

В. А. Осипов

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ТОКОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ ДЛЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЭКРАНИРУЮЩИМ ПРОВОДНИКОМ

Аннотация. Получены расчетные соотношения для определения величины тока в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, являющегося элементом тяговой сети с комбинированным экранирующим проводником. Цепь обратного тока электрифицированной железной дороги рассматривалась как линия с распределёнными параметрами, и при определении суммарного тока в металлической оболочке кабеля кроме тока, ответвляющегося из рельсового пути в оболочку волоконно-оптического кабеля, учитывались также токи, образованные в результате взаимной индуктивной связи металлической оболочки с контактной сетью и рельсовым путем. Полученные аналитические соотношения необходимы для принятия решения о термической стойкости волоконно-оптического кабеля к длительно протекающим рабочим токам при работе в составе тяговой сети переменного тока.

Ключевые слова: тяговая сеть, волоконно-оптический кабель, система с комбинированным экранирующим проводником, термическая стойкость.

Для цитирования: Осипов, В. А. Расчет рабочих токов волоконно-оптического кабеля для тяговой сети с комбинированным экранирующим проводником / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 214–222. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_214.

Введение

Комплексный подход к повышению энергоэффективности электрифицированных железных дорог переменного тока предполагает введение в качестве элемента тяговой сети металлической оболочки волоконно-оптического кабеля. Особенность таких кабелей заключается в возможности одновременно выполнять роль канала для передачи информации посредством оптической связи и быть проводником электрического тока. При протекании последнего, очевидно, возникают потери энергии, выделяемой в виде тепла на металлических элементах кабеля. В отличие от витых стальных и сталеалюминевых канатов у волоконно-оптического кабеля максимально допустимая температура значительно ниже, поэтому встает вопрос о необходимости расчета максимальных токов, протекающих в рабочем режиме в экранирующем проводнике, функцию которого выполняет волоконно-оптический кабель.

Основная часть

Для определения величины тока в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, выполняющего функцию обратного провода, предлагается изложенный ниже подход. Рассмотрим на первом этапе однопутный участок железной дороги переменного тока, заменим экранирующий проводник – кабель ОКГТ и две нитки рельса эквивалентным распределенным проводником. В расчете будем полагать, что рельсовая цепь и экран соединены параллельно в весьма большом числе мест (рис. 1).

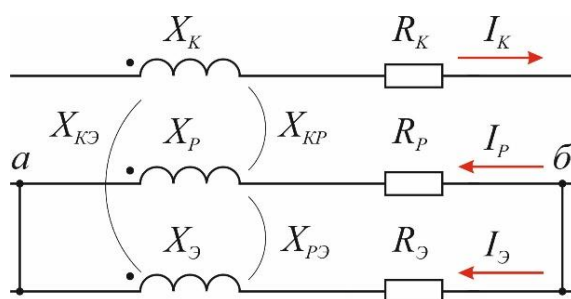


Рис. 1. Схема замещения элемента тяговой сети с комбинированным экранирующим проводником

Для участка тяговой сети, показанной на рис. 1, можно составить уравнение:

$$\dot{I}_P Z_P + \dot{I}_Э Z_{ЭP} - \dot{I}_K Z_{KP} = \dot{I}_Э Z_Э + \dot{I}_P Z_{ЭP} - \dot{I}_K Z_{KЭ}. \quad (1)$$

Учитывая, что ток в эквивалентном проводнике определяется как

$$\dot{I} = \dot{I}_P + \dot{I}_\Sigma, \quad (2)$$

перепишем уравнение (1):

$$\dot{I}_P (Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}) + \dot{I}_K (Z_{K\Sigma} - Z_{KP}) = \dot{I} (Z_\Sigma - Z_{\Sigma P}). \quad (3)$$

Ток в эквивалентном проводнике

$$\dot{I} = \dot{I}_P \frac{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}}{Z_\Sigma - Z_{\Sigma P}} + \dot{I}_K \frac{Z_{K\Sigma} - Z_{KP}}{Z_\Sigma - Z_{\Sigma P}}. \quad (4)$$

Ток в рельсе

$$\dot{I}_P = \frac{\dot{I} (Z_\Sigma - Z_{\Sigma P}) + \dot{I}_K (Z_{KP} - Z_{K\Sigma})}{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}}. \quad (5)$$

Ток в экране найдем согласно (2), вычитая из (4) выражение (5):

$$\dot{I}_\Sigma = \frac{\dot{I} (Z_P - Z_{\Sigma P}) + \dot{I}_K (Z_{K\Sigma} - Z_{KP})}{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}}. \quad (6)$$

Напряжение на концах участка $a - б$ определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{I}_P Z_P + \dot{I}_\Sigma Z_{\Sigma P} - \dot{I}_K Z_{KP}; \\ \dot{U}_{ab} &= \frac{\dot{I} (Z_\Sigma - Z_{\Sigma P}) (Z_P + Z_{\Sigma P}) + \dot{I}_K (Z_{KP} - Z_{K\Sigma}) (Z_P + Z_{\Sigma P})}{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}} - \dot{I}_K Z_{KP}. \end{aligned}$$

После преобразования получим

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I} \frac{Z_P Z_\Sigma - Z_{\Sigma P}^2}{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}} - \dot{I}_K \frac{Z_P Z_{K\Sigma} + Z_\Sigma Z_{\Sigma P} - Z_{\Sigma P} (Z_{K\Sigma} + Z_{KP})}{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}}. \quad (7)$$

В выражении (7) первое слагаемое – это падение напряжения, возникающее в эквивалентном проводнике вследствие протекания по нему эквивалентного тока I , второе слагаемое – это ЭДС взаимной индукции, наводимая в эквивалентном проводе током контактной сети I_K . Представив (7) в виде

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I} \cdot Z_{\text{экв}} - \dot{I}_K \cdot Z_M,$$

запишем выражения для расчета собственного сопротивления и сопротивления взаимной индукции для эквивалентного проводника:

$$Z_{\text{экв}} = r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} = \frac{Z_P Z_\Sigma - Z_{\Sigma P}^2}{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}}; \quad (8)$$

$$Z_M = j\omega M_{\text{экв}} = \frac{Z_P Z_{K\Sigma} + Z_\Sigma Z_{\Sigma P} - Z_{\Sigma P} (Z_{K\Sigma} + Z_{KP})}{Z_P + Z_\Sigma - 2 \cdot Z_{\Sigma P}}. \quad (9)$$

Используя подход, описанный в [1], запишем систему уравнений, где в качестве обратного провода используется эквивалентный проводник:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = i r_{\text{экв}} + L_{\text{экв}} \frac{\partial i}{\partial t} - M_{\text{экв}} \frac{\partial i_K}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = u g \end{cases}. \quad (10)$$

С учетом того, что ток и напряжения синусоидальны:

$$\begin{cases} -\frac{\partial \dot{U}}{\partial x} = \dot{I}r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} \dot{I} - j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K \\ -\frac{\partial \dot{I}}{\partial x} = \dot{U}g \end{cases}.$$

Перепишем второе уравнение, с учётом этого первое приобретает вид

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x^2} = g [\dot{I}r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} \dot{I} - j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K].$$

Введем обозначение

$$\gamma^2 = (r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}})g,$$

с учетом которого запишем

$$\frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x_2} - \dot{I}\gamma^2 = -j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K.$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения второй степени будем искать в виде общего и частного решения, где общее решение

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x_2} - \dot{I}\gamma^2 &= 0; \\ \dot{I} &= A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}. \end{aligned}$$

Для нахождения частного решения определим коэффициенты методом вариации произвольных постоянных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x_2} - \dot{I}\gamma^2 &= 0; \\ \dot{I} &= A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}; \\ \begin{cases} A_1' e^{-\gamma x} + A_2' e^{\gamma x} = 0; \\ -\gamma A_1' e^{-\gamma_0 x} + \gamma A_2' e^{\gamma x} = -j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K; \end{cases} \\ -A_1' e^{-\gamma x} &= A_2' e^{\gamma x}; \\ \gamma A_2' e^{\gamma x} + \gamma A_2' e^{\gamma x} &= -j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K; \\ A_2' &= \frac{-j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma} e^{-\gamma x}; \\ A_1' &= \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma} e^{\gamma x}. \end{aligned}$$

Интегрируя по расстоянию, получим:

$$A_1 = \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma^2} e^{\gamma x} + B_1; \quad A_2 = \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma^2} e^{-\gamma x} + B_2;$$

$$\dot{I} = B_1 e^{-\gamma x} + B_2 e^{\gamma x} + \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2};$$

$$\frac{\partial \dot{I}}{\partial x} = -\gamma B_1 e^{-\gamma x} + \gamma B_2 e^{\gamma x} = -\dot{U}g;$$

$$\frac{\dot{U}}{Z_C} = B_1 e^{-\gamma x} - B_2 e^{\gamma x}.$$

Обозначив напряжение и ток в начале линии как U_A и I_A и положив $x = 0$, получим

$$B_1 = \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right); \quad B_2 = \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A - \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right).$$

Подставив в уравнения

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{\gamma x} + \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \\ \frac{\dot{U}}{Z_C} &= \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{\gamma x} \end{aligned},$$

окончательно запишем:

$$\dot{I} = \left(\dot{I}_A - \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}} \right) \text{ch}(\gamma x) - \frac{\dot{U}_A}{Z_C} \text{sh}(\gamma x) + \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}}; \quad (11)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_A \cdot \text{ch}(\gamma x) - \left(\dot{I}_A \cdot Z_C - j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K \frac{Z_C}{Z_{\text{экв}}} \right) \text{sh}(\gamma x). \quad (12)$$

Применим принцип наложения и разделим ток, протекающий в эквивалентном проводнике, на компоненту, индуцированную полем контактной сети, и компоненту, обусловленную стеканием тока с ЭПС в рельс. Для определения граничных значений тока, протекающего в эквивалентном проводнике, в результате взаимной индуктивной связи с контактной сетью рассмотрим рис. 2, а. Здесь представлена расчетная схема участка железной дороги переменного тока.

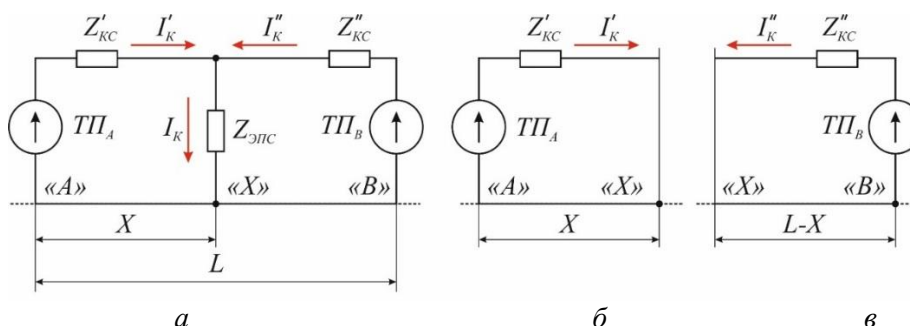


Рис. 2. Пояснение к расчету граничных параметров

Проводник обратного тока не ограничен участком «AB», а продолжается левее и правее рассматриваемого участка теоретически бесконечно далеко. Так как анализируется только индуцированная составляющая тока, заменим исходную схему на рис. 2, а двумя частными схемами – на рис. 2, б и 2, в. Для схемы на рис. 2, б справедливо утверждение, что

$$\dot{U}_A = -\dot{U}_X. \quad (13)$$

Учитывая, что входное сопротивление цепи обратного тока как линии с распределенными параметрами, одним проводником которой является эквивалентный провод, а другим земля, определяется выражением

$$Z_{BX} = \frac{Z \cdot Z_C + Z_C^2 \cdot th(\gamma x)}{Z + Z_C \cdot th(\gamma x)}, \quad (14)$$

и при условии, что цепь обратного тока слева и справа от рассматриваемого участка теоретически бесконечна $th(\gamma x) = 1$, следовательно, $Z_{BX} = Z_C$. Таким образом

$$\dot{U}_A = -\dot{I}_A \cdot Z_C. \quad (15)$$

Знак «минус» в (14) объясняется тем, что индуцированный ток в обратном проводнике направлен из точки «X» в точку «A», следовательно, в точке «A» ток стекает в землю из проводника, а в точке «X» направлен из земли в проводник. Подставим в (12) вместо переменной x координату «X», с учетом (13) получим

$$-\dot{U}_A = \dot{U}_A \cdot ch(\gamma X) - Z_C \left(\dot{I}_A - \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \right) sh(\gamma X).$$

Преобразуя выражение с учетом (13) и (15), получим

$$-\dot{U}_A = \dot{U}_A \cdot ch(\gamma X) + \dot{U}_A \cdot sh(\gamma X) + \dot{I}_K Z_C \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} sh(\gamma X).$$

Упрощая, получим

$$\dot{U}_A = -\dot{I}_K Z_C \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \frac{(e^{\gamma X} - e^{-\gamma X})}{(1 + e^{\gamma X})}.$$

Учитывая (15) и сделав ряд преобразований, получим

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \frac{e^{\gamma X} (1 - e^{-2\gamma X})}{e^{\gamma X} (e^{-\gamma X} + 1)} = \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \frac{(1 - e^{-\gamma X})(1 + e^{\gamma X})}{(1 + e^{-\gamma X})}; \\ \dot{I}_A &= \frac{1}{2} \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} (1 - e^{-\gamma X}). \end{aligned} \quad (16)$$

Используя соотношение (16), определим закон изменения индуцированной компоненты тока как функцию расстояния. Для этого используем выражения (11) и (15):

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \left(\dot{I}_A - \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}} \right) ch(\gamma x) + \dot{I}_A sh(\gamma x) + \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}}; \\ \dot{I} &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K (1 - ch(\gamma x)) + \dot{I}_A e^{\gamma x} \end{aligned}$$

Подставив в полученное выражение соотношение (16), получим

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K (1 - ch(\gamma x)) + \frac{1}{2} \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} (1 - e^{-\gamma X}) e^{\gamma x} = \\ &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{\gamma x} - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{-\gamma x} + \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{\gamma x} - \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} e^{\gamma x} e^{-\gamma X} = \\ &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{-\gamma x} - \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} e^{\gamma x} e^{-\gamma X}. \end{aligned}$$

Компонента тока, индуцированная в эквивалентном проводнике, определяется соотношением

$$\dot{I}_H = j\omega \dot{I}_K \frac{M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \left[1 - \frac{1}{2} (e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)}) \right]. \quad (17)$$

Для определения закона изменения токов, стекающих в эквивалентный проводник в точке приложения тяговой нагрузки, используем соотношения (11) и (12), отбросив в них компоненту, обусловленную магнитным влиянием на эквивалентный проводник поля контактной сети:

$$\dot{I} = \dot{I}_A \operatorname{ch}(\gamma x) - \frac{\dot{U}_A}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma x); \quad (18)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_A \operatorname{ch}(\gamma x) - \dot{I}_A Z_C \operatorname{sh}(\gamma x). \quad (19)$$

Учтем принятое допущение, что рельсовая цепь и экран, а следовательно, и эквивалентный проводник бесконечны в обе стороны. При этом тяговой ток, стекающий с ЭПС в рельсы, будет течь вправо и влево от места, где расположена нагрузка. Доли этого тока в общем случае будут равны между собой, так как входное сопротивление цепи обратного тока в обе стороны также будет одинаково и равно волновому сопротивлению $Z_{BX} = Z_C$. Ток в обратном проводнике вблизи тяговой подстанции, очевидно, будет равен току вблизи места приложения нагрузки, при этом вблизи нагрузки ток будет стекать из рельсов в землю, а вблизи подстанции, напротив, ток будет направлен из земли в рельсы.

С учетом сделанных замечаний напряжение, возникающее на эквивалентном проводнике обратного тока относительно идеальной земли около тяговой подстанции, и ток в эквивалентном проводе будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_A = \frac{1}{2} \dot{I}_K Z_C; \quad \dot{I}_A = \frac{1}{2} \dot{I}_K.$$

После подстановки в (18) получим уравнение, описывающее изменение тягового тока в эквивалентном проводнике, стекающего в него из земли:

$$\dot{I}_B = \frac{1}{2} \dot{I}_K \operatorname{ch}(\gamma x) - \frac{1}{2} \dot{I}_K \operatorname{sh}(\gamma x) = \frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma x}. \quad (20)$$

Пользуясь аналогичными рассуждениями, можно записать соотношение для тягового тока, стекающего из рельсов в землю. Запишем систему уравнений для эквивалентного проводника, полагая что известны ток и напряжения в месте приложения тяговой нагрузки:

$$\begin{cases} \dot{I} = \dot{I}_x \operatorname{ch}(\gamma x) + \frac{\dot{U}_x}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma x); \\ \dot{U} = \dot{U}_x \operatorname{ch}(\gamma x) + \dot{I}_x Z_C \operatorname{sh}(\gamma x). \end{cases} \quad (21)$$

Учитывая, что в системе (21) координата x отсчитывается от «конца линии», точки «X», т.е. от места приложения тяговой нагрузки, выполним замену таким образом, чтобы отчет шел от начала линии, от точки «А»:

$$\begin{cases} \dot{I} = \dot{I}_x \operatorname{ch}(\gamma(X-x)) + \frac{\dot{U}_x}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma(X-x)); \\ \dot{U} = \dot{U}_x \operatorname{ch}(\gamma(X-x)) + \dot{I}_x Z_C \operatorname{sh}(\gamma(X-x)). \end{cases} \quad (22)$$

В месте стекания тягового тока напряжение, возникающее на эквивалентном проводнике обратного тока относительно идеальной земли, и ток в эквивалентном проводе будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_x = -\frac{1}{2} \dot{I}_K Z_C; \quad \dot{I}_x = \frac{1}{2} \dot{I}_K. \quad (23)$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{2} \dot{I}_K \operatorname{ch}(\gamma(X-x)) - \frac{1}{2} \dot{I}_K Z_C \frac{1}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma(X-x)) = \frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma(X-x)}. \quad (24)$$

Полный ток в эквивалентном проводнике будет описываться соотношением

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_H + \dot{I}_B + \dot{I}_C; \\ \dot{I} &= \frac{1}{2} \dot{I}_K \left(\frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \left[2 - (e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)}) \right] + e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)} \right); \\ \dot{I} &= \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} + \frac{1}{2} \dot{I}_K \left(1 - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \right) (e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)}). \end{aligned} \quad (25)$$

Для расчета тока, протекающего непосредственно в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, следует воспользоваться ранее полученным выражением. Подставляя в (6) выражение (25), запишем соотношение для расчета тока:

$$\dot{I}_\partial = \dot{I}_K \left[\frac{Z_M}{Z_{\text{экв}}} + \frac{(Z_{K\partial} - Z_{KP})}{Z_P + Z_\partial - 2Z_{\partial P}} + \left(\frac{1}{2} - \frac{Z_M}{2Z_{\text{экв}}} \right) \frac{(Z_P - Z_{\partial P})}{Z_P + Z_\partial - 2Z_{\partial P}} (e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)}) \right]. \quad (26)$$

Здесь коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}})g}. \quad (27)$$

При расчете тока, протекающего в оболочке волоконно-оптического кабеля, следует учитывать тот факт, что, как было указано выше, ток стекает в землю с обеих сторон от места приложения тяговой нагрузки, аналогично обстоит ситуация и с током в месте, где ток возвращается в цепи отсоса подстанции. С учетом того что ток, возвращающийся в эквивалентный проводник левее тяговой подстанции «А», и ток, стекающий в землю правее точки «Х», будет направлен встречно току в рельсах на данном участке, в (20) и (24) следует поставить знак минус перед выражениями

$$\dot{I}_{B'} = -\frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma x}; \quad (28)$$

$$\dot{I}_{C'} = -\frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma(X-x)}. \quad (29)$$

Выводы

Величина тока в экранирующем проводнике является функцией нескольких переменных и может быть определена в результате расчета на имитационной модели с использованием выражения (26). Очевидно, что ток вдоль экранирующего проводника изменяется вследствие стекания его в землю вблизи нагрузки и возврата из земли вблизи питающего центра. Расчет процесса нагрева волоконно-оптического кабеля по усредненному результату расчета производить нецелесообразно, так как ток в различных сечениях будет неодинаков. Следует также принимать во внимание изменяющийся характер нагрузки. Все перечисленные факты позволяют утверждать, что расчет температуры нагрева оболочки кабеля целесообразно вести за весьма малые интервалы времени, с учетом начальных условий температуры, что возможно выполнить с использованием современных вычислительных средств.

Список литературы

- 1 Электротермическая деградация оптического кабеля на участках железных дорог переменного тока / Ю. И. Филиппов, Э. Е. Асс, Л. Е. Попов [и др.] // Lightwave Russian Edition. – 2006. – № 3. – С. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Оплавление диэлектрического оптического кабеля, подвешенного на железнодорожных опорах под действием электротермической деградации / И. Н. Чернов, В. И. Муратов, С. М. Куценко, С. А. Зеленов // Lightwave Russian Edition. – 2007. – № 2. – С. 34–35. – ISSN 0741-5834.

References

- 1 Electrothermal degradation of optical cable on AC railway sections. / Yu. I. Filippov, E. E. Ass, L. E. Popov [et al.] // Lightwave Russian Edition. – 2006. – No 3. – P. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Melting of dielectric optical cable suspended on railway supports under the influence of electrothermal degradation / I. N. Chernov, V. I. Muratov, S. M. Kutsenko, S. A. Zelenev // Lightwave Russian Edition. – 2007. – No 2. – P. 34–35. – ISSN 0741-5834.

3 Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения / В. А. Осипов, Г. Е. Соловьев, Е. В. Гороховский, А. А. Капкаев // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (дата обращения 27.11.2025).

4 **Гороховский, Е. В.** Условия электропроводимости самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные / Е. В. Гороховский // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (дата обращения 27.11.2025).

5 Каталог кабельной продукции ООО ТПК «БИЛМАРТ», КАБЕЛЬ-ИРКУТСК. – URL: https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel_okms_022_24_G652D_7kn-86525 (дата обращения 27.11.2025).

6 **Осипова, А. И.** Расчет токов короткого замыкания сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (дата обращения 27.11.2025).

7 Техника высоких напряжений / И. М. Боготенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов ; под общей редакцией профессора Г. С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. – ISBN 5-283-04757-1.

8 **Микаэльян, Е. Ю.** Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэльян, В. Н. Черных // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (дата обращения 27.11.2025).

9 **Лысенко, В. Г.** Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1. – С. 145–152. – ISSN 0201-727X.

10 **Безуглый, А. В.** Актуальные проблемы повышения энергетической эффективности в современных условиях / А. В. Безуглый, В. Н. Черных // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 16–19.

11 **Трубицин, М. А.** Продление срока службы электрооборудования / М. А. Трубицин // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 51–54.

3 Problems of electrothermal degradation of fiber-optic communication lines and promising directions for their solution / V. A. Osipov, G. E. Solovyov, E. V. Gorokhovskiy, A. A. Kapkaev // Engineering Journal of Don. – 2013. – № 1. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (date of access: 27.11.2025).

4 **Gorokhovskiy, E. V.** Conditions of electrical conductivity of a self-supporting fiber-optic cable. Experimental data / E. V. Gorokhovskiy // Engineering Journal of Don. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (date of access: 27.11.2025).

5 Catalog of cable products of LLC TPK "BIL-MART", KABEL-IRKUTSK. – URL: https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel_okms_022_24_G652D_7kn-86525 (date of access: 27.11.2025).

6 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of the DC network when using a two-level system of group grounding of supports / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // Engineering Journal of Don. – 2023. – № 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (date of access: 27.11.2025).

7 High voltage engineering / I. M. Bogotenkov, Yu. N. Bocharov, N. I. Gumerova, G. M. Imanov ; edited by Professor G. S. Kuchinsky. – Saint Petersburg : Energoatomizdat. St. Petersburg Branch, 2003. – 608 p. – ISBN 5-283-04757-1.

8 **Mikaelyan, E. Y.** Modeling of electromagnetic fields of an AC Railway Section / E. Y. Mikaelyan, V. N. Chernykh // Engineering Journal of Don. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (date of access: 27.11.2025).

9 **Lysenko, V. G.** Defining the boundaries of a traction network section with a stable short circuit / V. G. Lysenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1. – P. 145–152. – ISSN 0201-727X.

10 **Bezugly, A. V.** Actual problems of increasing energy efficiency in modern conditions / A. V. Bezugly, V. N. Chernykh // Collection of scientific papers «Transport : science, education, production». Volume 2. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2023. P. 16–19.

11 **Trubitsin, M. A.** Prolongation of the service life of electrical equipment / M. A. Trubitsin // Collection of scientific papers «Transport : science, education, production». Volume 3. Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2022. – P. 51–54.

*V. A. Osipov***CALCULATION OF OPERATING CURRENTS IN FIBER-OPTIC CABLES FOR A TRACTION NETWORK WITH A COMBINED SHIELDING CONDUCTOR**

Abstract. This paper describes the development of calculation relationships for determining the current in the metal sheath of a fiber-optic cable, which is a part of a traction network with a combined shielding conductor. The return current circuit of an electrified railway is considered as a line with distributed parameters. When determining the total current in the cable's metal sheath, in addition to the current branching from the track into the fiber-optic cable sheath, currents generated by the mutual inductive coupling of the metal sheath with the overhead contact system and the track are also taken into account. The obtained analytical relationships are necessary for determining the thermal stability of fiber-optic cables against long-term operating currents when used in AC traction networks.

Keywords: traction network, fiber-optic cable, system with a combined shielding conductor, thermal stability.

For citation: Osipov, V. A. Calculation of operating currents in fiber-optic cables for a traction networks with a combined shielding conductor / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 214–222. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_4_214.

Сведения об авторах**Осипов Владимир Александрович**

Ростовский государственный
университет путей сообщения
(РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
кандидат технических наук, доцент,
декан, заведующий кафедрой,
e-mail: dw_@rambler.ru

Information about the authors**Osipov Vladimir Alexandrovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Foundations of Electrical
Engineering”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Dean, Head of the Chair,
e-mail: dw_@rambler.ru