

Повышение надежности систем автоматического управления передачей данных путем оптимизации волоконно-оптических линий связи

А.В. Безуглый, В.Н. Черных

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Волоконно-оптические линии передачи данных (ВОЛС) являются одной из основных частей автоматизированной системы управления передачей данных, которая управляет технологическими процессами перевозок на железнодорожном транспорте. Линии подвержены мощным электромагнитным влияниям со стороны системы тягового электроснабжения. Повышение надежности всей системы путем уменьшения электромагнитного воздействия и оптимального выбора расположения ВОЛС представляет сложную и актуальную задачу, решение которой позволит значительно повысить надежность и эффективность работы всего автоматизированного комплекса.

Ключевые слова: Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС), автоматизированная система, электромагнитное влияние, система уравнений.

В современных условиях эксплуатации, при всё нарастающем потоке грузоперевозок на железнодорожном транспорте, соответственно возрастает поток информации, передачей которого управляет автоматизированная система управления передачей данных. Надежность работы всего комплекса системы в большой степени зависит от скорости, надежности и достоверности передачи данных, которые передаются по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), располагающимся на опорах контактной сети. При таком расположении ВОЛС она подвергается мощным электромагнитным воздействиям со стороны системы тягового электроснабжения [1, 2], что негативно сказывается на показателях надёжности. Повышение показателей надёжности автоматизированной системы передачи данных путем оптимизации параметров всего комплекса оборудования на сегодняшний день является актуальной задачей («Инструкция по технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи железнодорожного транспорта (ВОЛП ЖТ)» от 04.07.2001 № ЦИС-ЦЭ-842, «Инструкция по организации аварийно-восстановительных работ на железных дорогах РФ» утв. МПС РФ 13.12.1995 г. №ЦРБ-353).

В простейшем случае взаимное расположение проводников системы тягового электроснабжения и ВОЛС можно рассматривать как сближение провода ВОЛС с одним проводом [3], находящимся под напряжением U_k , по которому протекает ток I_k (рис. 1). По краям пролета ВОЛС заземлен через некоторые сопротивления R_{on} , представляющие собой суммарные сопротивления поддерживающего зажима, кронштейна и тела опоры, а также переходные сопротивления между ними.

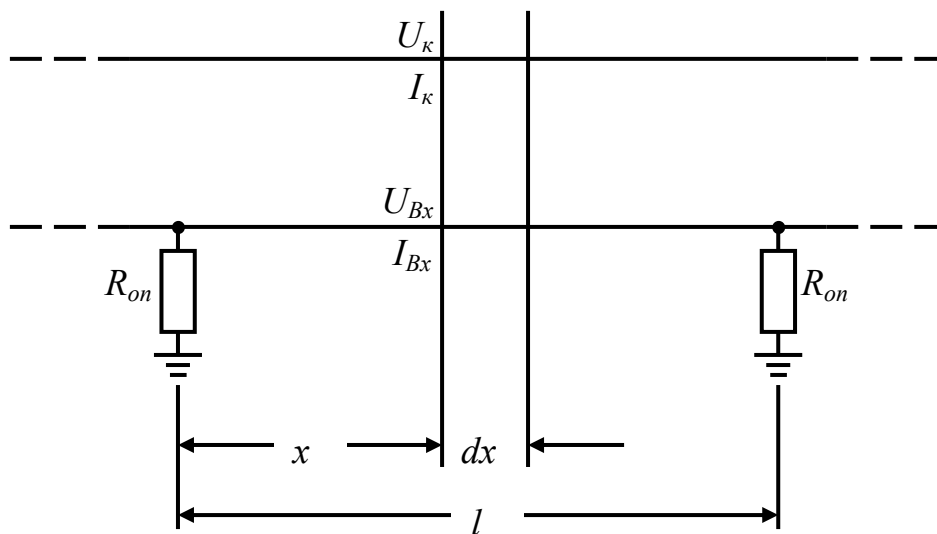


Рис.1 – Схема пролета ВОЛС

При этом на элементе ВОЛС длиной dx индуцируются напряжение и некоторый ток [4]. После интегрирования полученных дифференциальных уравнений получим следующие выражения для индуцированных напряжения и тока в точке пролета с координатой x

$$\begin{cases} \dot{U}_{Bx} = Ae^{jx} + Be^{-jx} + k_2 \dot{U}_k \\ \dot{I}_{Bx} = -\frac{1}{Z_C} (Ae^{jx} - Be^{-jx}) - k_1 \dot{I}_k \end{cases} \quad (1)$$

где A и B – постоянные интегрирования, коэффициент

$$k_1 = \frac{Z_{\kappa B}}{Z_{\text{прод}}} = \frac{j\omega M_{\kappa B}}{R + j\omega L} \approx \frac{j\omega M_{\kappa B}}{R} = \frac{\omega M_{\kappa B}}{R} \cdot e^{j90^\circ} - \text{коэффициент взаимоиנדукции}$$

между системой высоковольтных проводов и ВОЛС, коэффициент

$$k_2 = \frac{y_{\kappa B}}{y_{\text{noner}}}.$$

$y_{\kappa B}$ и y_{noner} являются полными проводимостями утечки соответственно между ВОЛС и высоковольтными проводами системы тягового электроснабжения и между ВОЛС и землей.

Так как величина ωM практически не превышает 0,5 Ом/км (при частоте 50 Гц), то при любом возможном значении R величина k_1 пренебрежимо мала, так как $\omega M_{\kappa B} \ll R$.

В виду малого значения, величиной активной проводимости утечки по длине пролета можно пренебречь и учитывать лишь емкостные проводимости. При этом

$$k_2 = \frac{C_{\kappa B}}{C_{\kappa B} + C_{B0}}, \quad (2)$$

где $C_{\kappa B}$ – частичная емкость ВОЛС по отношению к системе высоковольтных проводов; C_{B0} – емкость ВОЛС по отношению к земле.

При малой ширине сближения с высоковольтными проводами и при наличии нескольких высоковольтных проводов величина k_2 возрастает, в пределе приближаясь к 1.

Таким образом, в приведенной системе уравнений (1) определяющим является первое уравнение, а в нем наибольшее значение имеет последнее слагаемое. Следовательно, систему уравнений приближенно можно заменить простым соотношением

$$\dot{U}_{Bx} \cong k_2 \dot{U}_{\kappa} = \frac{C_{\kappa B}}{C_{\kappa B} + C_{B0}} \cdot \dot{U}_{\kappa}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что для снижения напряжения, индуцированного на ВОЛС \dot{U}_{Bx} необходимо снижать величину $C_{\kappa B}$ и увеличивать C_{B0} . Для

снижения величины $C_{кВ}$ необходимо, по возможности, увеличивать расстояния от ВОЛС до высоковольтных проводов тяговой сети.

Для увеличения $C_{В0}$ необходимо снижать высоту подвески ВОЛС. В пределе, при снижении этой высоты до 0 (прокладка в траншее) величина k_2 и, соответственно, величина $U_{Вх}$ снижаются до 0.

Анализ электрических параметров участка ВОЛС, находящегося между двумя точками подвеса на опорах контактной сети однозначно показывает, что ввиду неидеальности поверхности волоконно-оптического кабеля он будет подвержен влиянию поверхностных токов утечки [5, 6, 7]. Волоконно-оптический кабель соединяется с заземленными объектами через сопротивление поддерживающего зажима, кронштейна, тела опоры и заземляющего спуска. При неизменном значении поверхностного сопротивления и одинаковом сопротивлении опор распределение токов в пролете будет симметрично относительно середины пролета [8]. Поэтому рассматривая половину пролета можно заключить, что ток в любой точке ВОЛС с координатой x будет равен $i(l_1 - x)$. Тогда для точки x могут быть записаны следующие дифференциальные уравнения

$$\begin{cases} \frac{dI_x}{dx} = -\left(\frac{U_x}{Z_1} - i\right), \\ \frac{dU_x}{dx} = -I_x Z_0 \end{cases}, \quad (4)$$

где Z_1 – переходное емкостное сопротивление утечки, Z_0 – продольное активное поверхностное сопротивление.

Решая эту систему дифференциальных уравнений (4), получим

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = -\frac{dI_x}{dx} \cdot Z_0 = \left(\frac{U_x}{Z_1} - i\right) Z_0 = U_x \frac{Z_0}{Z_1} - iZ_0. \quad (5)$$

Из характеристического уравнения $K^2 - \frac{Z_0}{Z_1} = 0$, учтя, что общее решение имеет вид

$$U_x = Ae^{\kappa x} + Be^{-\kappa x} + C, \quad (6)$$

где $C = iZ_0 \frac{Z_1}{Z_0} = iZ_1$.

После ряда преобразований могут быть найдены постоянные интегрирования

$$A = -iZ_1 \frac{\left(\kappa l_1 + \frac{m}{R_{оп}}\right) e^{-\kappa l_1}}{\left(\frac{m}{R_{оп}} + 1\right) e^{\kappa l_1} + \left(\frac{m}{R_{оп}} - 1\right) e^{-\kappa l_1}},$$
$$B = -iZ_1 \frac{\left(\kappa l_1 + \frac{m}{R_{оп}}\right) e^{\kappa l_1}}{\left(\frac{m}{R_{оп}} + 1\right) e^{\kappa l_1} + \left(\frac{m}{R_{оп}} - 1\right) e^{-\kappa l_1}},$$
(7)

где $m = \sqrt{Z_0 Z_1}$.

Окончательные выражения для напряжения U_x и тока I_x в любой точке ВОЛС с координатой x :

$$U_x = \frac{iZ_1}{\frac{m}{R_{оп}} ch\kappa l_1 + sh\kappa l_1} \cdot \left(\kappa l_1 + \frac{m}{R_{оп}}\right) ch\kappa(l_1 - x) + iZ_1,$$
$$I_x = \frac{i}{\kappa \left(\frac{m}{R_{оп}} ch\kappa l_1 + sh\kappa l_1\right)} \cdot \left(\kappa l_1 + \frac{m}{R_{оп}}\right) sh\kappa(l_1 - x).$$
(8)

Следует отметить, что полученные в ходе анализа кривые распределения тока достаточно близки к функции прямой линии, а кривые распределения напряжений близки к параболе. Поэтому для упрощения практических расчетов большого числа вариантов целесообразно использовать приближенное решение. Это решение может быть получено,

если считать емкостный ток равномерно распределенным по длине ВОЛС и равным $i \left(\frac{\text{А}}{\text{м}} \right)$. Тогда общий ток на 1 пролет $I = i \cdot l$, а точка токораздела

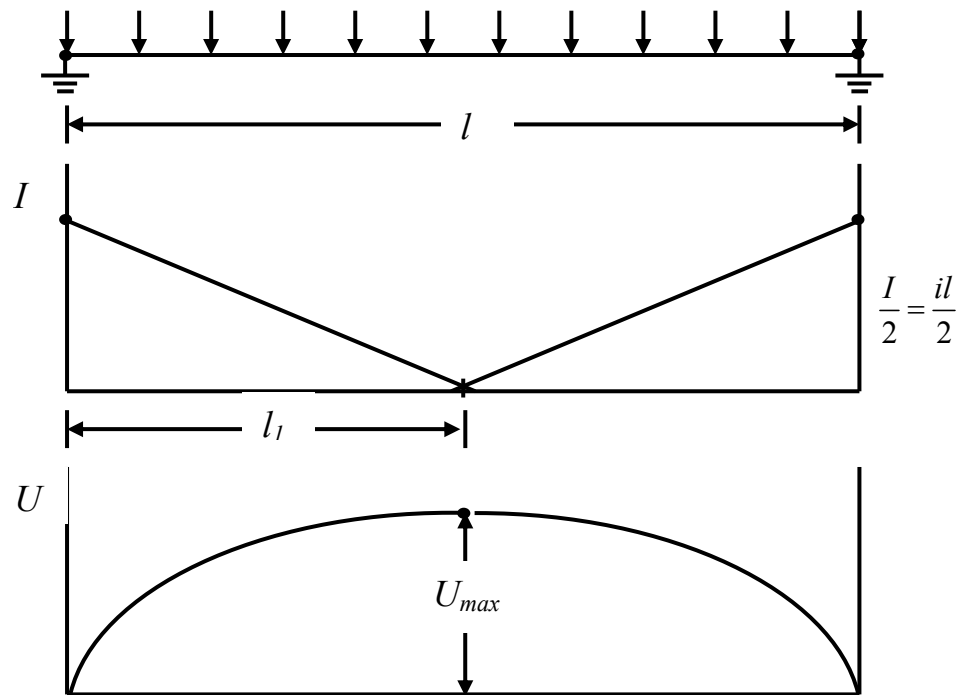


Рис. 2 – Распределение напряжения и тока вдоль пролета

будет расположена посередине пролета при $l_1 = \frac{l}{2}$ (рис. 2).

Учитывая, что кривая распределения напряжений вдоль пролета описывается выражением

$$U_x = r \left(i(l_1 - x)x + \int_0^x x \cdot i dx \right) = ir \left(l_1 x - \frac{x^2}{2} \right), \quad (9)$$

получен закон распределения напряжения, наведённого на поверхности кабеля

$$U_{\max} = ir \frac{l_1^2}{2} = ir \frac{l^2}{8}. \quad (10)$$

При возрастании $R_{оп}$ кривая напряжений будет перемещаться вверх на $\Delta U = \frac{il}{2} \cdot R_{оп}$.

В случае, когда поверхностное сопротивление явно неоднородно и неравномерно ток и напряжение становятся несимметричными. В случае значительной неоднородности становятся возможными следующие явления:

- резкое возрастание тока,
- резкое возрастание напряжения,
- сильное увеличение выделяемой мощности.

Проведенные исследования и расчеты показали, что основными влияющими величинами на количество энергии рассеиваемой на проводе волоконно-оптической линии связи являются емкостный ток утечки и величина распределенного поверхностного сопротивления. Так как стабильно высокое поверхностное сопротивление ВОЛС в условиях эксплуатации обеспечить в принципе невозможно, то наиболее рациональным подходом является его принудительное снижение до единиц Ом. При этом мощность, выделяемая на проводе ВОЛС [9, 10], может быть снижена практически до нуля, что исключает возможность электротермического повреждения линии. Применение полученных результатов исследований повысит надежность передачи данных автоматизированной системой, составной частью которой являются волоконно-оптические линии передачи информации.

Литература

1. Чернов И.Н., Муратов В.И., Куценко С.М., Зеленев С.А. Оплавление диэлектрического оптического кабеля, подвешенного на железнодорожных порах под действием электротермической деградаци // Lightwave Russian Edition, 2007 №2. С. 32.

2. Баланчевадзе В.И, Ишкин В.П, Стегний В.Х. Телекоммуникационные сети электроэнергетики России // Connect! Мир связи. 1998. № 10. С.64-68.

3. Keller, D.A., D.J. Benzel, J.P. Bonicel, C. Bastide and E. Davidson, 1997. Continued Investigation of ADSS Design and Reliability Consideration with Respect to Field Voltage Tracking, and Cable Installation Practices. 46-th International Wire & Cable Symposium Proceedings, Eatontown, New Jersey, pp: 24-31.

4. Стороженко Е. А., Кляморов А. С., Стороженко Д. Е., Гусаков К.С. Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645.

5. Гороховский Е.В. Условия электропроводимости самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные. // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1968.

6. Филиппов Ю.И., Асс Э.Е., Попов Л.Е., Бочев А.С., Соловьев Г.Е., Осипов В.А., Гайворонский А.С., Кречетов В.В., Прокопович М.Р. Электротермическая деградация оптического кабеля на участках железных дорог переменного тока // Lightwave Russian Edition. 2006. №3. С. 20-25.

7. Carter C.N., Waldron M.A. Mathematical model of dry-band arcing on self-supporting, all-dielectric, optical cable strung on overhead power lines, IEEE Proceedings s-c, vol.139, №3, May 1992, pp. 185-196.

8. Воробьев Г.А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). Учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.

9. Осипов В.А., Соловьев Г.Е., Капкаев А.А. Теплофизические процессы в структуре модуля ТГЗ-ВОК при прохождении больших токов в грозозащитном тросе // Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство». Ростов-на-Дону: 2004. С. 374-375.

10. Хволес Е.А., Ходатай В.Г., Шмалько А.В. Волоконно-оптические линии связи и проблемы их надежности. ВКСС. Connect, 2000, № 4. С. 12.

References

1. Chernov I.N., Muratov V.I., Kucenko S.M., Zelenev S.A. Lightwave Russian Edition 2007 №2 p. 32.

2. Balanchevadze V.I, Ishkin V.P, Stegnij V.H. Telekommunikacionnye seti jelektrojenergetiki Rossii // Connect! Mir svjazi. 1998. № 10. pp. 64 – 68.

3. Keller, D.A., D.J. Benzel, J.P. Bonicel, C. Bastide and E. Davidson, 1997. Continued Investigation of ADSS Design and Reliability Consideration with Respect to Field Voltage Tracking, and Cable Installation Practices. 46-th International Wire & Cable Symposium Proceedings, Eatontown, New Jersey, pp: 24 – 31.

4. Storozhenko E. A., Kljamorov A. S., Storozhenko D. E., Gukasov K. S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645.

5. Gorokhovskiy E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1968.

6. Filippov Yu.I., Ass E.E., Popov L.E., Bochev A.S., Solov'ev G.E., Osipov V.A., Gayvoronskiy A.S., Krechetov V.V., Prokopovich M.R. Lightwave Russian Edition. 2006. №3. pp. 20 – 25.

7. Carter C.N., Waldron M.A. Mathematical model of dry-band arcing on self-supporting, all-dielectric, optical cable strung on overhead power lines, IEEE Proceedings s-c, vol.139, №3, May 1992, pp. 185 – 196.

8. Vorob'ev G.A., Pohlkov Ju. P., Korolev Ju. D., Merkulov V. I. Insulator physics (strong field area). Uchebnoe posobie. – Tomsk : Izd-vo TPU, 2003. 244 p.

9. Osipov V.A., Solov'ev G.E., Kapkaev A.A. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy i perspektivy razvitiya transportnogo



комплекса: образование, наука, производство». Rostov-on-don: 2004. pp. 374 – 375.

10. Hvoles E.A., Hodataj V.G., Shmal'ko A.V. VKSS. Connect, 2000, № 4. p. 12.