

## **Условия электропроводимости самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные**

**Е. В. Гороховский**

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), подвешенные в 90-х годах прошлого века на опорах контактной сети (КС), в настоящее время частично пришли в негодность, несмотря на то, что нормативный срок их службы составляет как минимум 25 лет [1]. Старение линий проявляется в виде обрывов и пережогов в зоне подвешного зажима (типа ЗП) и вдоль трассы кабеля. Основной причиной обрывов ВОЛС считается электротермическая деградация (ЭТД), что отражено в большом количестве публикаций [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Аварии такого характера чаще всего наблюдались на участках железных дорог с электротягой на переменном токе, однако подобные случаи также возникали и при подвеске ВОК на опорах высоковольтных линий электропередач (ЛЭП), о чем говорят публикации зарубежных авторов [8].

Рядом научных коллективов успешно проводились исследования указанной проблемы. Значительный вклад в решение вопроса внесли: Ю. И. Филиппов, Э. Е. Асс, Л. Е. Попов, А. С. Бочев, Г. Е. Соловьев, А. С. Гайворонский, В. В. Кречетов, М. Р. Прокопович и другие. В различных работах в качестве основной причины снижения срока службы кабеля указываются такие факторы, как сухополосная дуга, конструктивные особенности подвешного зажима, сжигание камыша и другие.

Принимая во внимание тот факт, что обрыв ВОК (рис. 1) может быть обусловлен как внутренней, так и внешней ЭТД, в ходе исследования были рассмотрены деградационные механизмы в структуре ВОК, проявляющиеся под действием резко неравномерного переменного электромагнитного поля высокой напряжённости в зоне перехода ВОК-ЗП [4, 5].



Рис. 1. – Обрыв ВОК

Исследования, проводимые ранее в рамках работы над данной проблемой [2, 3, 4, 5, 6, 7], предопределили необходимость изучения взаимодействия внутренних компонентов ВОК, протекающего под действием переменного электромагнитного поля.

При рассмотрении механизма внутренней электротермической деградации, акцент делается на разрушение кевлара – основного компонента ВОК, отвечающего за самонесущие свойства кабеля. Проведённый эксперимент был направлен на регистрацию изменений проводимости внутренних компонентов ВОК и получение закономерности этих изменений в результате воздействия переменного электромагнитного поля высокой напряжённости.

В эксперименте использовался самонесущий волоконно-оптический кабель марки «Siemens», который некоторое время находился в эксплуатации и был отделен от основной линии в результате аварии (пережог в зоне подвесного зажима [2]). От кабеля были отрезаны подряд три части, две из которых подготовлены в качестве экспериментальных образцов с выполненными на них технологическими срезами (рис.2). Технологические срезы заделаны расплавленным парафином при нормальных условиях окружающей среды.

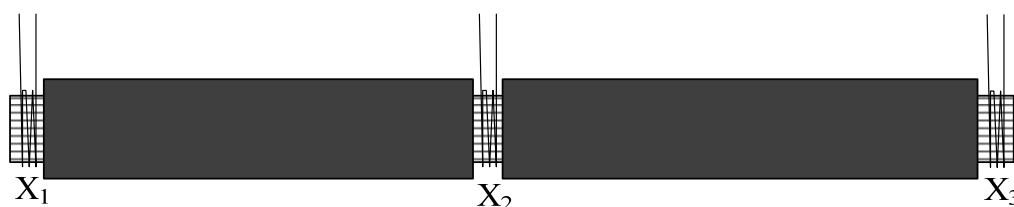


Рис. 2. –Схематическое изображение экспериментального образца с показанными технологическими срезами  $x_1 - x_3$ .

В ходе эксперимента нормальными условиями окружающей среды были приняты: температура  $22,6^{\circ}\text{C}$ , влажность 40%, и давление 748 мм ртутного столба, так как эти значения соответствовали микроклимату в лаборатории. На данном этапе ставилась задача создания для всех образцов приблизительно равных условий в течение эксперимента.

Технологические срезы выполнены путем частичного удаления поверхностного слоя ВОК и навивки серебряной проволоки. Технологические срезы схематично показаны на рисунке 2 и обозначены  $x_1 - x_3$ .

Оставшийся образец кабеля без заделки отложен в качестве контрольного образца для проведения дополнительного анализа и в процессе самого эксперимента не участвовал.

Для создания переменного однородного электромагнитного поля использовались электроды лабораторной установки «плоскость – плоскость» (рис.3). Расстояние между полюсами выбрано из условий максимальной напряженности электрического поля и исключения возможности пробоя воздушного промежутка[9, 10]. Для снижения до минимума влияния ионизации воздушного промежутка использовалась система направленного обдува зон, предрасположенных к краевому эффекту[10].

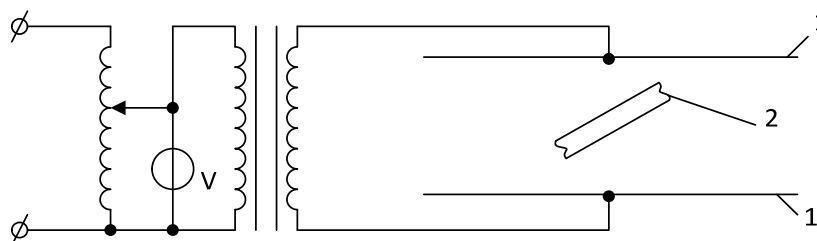


Рис.3. –Принципиальная схема расположения образца в лабораторной установке.

Схема включения электролаборатории для проведения испытания ВОК.

1 – электроды;2 – волоконно-оптический кабель.

С целью надежного закрепления образцов в пространстве и возможности регистрации внутренних изменений была изготовлена специальная подставка.Все образцы были расположены под углом  $45^{\circ}$  к плоскостям электроустановки (рис.4).

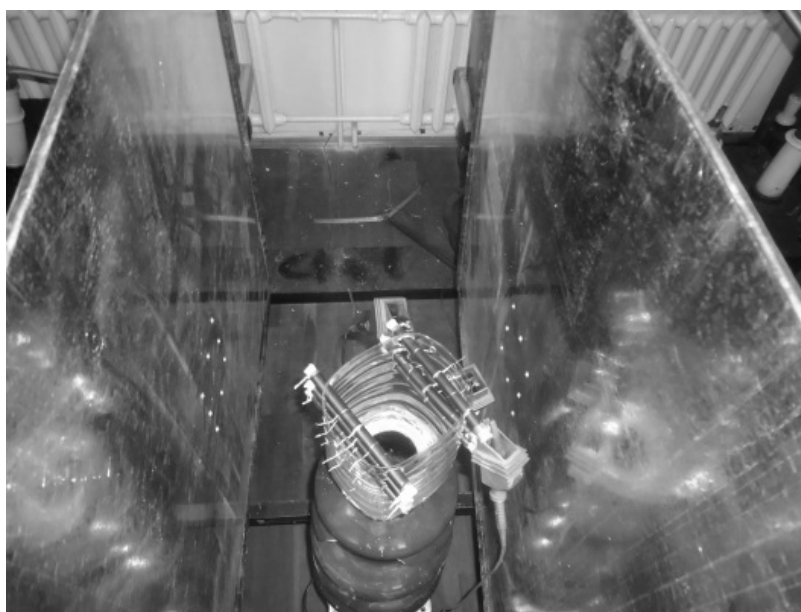


Рис. 4. – Подставка для выполнения эксперимента.

Оболочка ВОК перед установкой в подставку обрабатывалась с помощью спирта и ткани микрофибра для удаления возможных поверхностных образований с целью снижения поверхностной проводимости[2, 12].

Проведение замеров электропроводимости внутренних компонентов, а именно кевлара, осуществлялось сертифицированным прибором MIC 5000 фирмы Sonel. Для исключения токов утечки по оболочке кабеля использовалась трехпроводная схема подключения прибора. Для подключения третьего зажима к оболочке кабеля использовали плотную навивку медной проволоки (рис.5).

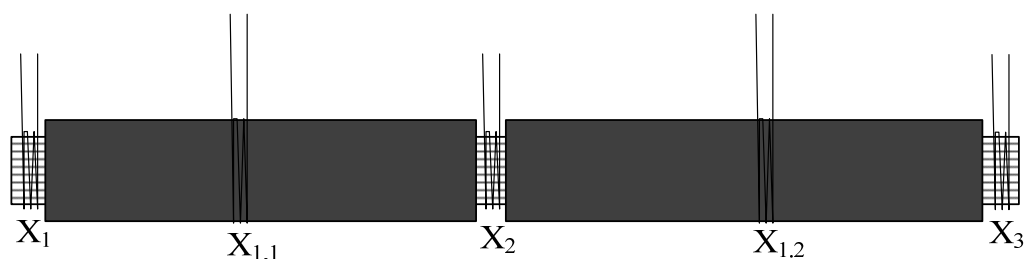


Рис.5. –Схематическое изображение экспериментального образца: технологические срезы  $x_1 - x_3$ ; навитая медная проволока  $x_{1.1}$  и  $x_{1.2}$

В эксперименте дополнительно использовались приборы:

- метеостанция с выносным датчиком (располагалась в максимально допустимой близости к образцам);
- пирометр.

Эксперимент протекал непрерывно в течение 60 часов с паузами для проведения измерений проводимости кевлара.

Для исследования необходимых параметров кевлара были созданы условия, позволяющие оценить воздействие переменного электромагнитного поля [9, 10].

В отличие от реальных условий подвески ВОК на КС, в лабораторных условиях создано однородное переменное электромагнитное поле высокой напряженности[9]. Данное условие позволяет воздействовать на структуру ВОК одинаково во всем объёме ВОК, что облегчает оценку результатов.

Параметры сняты до начала испытания и через каждый час. Замеры снимались последовательно:  $x_1 - x_3$ ;  $x_1 - x_2$ ;  $x_2 - x_3$ ;  $x_4 - x_6$ ;  $x_4 - x_5$ ;  $x_5 - x_6$ .

Соответственно, первый образец  $x_1 - x_3$  и второй образец  $x_4 - x_6$ . При такой системе снятия показаний возможно оценить электропроводность в достаточном количестве сочетаний. Все данные сводились в таблицу, как показано на примере (таблица №1), где  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  – сопротивления, измеренные за время  $T_1$  и  $T_2$ .  $A_{b1}$  – коэффициент абсорбции, рассчитанный как  $A_{b1} = R_{T2} / R_{T1}$ . Также в таблице указано заданное напряжение  $U_{НОМ}$  и реальное напряжение измерения  $U_{ISO}$ , указан протекающий ток  $I_1$  и  $I_2$  для каждого замера – отрезка времени.

Таблица №1

Пример оформления таблицы данных электропроводности образцов.

X <sub>1</sub> – X <sub>3</sub>									
№ измерения, (час)	U <sub>NOM</sub> , V	U <sub>ISO</sub> , V	R <sub>T1</sub> , GΩ	R <sub>T2</sub> , GΩ	I <sub>1</sub> , nA	I <sub>2</sub> , nA	T <sub>1</sub> , с	T <sub>2</sub> , с	Ab <sub>1</sub>
0	1000	1046	149,1	149,5	7.014	6.993	15	60	1.00
1	1000	1046	144,2	145,3	7.249	7.195	15	60	1.01
2	1000	1046	137,5	137,4	7.603	7.607	15	60	1.00
3	1000	1046	137,3	137,4	7.615	7.609	15	60	1.00
4	1000	1046	136,6	137,4	7.655	7.612	15	60	1.01
5	1000	1046	137,1	138	7.624	7.577	15	60	1.01
6	1000	1046	137,6	138,1	7.599	7.570	15	60	1.00
...									
X <sub>1</sub> – X <sub>2</sub>									
№ измерения, (час)	U <sub>NOM</sub> , V	U <sub>ISO</sub> , V	R <sub>T1</sub> ,GΩ	R <sub>T2</sub> , GΩ	I <sub>1</sub> , nA	I <sub>2</sub> , nA	T <sub>1</sub> , с	T <sub>2</sub> , с	Ab <sub>1</sub>
0	1000	1046	56,93	56,94	18.37	18.37	15	60	1.00
1	1000	1046	55,49	55,53	18.84	18.83	15	60	1.00
2	1000	1046	53,49	53,77	19.54	19.45	15	60	1.01
3	1000	1046	53,35	53,62	19.60	19.50	15	60	1.01
4	1000	1046	52,86	52,91	19.78	19.76	15	60	1.00
5	1000	1046	52,9	52,94	19.76	19.75	15	60	1.00
6	1000	1046	53,48	53,77	19.55	19.45	15	60	1.01
...									
X <sub>2</sub> – X <sub>3</sub>									
№ измерения,	U <sub>NOM</sub> , V	U <sub>ISO</sub> , V	R <sub>T1</sub> ,GΩ	R <sub>T2</sub> , GΩ	I <sub>1</sub> , nA	I <sub>2</sub> , nA	T <sub>1</sub> , с	T <sub>2</sub> , с	Ab <sub>1</sub>

(час)									
0	1000	1046	94,03	95,52	11.12	10.95	15	60	1.02
1	1000	1046	92,18	93,59	11.34	11.17	15	60	1.02
2	1000	1046	85,56	85,73	12.22	12.20	15	60	1.00
3	1000	1046	86,51	88,25	12.09	11.85	15	60	1.02
4	1000	1046	87,34	87,59	11.97	11.94	15	60	1.00
5	1000	1046	89,13	89,75	11.73	11.65	15	60	1.01
6	1000	1046	88,31	90,17	11.84	11.60	15	60	1.02
...									
X <sub>4</sub> – X <sub>6</sub>									
№ измерения, (час)	U <sub>NOM</sub> , V	U <sub>ISO</sub> , V	R <sub>T1</sub> , GΩ	R <sub>T2</sub> , GΩ	I <sub>1</sub> , nA	I <sub>2</sub> , nA	T <sub>1</sub> , с	T <sub>2</sub> , с	Ab <sub>1</sub>
0	1000	1046	117,20	117,80	8.921	8.876	15	60	1.01
1	1000	1046	114,40	115,20	9.136	9.081	15	60	1.01
2	1000	1046	111,40	112,20	9.383	9.319	15	60	1.01
3	1000	1046	111,50	112,00	9.381	9.337	15	60	1.01
4	1000	1046	112,20	114,60	9.320	9.123	15	60	1.02
5	1000	1046	112,70	115,20	9.279	9.080	15	60	1.02
6	1000	1046	112,90	113,80	9.262	9.190	15	60	1.01
...									
X <sub>4</sub> – X <sub>5</sub>									
№ измерения, (час)	U <sub>NOM</sub> , V	U <sub>ISO</sub> , V	R <sub>T1</sub> , GΩ	R <sub>T2</sub> , GΩ	I <sub>1</sub> , nA	I <sub>2</sub> , nA	T <sub>1</sub> , с	T <sub>2</sub> , с	Ab <sub>1</sub>
0	1000	1046	30,7	30,78	34.05	33.97	15	60	1.00
1	1000	1046	30,35	30,39	34.45	34.41	15	60	1.00
2	1000	1046	29,77	29,85	35.12	35.04	15	60	1.00
3	1000	1046	30,04	30,13	34.81	34.71	15	60	1.00

4	1000	1046	30,13	30,19	34.71	34.65	15	60	1.00
5	1000	1046	30,29	30,39	34.52	34.42	15	60	1.00
6	1000	1046	30,42	30,53	34.37	34.25	15	60	1.00
...									
$x_5 - x_6$									
№ измерения, (час)	$U_{NOM}, V$	$U_{ISO}, V$	$R_{T1}, G\Omega$	$R_{T2}, G\Omega$	$I_1, nA$	$I_2, nA$	$T_1, c$	$T_2, c$	$Ab_1$
0	1000	1046	86,88	87,95	12.03	11.89	15	60	1.01
1	1000	1046	82,9	84,12	12.61	12.43	15	60	1.01
2	1000	1046	80,9	83,44	12.93	12.53	15	60	1.03
3	1000	1046	80,62	83,25	12.97	12.56	15	60	1.03
4	1000	1046	81,96	82,63	12.76	12.66	15	60	1.01
5	1000	1046	85,15	88,48	12.28	11.82	15	60	1.04
6	1000	1046	82,38	85,73	12.69	12.20	15	60	1.04
...									

При анализе полученных данных (таблица №1) обратим внимание на коэффициент абсорбции ( $A_{b1}$ ): он в каждом этапе измерений близок к единице, что говорит об увлажнённости кевлара[11]. В результате чего под воздействием поляризационных и ионизационных процессов будут иметь место межслойные и миграционные поляризации [12, 13].

Основным механизмом старения при таких условиях для диэлектрика, а следовательно, и кевлара являются частичные разряды, которые будут возникать в разной степени как в отдельных слоях, так и в межслойных промежутках [11, 12, 13]. Каждый разряд оказывает слабое воздействие на кевлар за счет образования активных радикалов, излучения, повышенной температуры. С течением времени их действие нарастает, что ведет к постепенному разложению материала, росту давления в поре, появлению проводящих частиц (обуглероживанию) и зарождению дендрита. Как



известно, дендрит приводит к прогрессирующему разрушению диэлектрика и характерен для любых видов твердых диэлектриков, канал дендрита обладает повышенной проводимостью, имеет размер от 1 мкм до 10-20 мкм[11, 12].

Если при сборке и монтаже допускалось соприкосновение кевлара с окружающей средой, то следующим этапом развития деградации будет водный триинг (водный дендрит), что приведет к образованию разветвленной микроструктуры в виде объемной сетки или микрокустов в теле диэлектрика, а именно кевлара.

Далее, прогрессируя от времени нахождения в переменном электромагнитном поле, такие явления разрастаются. При протекании данных процессов выделяется энергия, которая может привести к термическому разрыву.

Процесс, который также заметен, как и абсорбция, на всех отрезках – это попеременное падение сопротивления и его рост (Графики 1 и 2). Такой эффект может быть обусловлен двумя внутренними процессами. Первый процесс – это сшивание нитей кевлара между собой[14] в хаотическом порядке, что приводит к изменению результирующей проводимости всего пучка кевлара в большую или меньшую сторону.

Второй процесс – это изменение структуры нитей кевлара вплоть до его разрушения (в некоторых местах), что очень хорошо описывает полученные результаты эксперимента.

На графиках 1 и 2 видно, что при внесении образцов в однородное электромагнитное поле высокой напряженности происходит снижение сопротивления кевлара. Собираясь в пучок из плотного повива, нити кевлара взаимодействуют между собой, и при замерах сопротивления пучка кевларовых нитей оно будет отличаться от минимального сопротивления единично взятой нити. Так, основываясь на ранее известном факте, что испытуемые образцы находились вблизи места обрыва-пережога (длительное воздействие электромагнитного поля), и опираясь на результаты, полученные от эксперимента, с большой вероятностью можно утверждать о снижении

погонного сопротивления каждой нити. В дальнейшем сопротивление снижается до критического значения, в связи с чем наступает пробой наименьшего промежутка единичной кевларовой нити. Появляется новое наименьшее сопротивление пучка кевларовых нитей, которое может быть больше начального. Вспомним про неоднородность погонного сопротивления кевларовой нити, в результате чего графики 1 и 2 наглядно демонстрируют в начальный момент деградацию кевларовых нитей подкрепленную фактом наличия нановключений влаги. Далее идет разрушение или пробой наименьших сопротивлений, в связи с чем и меняется результирующее сопротивление кевларового пучка.

Протекающие процессы, показанные на графиках 1 и 2, после 2-го часа могут быть обусловлены процессом, получившим название «сшивание полиамидов» [14]. В таком случае графики должны иметь более неравномерный и нелинейный вид. Исключать возможность протекания такого процесса под действием переменного электромагнитного поля не допустимо.

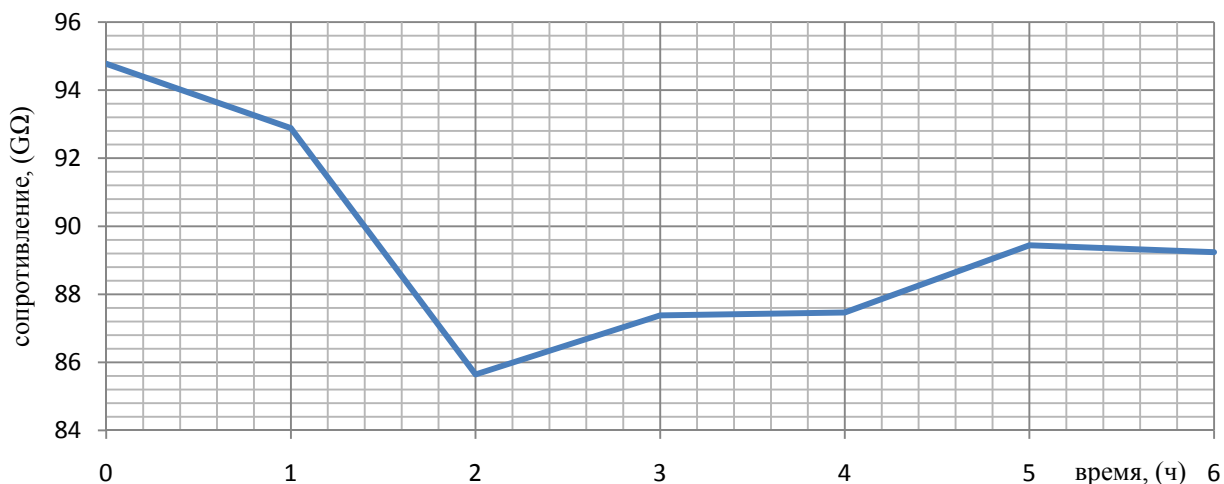


График 1. Изменение сопротивления образца X2-X3 от времени

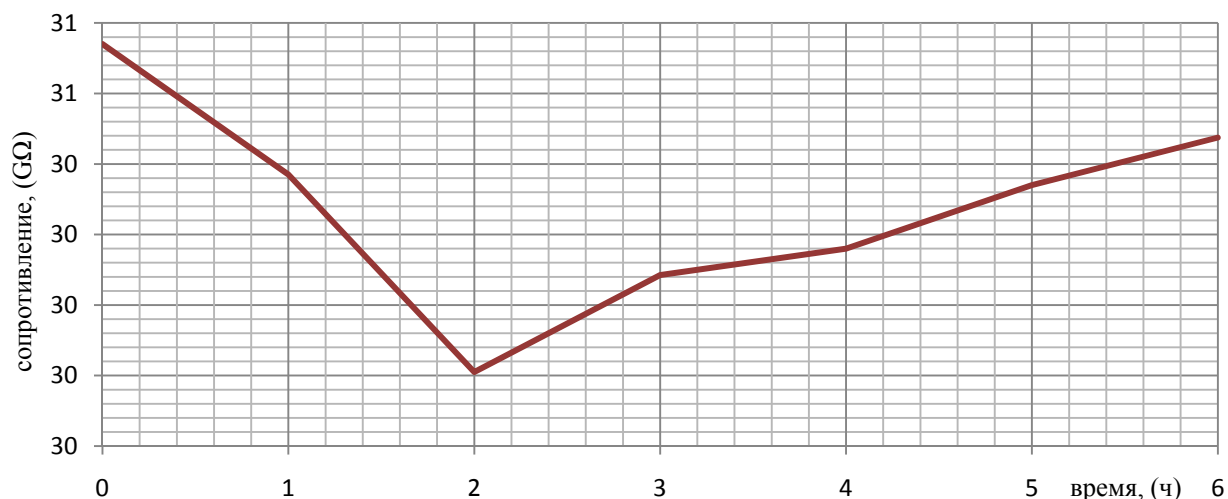


График 2. Изменение сопротивления образца X4-X5 от времени

На основании полученных данных можно сделать заключение о причине электротермической деградации волоконно-оптического кабеля на линиях контактной сети с электротягой переменного тока. ЭТД зависит от величины напряженности электромагнитного поля в точке подвеса ВОК, что в свою очередь характеризует интенсивность разрушения или сшивания нитей кевлара. В дальнейшем сила натяжения в точке подвеса становится больше несущей способности неразрушенных нитей кевлара. Далее наблюдается разрыв оболочки кабеля и ВОК повисает на внутренней модовой трубке. Процесс обугливания компонентов ВОК происходит как сопутствующий эффект при разрыве оболочки и кевлара за счет интенсивных микродуг, обусловленных гидрофобностью кевлара.

### Литература:

1.Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи 0,4—35 кВ.[Текст]: СО 153-34.48.519—2002: Утверждены Министерством РФ по связи и информатизации и Минэнерго РФ, 2003, с. 9

2. 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[Текст] //LightwaveRussianEdition, 2006, № 3, с. 20.

3. 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[Текст]// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения №2(34) 2009. ISSN 0201-727X, с. 94.

4. Осипов, В. А. Деградационные механизмы в структуре самонесущего волоконно-оптического кабеля[Текст] / В.А. Осипов, Е.В. Гороховский // Транспорт-2012: тр. Всерос. науч.-практ. конф., апрель 2012 г. В 3-х частях / РГУПС. - Ростов н/Д, 2012. - Ч. 1: Естественные и технические науки. - С. 347-348. - Фонд НТБ.

5. Осипов, В. А. Электротермическая деградация волоконно-оптического кабеля в зоне узла "ВОК-ЗП" [Текст] / В. А. Осипов, Е. В. Гороховский // Труды РГУПС. - 2011. - № 2. - С. 106-109. - Фонд НТБ.

6. Осипов В. А., Соловьев Г. Е., Гороховский Е. В., Капкаев А. А. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения/ [Электронный ресурс] //«Инженерный вестник Дона», 2013 №1 – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

7. Стороженко Е. А., Кляморов А. С., Стороженко Д. Е., Гукасов К. С. Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи / [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013 №2 – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. Keller D. A., Benze D. J., Bonicel J. P., Bastide C., Davidson E. Continued Investigation of ADSS Design and Reliability Consideration with Respect to Field Voltage Tracking, and Cable Installation Practices [Текст] // 46-

th International Wire & Cable Symposium Proceedings. - Eatontown, New Jersey, 17-20 November, 1997. - p.p. 24-31.

9. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники[Текст]: Учебник для ВУЗов, М: Высшая школа, 1987 – с.264

10. Степанчук К. Ф., Тинянков Н. А. Техника высоких напряжений[Текст]: Учеб. пособие для электро-энерг. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Выш. школа, 1982.–с.367,ил.

11. Важов В. Ф.,Лавринович В. А. Высоковольтная техника в электроэнергетике[Текст]: учебное пособие; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – с.176

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

13.Carter, Waldron Mathematical model of dry-band arcing on self-supporting, all-dielectric, optical cable strung on overhead power lines[Текст], IEEE Proceedings s-c, vol.139, No. 3, May 1992, p.p. 185-196

14. Говарикер В. Р., Висванатхан В. В., Шридхар Дж. Полимеры[Текст]: пер. с англ./ Говарикер В. Р., Висванатхан В. В., Шридхар Дж.; предисл. Кабанова В. А. – М. Наука, 1990. – с. 396– ISBN 5-02001425-7.