

Волоконно-оптическая линия связи как линия с распределенными параметрами

Осипов В.А., Безуглый А.В.
ФГБОУ ВО РГУПС, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Рассмотрены особенности изменения электрических параметров волоконно-оптического кабеля, находящегося под влиянием сильного однородного переменного электромагнитного поля. Предложены варианты рассмотрения процессов, которые могут описать влияние электромагнитных полей высокой напряженности на параметры волоконно-оптического кабеля.

Ключевые слова: волоконно-оптический кабель, электротермическая деградация, кевлар, проводимость.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), эксплуатируемые ОАО «РЖД», были введены в эксплуатацию в 1999 году. Уже начиная с 2002 года, на сети железных дорог России, начали наблюдаться случаи повреждения ВОЛС, вызванные электротермической деградацией кабеля. Мощное электромагнитное поле тяговой сети электрифицированных железных дорог оказалось причиной выхода из строя волоконно-оптических линий связи на целом ряде эксплуатируемых участков. Один из перспективных способов борьбы с таким явлением – учет электрических параметров ВОЛС на стадии проектирования, с целью анализа возможного воздействия электромагнитного поля. В данной работе предложен способ рассмотрения ВОЛС как линии с распределёнными параметрами.

К собственным параметрам ВОЛС относятся его параметры без учета воздействия внешних электромагнитных полей. Проанализируем первичные параметры ВОЛС во всем диапазоне их возможных изменений.

К первичным параметрам ВОЛС, как и любой линии с распределенными параметрами относятся: продольное активное сопротивление R (Ом/км), продольная распределенная индуктивность L (Гн/км), поперечная емкость ВОЛС C (Ф/км), поперечная активная

проводимость утечки g (См/км). Рассмотрим каждый из этих параметров подробнее:

Продольное активное сопротивление ВОЛС определяется его поверхностным сопротивлением, так как при любой деградации оболочки кабеля, как показали исследования, протекающие токи в глубину оболочки не проникают.

Поверхностное сопротивление ВОЛС в процессе его эксплуатации меняется в очень широких пределах под влиянием как длительно действующих, так и кратковременно действующих факторов. Проведенные замеры показали, что для нового ВОК с чистой поверхностью поверхностное сопротивление составляет не менее 590 – 640 МОм/см и незначительно снижается при увлажнении (до 560 – 630 МОм/см), так как оболочка нового кабеля практически не смачивается.

Для кабеля, находящегося в эксплуатации, поверхностное сопротивление снижается, причем степень снижения зависит от степени деградации поверхности оболочки под воздействием солнечной радиации и атмосферных воздействий. Однако, при отсутствии загрязнений и увлажнения поверхностное сопротивление ВОК при этом снижается не более, чем в 2 раза, составляя 30÷40 МОм/см.

При наличии загрязнений, но при отсутствии увлажнения поверхностное сопротивление ВОК резко снижается, причем здесь существенно влияет характер загрязнений (сажа, металлическая пыль, солевые отложения) и при отсутствии увлажнения может снижаться до 400 кОм/см.

Воздействие увлажнения на кабель, длительно находящийся в эксплуатации и имеющий отложения загрязнений на поверхности снижает его поверхностное сопротивление до 500 Ом/см и даже менее.

Таким образом продольное активное сопротивление ВОЛС является переменным параметром и колеблется в диапазоне 500 Ом/см ÷ 64 МОм/см.

Продольная индуктивность ВОЛС. Этот первичный параметр с учетом влияния земли, может быть определен по формуле:

$$L = \left(1 - 2 \ln \frac{10^4}{1,784 \sqrt{10\pi\omega\gamma_3}} - j \frac{\pi}{2} \right) \text{ Гн/км,}$$

где r – радиус ВОК (м); γ_3 – проводимость земли (См/м).

Продольное распределенное сопротивление ВОЛС при частоте 50 Гц:

$$Z = R + j\omega L = R + 0,05 + j0,144 \left(2,08 - \ln r \sqrt{\gamma_3} \right) \text{ Ом/км.}$$

Так как величина ωL при любом сочетании параметров и различной геометрии подвески ВОЛС не превышает 1,5 Ом/км, то во всем возможном диапазоне изменения параметров $R \gg \omega L$, поэтому без заметной погрешности можно считать $Z = R$.

Поперечная собственная емкость ВОЛС.

Этот первичный параметр определяется, в основном высотой подвески и при высоте $\approx 6,5$ м составляет $C \cong 11,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{мкФ}}{\text{км}}$.

Поперечная проводимость утечки ВОЛС.

Этот параметр нуждается в более детальном анализе. ВОЛС в пролете между опорами имеет в качестве естественной изоляции воздух, поэтому по длине пролета можно считать, что эта величина равна нулю, $g \cong 0$.

Иначе обстоит дело в точках подвеса ВОЛС на кронштейнах. Этот параметр зависит от состояния поддерживающего зажима, от того, изолирован ли кронштейн от опоры, а также и от сопротивления самой опоры. В пределе, при наиболее неблагоприятном сочетании факторов суммарное сопротивление в точке подвеса ВОЛС относительно земли может

снижаться до 10 Ом. Тогда средняя проводимость утечки может достигать $g = 0,1 \cdot 20 = 2$ См/км.

Отсюда следует вывод о том, что, строго говоря, ВОЛС нельзя рассматривать на протяжении нескольких пролетов как однородную линию с распределенными параметрами. Однако, это вполне можно делать, рассматривая ВОЛС в пределах одного пролета, хотя и в этом случае следует учитывать возможные неоднородности. Эти неоднородности и широкий разброс параметров относятся к таким первичным параметрам, как R и g .

Волновое сопротивление ВОЛС как однородной линии с распределенными параметрами

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{g + j\omega C}}.$$

С учетом приведенного анализа возможных диапазонов изменения первичных параметров волновое сопротивление ВОЛС в пределах пролета

$$Z_c \cong \sqrt{\frac{R}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{R}{\omega C}} \cdot e^{-j45^\circ}.$$

Таким образом, волновое сопротивление ВОЛС по длине пролета является по характеру активно-емкостным, а по модулю меняется в широких пределах пропорционально \sqrt{R} . Таким же оно будет и в пределах нескольких пролетов при высокой изоляции ВОЛС в точках подвеса, в частности, при хорошем состоянии изоляции поддерживающих зажимов.

Коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(g + j\omega C)}.$$

Без учета утечки через опоры контактной сети и по длине пролета имеем

$$\gamma \cong \sqrt{R \cdot j\omega C} = \sqrt{\omega CR} \cdot e^{j45^\circ}.$$

Таким образом, наиболее целесообразным является рассмотрение ВОЛС как линии с распределенными параметрами в пределах одного пролета, когда ВОЛС можно рассматривать как однородную линию, а неоднородности в точках подвеса рассматривать отдельно.

Литература

1. 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.
2. Степанчук К.Ф., Тинянков Н.А. Техника высоких напряжений – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск.: Выш. школа, 1982. 367 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М: Высшая школа, 1987. 264 с.
4. Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И. Физика диэлектриков, область сильных полей. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244 с.
5. Бочев А.С., Соловьев Г.Е., Осипов В.А., Невретдинова О.В. Влияние переменных электромагнитных полей высокой напряженности на интенсивность деградационных процессов в структуре волоконно-оптических кабелей // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения 2009. №2(34). с. 94.
6. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Москва: Транспорт, 1965. 464с.
7. 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.

8. IEEE Std 738™-2006. Standart for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, 2007 pp. 17-20.

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

10. Осипов В.А., Соловьев Г.Е., Гороховский Е.В., Капкаев А.А. Проблемы электромагнитной деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/magazine/arhive/nly2013/1539/.

References

1. Fillipov Yu.I., Ass E.E, Popov L.E., Bochev A.S., Solov'ev G.E., Osipov V.A., Gayvoronskiy A.S., Krechetov V.V., Prkopovich M.P. Lightwave Russian Edition, 2006, № 3, p. 20.

2. Stepanchuk K.F., Tinyankov N.A. Tekhnika vysokikh napryazheniy [High-voltage engineering] 2nd edition, Minsk: Vishaya shcola, 1982. 367 p.

3. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theory of electrical engineering]. Moscow: Vishaya shcola, 1987. 264 p.

4. Vorob'ev G.A, Pokholkkov Yu.P., Korolev Yu.D, Merkulov V.I. Fizika dielektrikov, oblast' sil'nykh poley [Physics of dielectrics (high-field region)] Tomsk: TPI publ., 2003. 244 p.

5. Bochev A.S., Solov'ev G.E., Osipov V.A., Nevretdinova O.V. Bulletin of Rostov State Transport University 2009. №2(34). p. 94.

6. Markvardt K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Power supply of electrified railways. textbook for institutes of higher education of railways transport]. Moscow: Transport, 1965. 464 p.



7. 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.

8. IEEE Std 738™-2006. Standart for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, 2007 pp. 17-20.

9. Gorokhovskiy A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1968/.

10. Osipov V.A., Solov'ev G.E., Gorokhovskiy A.A., Kapkaev A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №1. URL: ivdon.ru/magazine/arhive/nly2013/1539/.