

УДК 621.315.2 + 06

*Н. А. Попова, А. В. Бутенко, Р. К. Свиридов***КОМПЛЕКС РАСЧЕТОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ 6-10 кВ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И БУМУЖАНОЙ ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ¹**

Аннотация. В данной статье приводится комплекс расчетов кабелей 6-10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией, а также из сшитого полиэтилена. Приводятся расчетные формулы: для проверки кабелей по условиям термической стойкости при коротком замыкании; для выбора сечения медного экрана; для выбора сечения силовых кабелей по длительно допустимым токам фидеров (по потребляемой мощности); для проверки силовых кабелей при возникновении короткого замыкания на невозгораемость; подбор необходимого сечения силового кабеля путем оценки его экономической плотности тока. Приводятся ссылки на нормативные документы.

Ключевые слова: электроснабжение, кабели, КЛ, силовые кабели, 6 кВ, 10 кВ, расчет, изоляция из сшитого полиэтилена, бумажная пропитанная изоляция, термическая стойкость, невозгораемость, потребляемая мощность, экономическая плотность тока.

Для цитирования: Попова, Н. А. Комплекс расчетов силовых кабелей 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и бумажной пропитанной изоляцией / Н. А. Попова, А. В. Бутенко, Р. К. Свиридов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения – 2024. – № 1. – С. 37–41.

Для центрального аппарата и департаментов компании ОАО «РЖД» развитие высокоскоростного подвижного состава является одной из приоритетных задач. Компания стремится к улучшению и совершенствованию как вспомогательных, так и основных тяговых приводов, не только для уже существующих электроподвижных составов, но и для разрабатываемых. Так же немало важным является такое ключевое направления как разработка метода определения параметров электровозных электроприводов.

При коротком замыкании проводник считается термически стойким, если площадь его сечения S , мм², удовлетворяет условию неравенства (ГОСТ Р 52736-2007, п. 6.3.4):

$$S \geq S_{тер\ min}, \quad (1)$$

Зная тот факт, что нагрузка кабеля до короткого замыкания близка к продолжительно допустимой, а также, что он должен отвечать требованию термической стойкости при коротком замыкании, минимальное сечение проводника необходимо рассчитывать по следующей формуле (ГОСТ Р 52736-2007, п. 6.3.5, формула 64):

$$S_{тер.min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_{тер}}, \quad (2)$$

где B_k – степень термического воздействия на проводники тока короткого замыкания, определяемая с помощью интегралом Джоуля, А²·с (ГОСТ Р 52736-2007, п. 6.1.1, формула 36);

$C_{тер}$ – параметр, значения которого для кабелей сведены в таблицу 8 ГОСТ Р 52736-2007.

¹Статья рекомендована к публикации оргкомитетом по результатам 15-й юбилейной Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава».

Для прокладки приняты кабели 6-10 кВ с алюминиевыми и медными жилами, таким образом, согласно таблице 8 (ГОСТ Р 52736-2007), $S_{\text{тер}}$ алюминиевых жил составит $90 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$, для медных – $140 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$.

Значение B_k определяется:

$$B_k = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{kt}^2 \cdot dt, \quad (3)$$

где i_{kt} – ток короткого замыкания для произвольного момента времени t , А;
 $t_{\text{откл}}$ – расчетная продолжительность короткого замыкания в электроустановке, с.

Величина тока короткого замыкания i_{kt} обычно берется равной величине трехфазного короткого замыкания на шинах ПС.

Выбор сечения медного экрана для силовых кабелей 6-10 кВ с сшитой полиэтиленовой изоляцией

Медный экран для кабелей 6-10 кВ из сшитого полиэтилена выбирается по допустимым значениям тока КЗ в медных экранах кабеля. Чтобы выбрать экран необходимо проверить выполнение условия:

$$I_{\text{кз.расч}} \leq I_{\text{кз.доп.}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{кз.расч.}}$ – расчетный ток короткого замыкания в экране кабеля, кА;
 $I_{\text{кз.доп.}}$ – допустимый ток короткого замыкания в экране кабеля, кА.

Согласно СТО 56947007-29.060.20.020-2009 при выборе сечения экрана кабеля следует ориентироваться на большее из значений токов КЗ, поэтому обычно принимается в качестве расчетного тока КЗ – ток трехфазного короткого замыкания на шинах ПС.

Допустимый ток КЗ в экране кабеля выбирается исходя из допустимых значений токов односекундного КЗ по таблице 6 СТО 56947007-29.060.20.020-2009.

Предположим, что ранее рассчитанное время действия тока КЗ на ПС составляет $t_{\text{кз}} = 2,16 \text{ с}$, для того чтобы привести величину односекундного тока КЗ к этому времени, ее необходимо умножить на поправочный коэффициент K , который рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{1}{\sqrt{t_{\text{кз}}}}, \quad (5)$$

Расчетный эксплуатационный длительно допустимый ток определяется по выражению, А:

$$I_{\text{расч дл.доп}} = \frac{S_{\text{потреб.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{потреб.}}$ – суммарная мощность потребителей, запитанных через кабель, кВ·А;
 $U_{\text{ном.}}$ – номинальное напряжение сети, кВ.

Для расчета, в качестве номинального напряжения сети $U_{\text{ном.}}$, примем номинальное напряжение на шинах ПС в соответствии с ГОСТ 721-77, а именно 11 кВ.

Суммарные мощности потребителей $S_{\text{потреб.}}$, запитанных через кабель, принимаются по исходным данным.

Для суммарных мощностей потребителей $S_{\text{потреб.}}$ рассчитываются длительно допустимые токи по выражению (6).

Выбор сечения жил кабелей производится исходя из следующих принципов:

1) сечение жил кабелей принимается не ниже сечения, которое будет соответствовать условию термической стойкости;

2) при наличии существующих кабеле сечение жил кабелей принимается аналогично существующему и уточняется по результатам текущего расчета;

3) сечение жил кабелей выбирается из ряда стандартных сечений на основании расчета длительно допустимых токов по каждому фидеру с учетом нормативных значений длительно допустимых токовых нагрузок кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 6-10 кВ при прокладке в земле (по ГОСТ 18410-73 Приложение 1 таблица 3) и длительно допустимых токов трехжильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-10 кВ при прокладке в земле (по СТО 56947007-29.060.20.020-2009 таблица А5), с применением поправочного коэффициента на количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле (в трубах или без труб) по ПУЭ 7-е издание таблица 1.3.26.

Проверка силовых кабелей на невозгораемость при коротком замыкании

Несмотря на то, что кабель может быть одиночным или частью кабельной линии с имеющимися несколькими параллельно включенными кабелями, расчетную точку короткого замыкания при проверке силовых кабелей на невозгораемость от воздействия короткого замыкания необходимо выбирать в начале кабеля, согласно п. 6.4.1 ГОСТ Р 52736-2007.

В том случае если одиночный кабель обладает ступенчатым сечением по длине, расчетную точку короткого замыкания его участков следует брать в начале каждого участка кабеля с новым сечением.

Для того чтобы определить расчетную продолжительность короткого замыкания при проверке электрических аппаратов и кабелей на термическую стойкость, необходимо сложить время действия основной релейной защиты, в области которой находятся электрические аппараты и кабели, и времени полного отключения соответствующего автоматического выключателя, согласно с п. 4.1.5 ГОСТ Р 52736-2007. Так же следует принять во внимание суммарное термическое действие тока короткого замыкания, если в цепи присутствует устройство автоматического повторного включения (АПВ).

В качестве примера возьмем схему, показанную ранее: основная защита при коротких замыканиях срабатывает за 1 с, еще необходимо учесть время полного отключения автоматического выключателя равное 0,08 с, после срабатывания автоматического повторного включения, при повторном коротком замыкании, время срабатывания релейной защиты остается равным 1 с, с учетом полного времени отключения выключателя – 0,08 с. Таким образом, $t_{откл}$ принимается равным 2,16 с, это время соответствует времени суммарного термического действия тока короткого замыкания.

Чтобы осуществить проверку силового кабеля на невозгораемость при коротком замыкании, нужно определить конечную температуру нагрева жил ϑ_k при расчетной продолжительности короткого замыкания и сравнить ее с максимально допустимой температурой нагрева жил, по условию невозгораемости кабелей $\vartheta_{нв}$.

Для гарантии невозгораемости кабеля, необходимо и достаточно выполнение следующего условия (68) ГОСТ Р 52736-2007:

$$\vartheta_k \leq \vartheta_{нв}, \quad (7)$$

Для того чтобы определить конечную температуру нагрева жил проводника необходимо осуществить расчёт значение функции A_{ϑ_k} , которая соответствует конечной температуре нагрева проводника ϑ_k , по формуле (61) ГОСТ Р 52736-2007:

$$A_{\vartheta_k} = A_{\vartheta_k} + \frac{B_k}{S^2}, \quad (8)$$

где B_k – степень термического воздействия тока короткого замыкания на жилы проводников, определяемая интегралом Джоуля, $A_2 \cdot c$ (ГОСТ Р 52736-2007, п. 6.1.1, формула 36);

S – площадь поперечного сечения проводника, мм²;

A_{θ_n} – значение функции, находимое по начальной температуре проводника θ_n , $A \cdot c^2 / \text{мм}^4$.

В качестве исходной температуры проводника θ_n примем длительно допустимую температуру нагрева жил кабеля 6-10 кВ, для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией согласно ГОСТ 18410-73 таблица 18, θ_n составит 60°C, для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в соответствии с СТО 56947007-29.060.20.020-2009 таблица А5, θ_n составит 90°C.

Значение функции A_{θ_n} определяется по рисунку 19 ГОСТ Р 52736-2007, учитывая при этом начальную температуру жил проводника θ_n .

При нахождении значения функции A_{θ_n} для кабелей с алюминиевой жилой выберем кривую 4 рисунка 19 (АТ – алюминий твердый неотожженный) и кривую 2 рисунка 19 для медной жилы кабеля (МТ – медь твердая неотожженная).

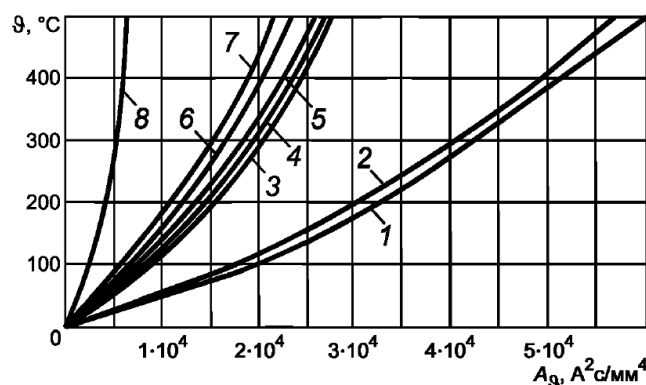


Рис. 1. График кривых для определения температуры нагрева проводов, кабелей и шин, различного материала при коротком замыкании:

1 – ММ; 2 – МТ; 3 – АМ; 4 – АТ; 5 – АДО, АСТ; 6 – АД31Т1; 7 – АД31Т; 8 – Ст3

Для того чтобы осуществить проверку сечения проводников по экономической плотности тока необходимо следующее выражение:

$$S \geq S_{\text{эк}}, \quad (9)$$

где S – сечение выбранного проводника, мм^2 ;
 $S_{\text{эк}}$ – сечение проводника по экономической плотности тока, мм^2 .

Сечение проводника по экономической плотности тока рассчитывается по выражению, мм^2 :

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{расч}}}{J_{\text{эк}}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{расч}}$ – расчетный ток проводника, А;
 $J_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм^2 .

В качестве расчетного тока принимается ток, рассчитанный в пункте 3. Экономическая плотность тока выбирается согласно данным ПУЭ 7-е издание таблица 1.3.36

Библиографический список

1. **Воронова, Н. П.** Определение параметров полупроводниковых терморезисторов системы пуска электрических двигателей / Н. П. Воронова, М. А. Трубицын // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 10(94). – С. 469–477. – EDN PCBBYT: 2073-8633

2. **Жарков, Ю. И.** Расчет токов короткого замыкания сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / Ю. И. Жарков, А. И. Осипова // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6(102). – С. 653–662. – EDN HQAERJ. ISSN: 2073-8633

3. Параметры совместных схем замещения систем внешнего и тягового электроснабжения при коротком замыкании в контактной сети / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Л. А. Герман [и др.] // Электрические станции. – 2021. – № 7(1080). – С. 20–26. – EDN NNSPHC. ISSN: 0201-4564

N. A. Popova, A. V. Butenko, R. K. Sviridov

COMPLEX FOR CALCULATING POWER CABLES 6-10 kV WITH INSULATION MADE OF CROSSLINKED POLYETHYLENE AND IMPREGNATED PAPER INSULATION

Abstract. In this article, a complex of calculations is presented for 6-10 kV cables with insulation made of crosslinked polyethylene and impregnated paper insulation. The article provides calculation formulas for: verifying cables under thermal resistance conditions during short-circuit, selecting the cross-section of the copper shield, selecting the cross-section of power cables based on permissible continuous currents of feeders (according to power consumption), verifying the fire resistance of power cables during short-circuit, and checking the cross-section of power cables based on economic current density. References to regulatory documents are also provided.

Keywords: power supply, cables; overhead power lines, power cables, 6 kV, 10 kV, calculation, crosslinked polyethylene insulation; impregnated paper insulation; thermal resistance; fire resistance; power consumption; economic current density.

For citation: Popova, N. A. Complex for calculating power cables 6-10 kV with insulation made of crosslinked polyethylene and impregnated paper insulation / N. A. Popova, A. V. Butenko, R. K. Sviridov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. – 2024. – № 1. – P. 37–41.

Сведения об авторах

Попова Наталья Андреевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», кандидат технических наук, доцент, e-mail: asel@rgups.ru

Бутенко Александр Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», аспирант, e-mail: ssbutenko@yandex.ru

Свиридов Роман Константинович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), студент, e-mail: roma.term0metr@yandex.ru

Information about the authors

Popova Natalia Andreevna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Automated Power Supply Systems», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: asel@rgups.ru

Butenko Alexander Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Automated Power Supply Systems», Graduate Student, e-mail: ssbutenko@yandex.ru

Sviridov Roma Konstantinovich

Rostov State Transport University (RSTU), student, e-mail: roma.term0metr@yandex.ru