для вузов /В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов: Под ред. В.А. Привезенцева. – М: «Энергия», 1975. – 472 с.
9. Руководство по эксплуатации, прокладке и монтажу кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ.
10. Белоруссов Н.И. Электрические кабели и провода. М.: Энергия, 1971.
11. Кабель силовой. МКП Н01В 9/00, полезная модель РФ №68172, заявлено 03.07.2007, опубликовано 10.11.2007, заявитель: ОАО «ВНИИКП».

12. IEC 60909-3. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short circuit currents flowing through earth. Edition 3.0. – Geneva: Publication of International Electrotechnical Commission, 2009. – 118 с.
13. Кадомская К. П. Электромагнитные процессы в кабельных линиях высокого напряжения – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 1997. - 141 с.
14. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6 – 500 кВ. Расчёт заземления экранов//Новости электротехники. 2007. №2(44). С. 124-128.

Содержание

1. Введение.....	3
1.1. Общие сведения о силовом высоковольтном кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена	3
2. Обоснование выбора конструкции силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена	8
3. Общая методика расчета конструктивных элементов силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена	10
3.1. Токопроводящая жила.....	10
3.2. Изоляция.....	12
3.3. Защитные покрытия.....	14
4. Общая методика расчета электрических параметров силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена	16
4.1. Сопротивление токопроводящей жилы постоянному и переменному току.....	16
4.2. Диэлектрические потери в изоляции, сопротивление изоляции, электрическая емкость кабеля, индуктивность жилы при замкнутых оболочках на землю.....	18
4.3. Потери полезной энергии в металлических оболочках кабеля..	19
5. Общая методика теплового расчета силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена	20
5.1. Расчёт тепловых сопротивлений конструктивных элементов и окружающей среды.....	20
5.2. Расчёт допустимого тока нагрузки, передаваемой мощности...	24
5.3. Расчет распределения температуры в кабеле.....	29
5.4. Расчёт теплоёмкости конструктивных элементов. Расчёт постоянной времени нагрева. Кривые нагрева и охлаждения.....	34
5.5. Расчет зависимости температуры жилы от времени для тока нагрузки и тока перегрузки.....	38
5.6. Расчет зависимости тока перегрузки от времени перегрузки...	39
5.7. Расчет зависимости тока короткого замыкания (с предшествующей и без предшествующей нагрузки) от времени срабатывания защиты	41
6. Общая методика расчета массы материалов силового высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена	43
7. Варианты к курсовому проектированию	48
8. Приложение	49
9. Литература.....	54
Содержание	56



Подготовлено к изданию и отпечатано:
**«SHAHARSOZLIK FAOLIYATIDA
AXBOROT-TADBIQOT MARKAZI» MCHJ**

г.Ташкент, ул. Абай, 6
тел.: 244-83-13, 244-79-11

Тираж 50 экз.