

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_28

*В. А. Осипов***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ,
ИНТЕГРИРОВАННЫХ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ЛИНИЯМИ СВЯЗИ**

Аннотация. Предложен подход для определения тока во всех элементах многопроводной тяговой сети, в состав которой входит волоконно-оптический кабель с металлической оболочкой. Рассмотрены методика расчета тока в экранирующем проводнике и способ определения сопротивления тяговой сети двухпутного участка железной дороги с учетом распределенного сопротивления проводника обратного тока. Полученные соотношения могут быть использованы при разработке методики расчета термической стойкости оптического кабеля к длительно протекающим тяговым токам, а также для расчета сопротивления тяговой сети при проектировании новых и модернизации существующих участков железной дороги переменного тока.

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

Для цитирования: Осипов, В. А. Определение электрических параметров тяговых сетей, интегрированных с волоконно-оптическими линиями связи / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_28.

Введение

Тяговые сети однофазного переменного тока промышленной частоты обладают весьма существенным реактивным сопротивлением, имеющим индуктивный характер. Это объясняется тем, что в силу конструктивных особенностей такая линия электропередачи состоит из проводников прямого и обратного тока, разнесенных в пространстве на значительное расстояние. Так как прямой проводник представлен контактной сетью, а обратный – рельсовым путем, непосредственно сблизить эти проводники не представляется возможным. При этом именно величиной индуктивной компоненты сопротивления тяговой сети определяется уровень напряжения на пантографе электровоза, что определяет пропускную способность участка при максимальных нагрузках. Для решения данной проблемы был разработан ряд технических решений, позволяющих уменьшить величину реактивной составляющей сопротивления тяговой сети, а именно предложены и внедрены тяговые сети с коаксиальным усиливающим фидером, тяговые сети с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП), тяговые сети с экранирующим проводом (ЭП). Все перечисленные решения позволяли с разной степенью эффективности решить проблемы снижения реактивного сопротивления тяговой сети, однако общим недостатком этих решений была необходимость прокладки дополнительных питающих и заземленных проводов на опорах контактной сети вдоль всей трассы железной дороги. Сложность подбора коаксиального кабеля в системе с коаксиальным усиливающим фидером и необходимость значительного увеличения расхода цветного металла при сооружении участка железной дороги в системе с ЭУП и в системе с ЭП в некоторой мере ограничили использование перечисленных типов энергоэффективных тяговых сетей.

Основная часть

Прокладка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) по опорам контактной сети, при условии, что эти линии сооружаются с использованием кабелей с металлической оболочкой, открывает возможность использования проводящей оболочки ВОЛС в качестве экранирующего проводника как в системе с ЭУП, так и в системе с ЭП. Так как для реализации тяговой сети с ЭУП необходима прокладка двух дополнительных проводников, при наличии на участке дороги волоконно-оптической линии связи, выполненной кабелем типа ОКГТ, следует рассмотреть возможность использования проводящей оболочки ВОЛС. При этом необходимо оценить возможность включения оптоволоконного кабеля в систему тягового электроснабжения в качестве экранирующего провода – дополнительного проводника обратного тока. Применение волоконно-оптического кабеля как элемента системы тягового электроснабжения позволяет говорить о его двойном назначении и создать тяговую сеть, обладающую новым функционалом. Экранирующий провод в данном случае будет совмещать в себе функции проводника обратного тока и волоконно-оптической линии связи, – будем называть его комбинированным

экранирующим проводом (КЭП). Для практического применения тяговой сети с КЭП необходимо решить следующие задачи:

– определение сопротивления тяговой сети, включающей в себя обратный проводник, в качестве которого выступает проводящая оболочка ВОЛС, так как стандартные типы проводов, используемых на электрифицированных железных дорогах, имеют электрические параметры, отличные от параметров кабелей ВОЛС;

– определение граничных условий работы оптоволоконного кабеля по критерию нагрева его рабочими токами и токами короткого замыкания, так как в отличие от применяемых типов дополнительных проводов (А-185, А-150 и т. д.) волоконно-оптический кабель чувствителен к длительному протеканию токов, вызывающих его нагрев выше критически допустимой температуры;

– разработка рекомендаций по подвеске оптоволоконного кабеля на опорах контактной сети с учетом особенностей эксплуатации волоконно-оптической линии связи и соблюдения требований по обеспечению электробезопасности при ее обслуживании.

Для определения величины тока в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, выполняющего функцию обратного провода, предлагается изложенный ниже подход. Рассмотрим алгоритм расчета токораспределения в тяговой сети двухпутного участка тяговой сети с комбинированным экранирующим проводом. Положим, что на участке принято раздельное питание путей, и волоконно-оптический кабель завешен на опорах обоих путей с полевой стороны. Будем считать, что контактные подвески и рельсовые цепи обоих путей участка идентичны, при этом все габариты проводников первого и второго пути, включая экранирующие проводники, одинаковы.

Модель участка железной дороги, для которой выполняется анализ, показана на рис. 1. Питающие и заземленные проводники первого пути имеют индекс «1», второго пути – «2». Используя геометрию участка, приведенного на рис. 1, можно составить соотношения для определения взаимных расстояний между расчетными элементами двух путей (все переменные, упомянутые в выражениях приведены согласно рис. 1):

– эквивалентным контактному проводом одного и экранирующим проводом другого пути $a_{кЭО}$:

$$a_{кЭО} = \sqrt{(d_k + d_{к12} + d_э)^2 + (h_э - h_k - h_H)^2}; \quad (1)$$

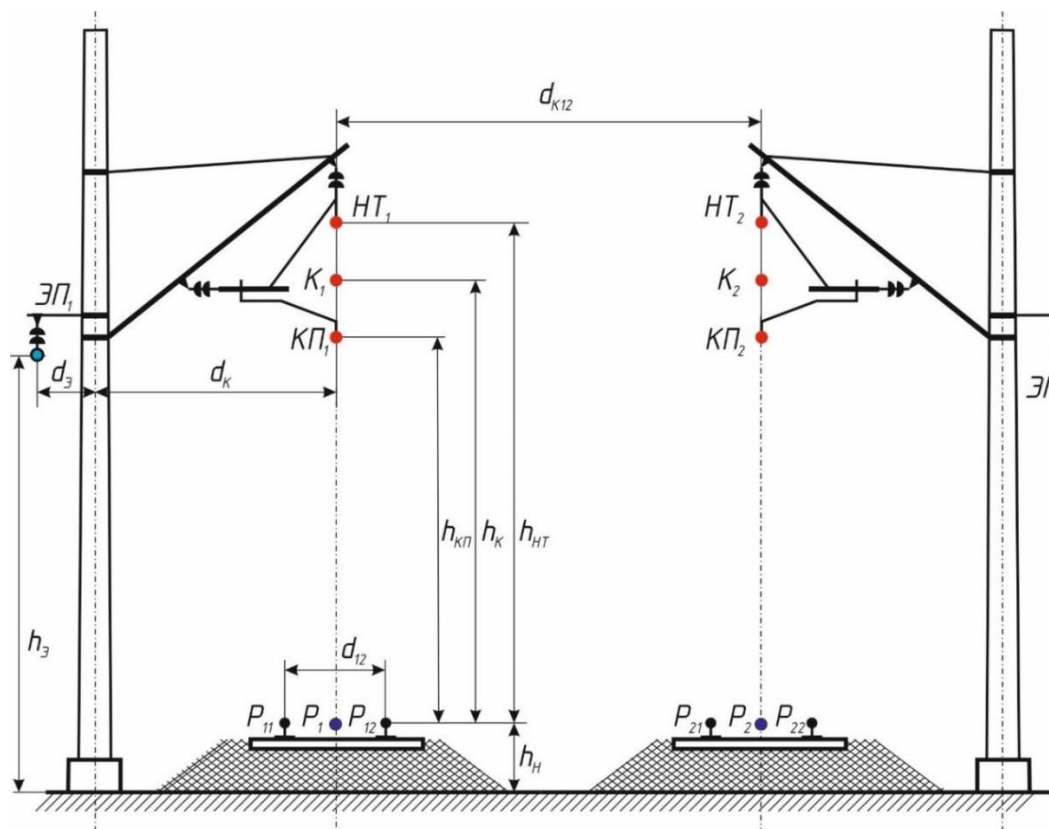


Рис. 1. Принятые обозначения для расчета сопротивления тяговой сети двухпутного участка

– эквивалентным рельсом одного и экранирующим проводом другого пути $a_{PЭO}$:

$$a_{PЭO} = \sqrt{(d_K + d_{K12} + d_Э)^2 + (h_Э - h_H)^2}; \quad (2)$$

– эквивалентным контактным проводом одного и эквивалентным рельсом другого пути a_{KPO} :

$$a_{KPO} = \sqrt{d_{K12}^2 + h_K^2}; \quad (3)$$

– экранирующими проводниками первого и второго пути $a_{Э12}$:

$$a_{Э12} = 2d_Э + 2d_K + d_{K12}.$$

В рассуждениях будем полагать что весь ток в рельсах и экранирующих проводниках носит чисто индуцированный характер. Выполним преобразование сопротивления рельсов и экранирующих проводников обоих путей к эквивалентному сопротивлению проводника обратного тока. Для этого используем на первом этапе подход по преобразованию рельсов двух путей к одному эквивалентному рельсу, обозначив в дальнейших рассуждениях его сопротивление как Z_P . Сопротивление взаимной индукции между экранирующими проводниками обозначим как $Z_{Э1Э2}$. Сопротивление взаимной индукции зависит непосредственно от расстояний между проводниками, для дальнейших рассуждений введем следующие обозначения:

$$Z_{PЭ} = Z_{PЭ_2} = Z_{PЭ_1}.$$

На рис. 2 представлен элемент тяговой сети, где четыре нитки рельса заменены одним эквивалентным рельсом, а также с двух сторон участка завешена волоконно-оптическая линия связи.

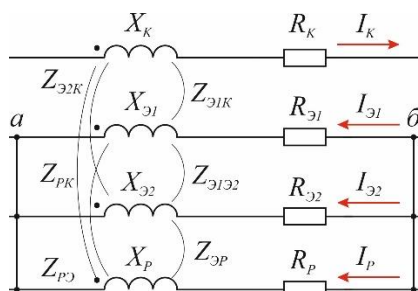


Рис. 2. К расчету параметров эквивалентного проводника обратного тока

Для малого элемента тяговой сети двухпутного участка, показанного на рис. 2, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} = \dot{I}_{Э1}Z_{Э1} + \dot{I}_{Э2}Z_{Э1Э2} + \dot{I}_P Z_{PЭ} - \dot{I}_K Z_{Э1К}, \\ \dot{U}_{ab} = \dot{I}_{Э2}Z_{Э2} + \dot{I}_{Э1}Z_{Э1Э2} + \dot{I}_P Z_{PЭ} - \dot{I}_K Z_{Э2К}, \\ \dot{U}_{ab} = \dot{I}_{Э1}Z_{PЭ} + \dot{I}_{Э2}Z_{PЭ} + \dot{I}_P Z_P - \dot{I}_K Z_{PK}. \end{cases} \quad (4)$$

Учитывая, что цепь обратного тока в данной схеме представлена эквивалентным рельсом с параллельно подключенными к нему двумя экранирующими проводниками, функцию которых выполняет проводящая оболочка ВОЛС, обозначим ток, протекающий в эквивалентном проводнике обратного тока, как

$$\dot{I} = \dot{I}_{Э1} + \dot{I}_{Э2} + \dot{I}_P. \quad (5)$$

С учетом (5) перепишем (4):

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} + \dot{I}_K Z_{Э1К} = \dot{I}_{Э1} (Z_{Э1} - Z_{ЭP}) + \dot{I}_{Э2} (Z_{Э1Э2} - Z_{ЭP}) + \dot{I} Z_{ЭP}, \\ \dot{U}_{ab} + \dot{I}_K Z_{Э2К} = \dot{I}_{Э2} (Z_{Э2} - Z_{ЭP}) + \dot{I}_{Э1} (Z_{Э1Э2} - Z_{ЭP}) + \dot{I} Z_{ЭP}, \\ \dot{U}_{ab} + \dot{I}_K Z_{PK} = \dot{I}_{Э1} (Z_{PЭ} - Z_P) + \dot{I}_{Э2} (Z_{PЭ} - Z_P) + \dot{I} Z_P. \end{cases} \quad (6)$$

Вычитая из первого уравнения (6) второе, получим:

$$\dot{i}_K(Z_{\text{Э1К}} - Z_{\text{Э2К}}) = \dot{i}_{\text{Э1}}(Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э1Э2}}) + \dot{i}_{\text{Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э2}}).$$

Выразим ток в экранирующих проводах:

$$\dot{i}_{\text{Э1}} = \frac{\dot{i}_K(Z_{\text{Э1К}} - Z_{\text{Э2К}}) + \dot{i}_{\text{Э2}}(Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{Э1Э2}})}{(Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э1Э2}})}; \quad (7)$$

$$\dot{i}_{\text{Э2}} = \frac{\dot{i}_K(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{Э1К}}) + \dot{i}_{\text{Э1}}(Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э1Э2}})}{(Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{Э1Э2}})}. \quad (8)$$

Вычитая из второго уравнения (6) третье, получим:

$$\dot{i}_K(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}}) + \dot{i}(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}}) = \dot{i}_{\text{Э1}}(Z_{\text{Э1Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) + \dot{i}_{\text{Э2}}(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}).$$

Подставляя в полученное выражение соотношение (6), получим:

$$\dot{i}_{\text{Э1}} = A_1 \dot{i}_K + A_2 \dot{i}; \quad (9)$$

$$\dot{i}_{\text{Э2}} = A_3 \dot{i}_K + A_4 \dot{i}. \quad (10)$$

Ток в рельсах определим из соотношения:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{\text{П}} &= \dot{i}_{\text{Э1}} \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} + \dot{i}_{\text{Э2}} \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} - \dot{i}_K \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})}, \\ \dot{i}_{\text{П}} &= (A_1 \dot{i}_K + A_2 \dot{i}) \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} + (A_3 \dot{i}_K + A_4 \dot{i}) \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} - \dot{i}_K \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})}. \end{aligned} \quad (11)$$

В этих выражениях безразмерные коэффициенты «А»:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{Z_{\text{Э1К}}(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) - Z_{\text{Э2К}}(Z_{\text{Э1Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) + Z_{\text{ПК}}(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э2}})}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}; \\ A_2 &= \frac{Z_{\text{П}}Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{П}}Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э1Э2}}}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}; \\ A_3 &= \frac{Z_{\text{Э2К}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) - Z_{\text{Э1К}}(Z_{\text{Э1Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) + Z_{\text{ПК}}(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}})}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}; \\ A_4 &= \frac{Z_{\text{П}}Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{П}}Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э1Э2}}}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для определения составляющих эквивалентного сопротивления цепи обратного тока используем первое выражение системы уравнений (4). После подстановки в него соотношений (9)–(11) и ряда преобразований выражение для расчета падения напряжения на эквивалентном проводнике будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{аб}} &= \dot{i} \left(Z_{\text{Э1}}A_2 + Z_{\text{Э1Э2}}A_4 + A_2 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_4 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} \right) + \\ &+ \dot{i}_K \left(Z_{\text{Э1}}A_1 + Z_{\text{Э1Э2}}A_3 + A_1 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_3 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - Z_{\text{Э1К}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Первое слагаемое в полученном выражении (13) – это падение напряжения на собственном сопротивлении проводника обратного тока, второе слагаемое – результат взаимоиндуктивного влияния токов в контактной подвеске:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{до}} &= \dot{i} \cdot Z_{\text{экв}} + \dot{i}_{\text{к}} \cdot Z_{\text{М}}; \\ Z_{\text{экв}} &= Z_{\text{Э1}} A_2 + Z_{\text{Э1Э2}} A_4 + A_2 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_4 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}}; \\ Z_{\text{М}} &= Z_{\text{Э1}} A_1 + Z_{\text{Э1Э2}} A_3 + A_1 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_3 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - Z_{\text{Э1К}}. \end{aligned}$$

Таким образом, рассчитаны параметры проводника обратного тока, эквивалентного двум эквивалентным экранирующим проводникам и четырем ниткам рельсов двухпутного участка железной дороги. Используя эти данные, применим выражение:

$$\dot{i} = \dot{i}_{\text{к}} \frac{Z_{\text{М}}}{Z_{\text{экв}}} + \frac{1}{2} \dot{i}_{\text{к}} \left(1 - \frac{Z_{\text{М}}}{Z_{\text{экв}}} \right) \left(e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)} \right). \quad (14)$$

Задавшись расстоянием от тяговой подстанции до местоположения нагрузки – X , можно построить зависимость изменения тока в эквивалентном проводнике как функцию расстояния от тяговой подстанции до нагрузки, с учетом влияния земли. Далее, используя (9) или (10), определить долю тока, протекающего в волоконно-оптическом кабеле, с учетом изменения величины тока по расстоянию. Эта характеристика необходима для определения термической стойкости оптических волокон ВОЛС к температурам нагрева тяговым током. Определение результирующего профиля тока в экранирующих проводниках несложно произвести, используя принцип и метод наложения, так как все влияющие на данный процесс функции – линейны, а следовательно, метод наложения в данном случае применим.

Вернемся к вопросу определения величины сопротивления тяговой сети с ВОЛС. Так как исследуется двухпутный участок, очевидно, в цепи обратного тока будет протекать эквивалентный ток, определяемый нагрузкой обоих путей. Используя принцип наложения, ток в экранирующих проводниках с учетом (9)–(11) будем определять как:

$$\dot{i}_{\text{Э1}} = A_1 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) + A_2 (\dot{i}' + \dot{i}''); \quad (15)$$

$$\dot{i}_{\text{Э2}} = A_3 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) + A_4 (\dot{i}' + \dot{i}''); \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{\text{П}} &= \left(A_1 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) + A_2 (\dot{i}' + \dot{i}'') \right) \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} - (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} + \\ &+ \left(A_3 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) \dot{i}''_{\text{к}} + A_4 (\dot{i}' + \dot{i}'') \right) \frac{(Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})}. \end{aligned} \quad (17)$$

В этих выражениях токи с одним штрихом относятся к первому пути, а с двумя – ко второму. Падение напряжения в контуре, образованном контактным проводом и рельсом, определяется выражением:

$$\Delta U = \dot{i}'_{\text{к}} Z_{\text{К}} + \dot{i}''_{\text{к}} Z_{\text{К12}} - \dot{i}_{\text{П}} Z_{\text{КП}} - \dot{i}_{\text{Э1}} Z_{\text{КЭ}} - \dot{i}_{\text{Э2}} Z_{\text{КЭ}} + \dot{i}_{\text{П}} Z_{\text{П}} + \dot{i}_{\text{Э1}} Z_{\text{ПЭ}} + \dot{i}_{\text{Э2}} Z_{\text{ПЭ}} - \dot{i}_{\text{К}} Z_{\text{КР}}.$$

После преобразования с учетом

$$\dot{i} = \dot{i}' + \dot{i}''$$

запишем соотношение:

$$\Delta U = \dot{i}'_{\text{к}} (Z_{\text{К}} - Z_{\text{КР}}) + \dot{i}''_{\text{к}} Z_{\text{К12}} + \dot{i} (Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}) - (\dot{i}_{\text{Э1}} + \dot{i}_{\text{Э2}}) (Z_{\text{КЭ}} - Z_{\text{ПЭ}} + Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}). \quad (18)$$

Для определения эквивалентного сопротивления тяговой сети разделим обе части выражения (18) на ток, протекающий в тяговой сети, этот ток равен току контактной сети расчетного пути:

$$Z = Z_{\text{К}} - Z_{\text{КР}} + \frac{\dot{i}''_{\text{к}}}{\dot{i}'_{\text{к}}} Z_{\text{К12}} + \frac{\dot{i}}{\dot{i}'_{\text{к}}} (Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}) - \left(\frac{\dot{i}_{\text{Э1}} + \dot{i}_{\text{Э2}}}{\dot{i}'_{\text{к}}} \right) (Z_{\text{КЭ}} - Z_{\text{ПЭ}} + Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}). \quad (19)$$

Отношение токов контактных подвесок обоих путей заменим расчетным коэффициентом:

$$\beta = \frac{i''_K}{i'_K}.$$

Равенство этого коэффициента единице означает равенство токов обоих путей по величине и направлению. Если токи путей равны, но направлены встречно, то этот коэффициент равен минус единице, и если ток второго пути отсутствует, то коэффициент равен нулю. Учтем также, что:

$$\frac{i_{\Sigma 1}}{i'_K} = A_1(1+\beta) + A_2(1+\beta) = (A_1 + A_2)(1+\beta),$$

$$\frac{i_{\Sigma 2}}{i'_K} = A_3(1+\beta) + A_4(1+\beta) = (A_3 + A_4)(1+\beta).$$

Окончательно запишем:

$$Z = Z_K - Z_{KP} + \beta Z_{K12} - \left((1+\beta) \sum_{K=1}^4 A_K \right) (Z_{KЭ} - Z_{PЭ} + Z_P - Z_{KP}) + \left(\frac{Z_M}{Z_{ЭКВ}} + \left(\frac{1}{2} - \frac{Z_M}{2Z_{ЭКВ}} \right) (e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)}) \right) (Z_P - Z_{KP}).$$

Полученное выражение позволяет выполнить расчет эквивалентного сопротивления одного пути участка тяговой сети с экранирующим проводом. Для расчета сопротивления смежного пути, при условии, что параметры контактной сети или ВОЛС иные, следует поменять местами переменные с одним и двумя штрихами.

Выводы

Предлагаемый в работе подход к определению величины токов волоконно-оптического кабеля позволяет использовать принцип наложения при моделировании результирующей токовой нагрузки на ВОЛС. Реализация данного подхода при использовании вычислительной техники позволит упростить задачу имитационного моделирования процесса работы элементов системы электроснабжения участка железной дороги переменного тока, проводимую в том числе с целью проверки термической стойкости волоконно-оптического кабеля к протеканию тяговых токов, с учетом нестационарного процесса нагрева элементов тяговой сети и непосредственно ВОЛС.

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. Зеленев // Lightwave Russian Edition. – 2007. – № 2. – С. 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 27.02.2026).
- 4 **Гороховский, Е. В.** Условия электропроводности самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные / Е. В. Гороховский // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (дата обращения 27.02.2026).

References

- 1 Electrothermal degradation of optical cable on AC railway section / A. S. Bochev, V. A. Osipov, G. E. Solovyev [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 Problems of electrothermal degradation of fiber-optic communication lines and promising directions for their solution. – Text: electronic / V. A. Osipov, G. E. Solovyov, E. V. Gorokhovskiy, A. A. Kapkaev // Engineering Journal of Don. – 2013. – No. 1. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (date of access: 27.02.2026).
- 4 **Gorokhovskiy, E. V.** Conditions of electrical conductivity of self-supporting fiber-optic cable. Experimental data. – Text: electronic / E. V. Gorokhovskiy // Engineering Journal of Don. – 2013. – No. 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (date of access: 27.02.2026).

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 27.02.2026).

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 27.02.2026).

7 Техника высоких напряжений / И. М. Богатенков, 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 27.02.2026).

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.

5 Catalog of cable products of LLC TPK “BILMART”, KABEL-IRKUTSK. – URL: https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel_okms_022_24_G652D_7kn-86525 (date of access: 27.02.2026).

6 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of the DC network when using a two-level system of group grounding system of supports. – Text : electronic / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // Engineering Journal of Don. – 2023. – No. 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (date of access: 27.02.2026).

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

8 **Mikaelyan, E. Yu.** Modeling of electromagnetic fields of an AC Railway Section. – Text : electronic / E. Yu. Mikaelyan, V. N. Chernykh // Engineering Journal of Don. – 2019. – No. 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (date of access: 27.02.2026).

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 // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.

11 **Trubitsin, M. A.** Prolongation of the service life of electrical equipment / M. A. Trubitsin // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – P. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.

V. A. Osipov

DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF TRACTION NETWORKS INTEGRATED WITH FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES

Abstract. An approach is proposed for determining the current in all elements of a multi-wire traction network, which includes a fiber-optic cable with a metal sheath. A method for calculating the current in the shielding conductor is examined as well as a method for determining the traction network resistance of a double-track railway section, taking into account the distributed resistance of the return conductor. The resulting relationships can be used in

developing a method for calculating the thermal withstand of optical cables to long-term traction currents, as well as for calculating traction network resistance when designing new and upgrading existing AC railway sections.

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

For citation: Osipov, V. A. Determination of electrical parameters of traction networks integrated with fiber-optic communication lines / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 28–35. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_1_28.

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