

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ТРЕКИНГУ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## INVESTIGATION OF RESISTANCE TO TRACKING OF INSULATION MATERIALS

**Boev M.A.**, *Dr. Sc. (Engineering), professor, MPEI, Full Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the RF;*

**Chunyu Sui**, *aspirant MPEI;*

**Junguo Gao**, *PhD, professor, Harbin University of Science and Technology*

**М.А. Боев**, *д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», действительный член Академии электротехнических наук РФ;*

**Чуньюй Суй**, *аспирант, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»;*

**Чжунго Гао**, *д-р техн. наук, профессор, Харбинский университет науки и техники*

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследования на трекингоустойчивость изоляционных материалов на основе полиолефинов и других полимеров. Эти материалы используют для защитных оболочек кабелей и в качестве защитных покрытий в электромашиностроении. Для проведения исследований использован стандартизованный метод испытаний. Полученные результаты позволили определить показатель СИТ (сравнительный индекс трекингоустойчивости), характеризующий устойчивость материала к трекингу.

**Ключевые слова:** защитная оболочка, изоляция, кабель, сравнительный индекс, трекинг

**Abstract.** The article presents the results of a study on the tracking resistance of insulating materials based on polyolefins and other polymers. These materials are used for protective cable sheaths and as protective coatings in electrical engineering. A standardized test method was used to conduct the research. The results obtained made it possible to determine the CTI (comparative tracking index) characterizing the material's resistance to tracking.

**Key words:** protective shell, insulation, cable, comparative index, tracking

*Материал поступил в редакцию 21.03.2023  
Автор, ответственный за переписку: Чуньюй Суй  
E-mail: SuiC@mpei.ru*

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации твёрдых изоляционных материалов (диэлектриков) под действием электрического поля возможен пробой на поверхности в газе или в жидкости с образованием на твёрдом диэлектрике каналов, проходящих от одного электрода к другому. В канале пробоя остаются электропроводящие продукты разложения диэлектрика, происходит потеря электроизоляционных свойств диэлектрика, и в первую очередь снижается поверхностное сопротивление диэлектрика [1]. Повреждение поверхности твёрдого диэлектрика при электрическом пробое называют трекингом, а образованные каналы – треками. Наличие треков значительно сокращает срок службы изоляционных материалов.

Образование треков, в основном, происходит в изоляционных материалах, которые работают на открытом воздухе и/или в неблагоприятных условиях окружающей среды. Из-за комбинированного воздействия влаги и пыли из различных загрязняющих веществ увеличивается электрическая проводимость поверхности изоляции, что приводит к увеличению тока утечки на поверхности и выделению тепла. В местах, где напряжённость поля между электродами достигает критических значений, превышающих электрическую прочность воздушного промежутка, на поверхности изоляции возникает частичный разряд в виде короны с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу, дуговой разряд (пробой) выделяет много тепла и ультрафиолетового света [2, 3]. Пробой воздуха у поверхности твёрдого диэлектрика,



называемый в технике поверхностным перекрытием, возникает обычно при более низкой напряжённости электрического поля, чем в том случае, когда между электродами находится только воздух. На значение напряжения образования короны кроме состояния поверхности изоляционного материала оказывает влияние форма электродов и изоляции, частота напряжения, давление воздуха.

Под совместным действием высокой температуры, ультрафиолета, кислорода воздуха и других факторов изоляция разрушается, механические свойства материала снижаются, и на поверхности изоляции появляются следы электрической коррозии в виде треков [4].

Целью приведённых в данной статье исследований является определение устойчивости к трекингу нескольких изоляционных материалов по методу, изложенному в ГОСТ 27473 87 «Материалы электроизоляционные твёрдые. Метод определения сравнительного и контрольного индексов трекингостойкости во влажной среде». Данный стандарт аутентичен стандарту МЭК 60112.

### ИССЛЕДУЕМЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В данной работе исследовано свойство трекингостойкости полиолефинов, используемых для защитных оболочек оптических кабелей, которые монтируют на высоковольтных линиях электропередачи, а также изоляционных эмалей, используемых для покрытия обмоток электрических двигателей и генераторов [5, 6].

Исследованы образцы изоляционного материала на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД)

низкой плотности марки 153-10К. Этот изоляционный материал содержит около 0,3 весовых процентов углеродной сажи и обладает хорошей стойкостью к термоокислительному старению при переработке и эксплуатации, а также к фотоокислительному старению при эксплуатации.

Исследованы образцы изоляционного материала марки H2001WC, изготовленного на основе бимодального полиэтилена высокой плотности (ПЭВП). Этот чёрный изоляционный материал содержит хорошо распределённые тонкодисперсные карбоновые частицы номинальным размером меньше, чем  $2 \times 10^{-8}$  м, что обеспечивает материалу высокую стойкость к воздействию факторов окружающей среды, включая ультрафиолетовое излучение. Материал марки H2001WC используют для изготовления оболочек оптических и силовых кабелей.

Исследованы образцы материала марки HE6081. Изоляционный материал HE6081 чёрного цвета изготовлен на основе ПЭВП и содержит специально разработанный пакет присадок, которые, по информации изготовителя, обеспечивают материалу отличную трекингостойкость, а также высокую стойкость к ультрафиолетовому спектру света и обеспечивают длительный срок службы изделий.

Перечисленные материалы, изготовленные на основе полиолефинов, перерабатывают методом экструзии и используют для изготовления внешней защитной оболочки кабелей.

Исследованы образцы эмали дугостойкой марки ЭКП-9303ГС, которая представляет собой компаунд в виде суспензии, состоящей из пигментов, наполнителей и специальных добавок в смеси из предельных полиэфиров. Эмаль предназначена для покрытия

Таблица 1  
Изготовители исследованных материалов

Название материала и марка		Производитель	Документация на изготовление материала
Композиция ПЭВД для кабельных изделий, ПЭВД 153-10К		Россия, АО «МЕТАКЛЭЙ»	ГОСТ 16336-2013
EL-Lene, H2001WC		Таиланд, SCG Performance Chemicals CO LTD	IEC 60708
Полиолефин Borstar, HE6081		Австрия, компания Borealis	IEC 587:1986
Эмаль дугостойкая, ЭКП-9303 ГС		Россия, ООО «Диэлектрик»	ТУ 2311-001-31885305-2003
Смесь	Мастика электроизоляционная, МКП-303	Россия, ООО «Диэлектрик»	ТУ 20.30.22-024-31885305-2018
	Компаунд, КП-303Н-А тип 1		ТУ 20.16.40-019-31885305-2017
	Пигмент коричневый железистоокисный, КА		ТУ 2322-166-05011907-98

обмоток и деталей электрических машин, якорей тяговых электродвигателей и других изделий для придания им атмосферо- и дугостойкости. Данную эмаль можно применять в изделиях классов нагревостойкости «В», «F», а при сочетании с нагревостойкой изоляцией и класса «Н».

Исследованы экспериментальные образцы, изготовленные из смеси следующих компонентов: электроизоляционной мастики марки МКП-303, пропиточного компаунда марки КП-303 и пигмента коричневого железистоокисного марки КА. Соотношение содержания компонентов в составе смеси в порядке их перечисления составило – 60:35:5 весовых процентов. Этот образец исследован на предмет получения трекингоустойчивого изоляционного материала с высокой теплопроводностью, используемого в электромашиностроении при изготовлении электрических обмоток.

В табл. 1 указаны изготовители исследованных в данной работе изоляционных материалов.

### СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения испытаний необходимы образцы изоляционных материалов в виде пластин. В ходе подготовки материалов для исследования полиолефины, изначально представленные в виде гранул, подвергались прессованию в специальной металлической форме. Гранулы насыпали в форму, на дне которой находилась полиимидная плёнка, сверху гранулы также накрывали полиимидной плёнкой и металлической пластиной. Заполненную изоляционным материалом форму помещали на плиту гидравлического пресса, нагретую до температуры 190 °С. Вначале осуществляли предварительный прогрев формы в течение 10 минут при приложенном давлении 1 МПа. После предварительного нагрева давление многократно повышали циклами от 1 до 10 МПа. После трёх таких циклов давление повышали до 15 МПа и образец выдерживали при этом давлении в течение 10 минут. Затем форму охлаждали до 30 °С, снимали давление и вынимали форму из пресса. Таким образом, получены плоские образцы размером 15 × 15 мм и толщиной 4 мм.

Образцы эмали для исследования получали также путём прессования. С этой целью использовали специальную металлическую форму, внутреннюю поверхность которой покрывали тонким слоем кремнийорганической смазки. Эмаль заливали в форму, а затем форму помещали под пресс на предварительно нагретую до температуры 150 °С плиту. Создавали небольшое давление около 0,5 МПа и выдерживали форму с эмалью в этих условиях в течение 4 часов. Затем пресс охлаждали до 30 °С, снимали давление, вы-

нимали форму и извлекали из формы затвердевшую эмаль, имеющую форму прямоугольной пирамиды с размером основания 15 × 15 мм и высотой 4 мм.

Смесь для образцов готовили следующим образом:

- взвешивали компоненты с целью обеспечения заданного соотношения их весовых частей в смеси;
- сливали в смеситель одновременно мастику электроизоляционную МКП-303 и пропиточный компаунд марки КП-303;
- к ним постепенно добавляли пигмент коричневый железистоокисный марки КА, при этом полученную смесь непрерывно помешивали, примерно, в течение 10÷15 минут, пока все три материала не стали представлять собой вязкую массу однородной консистенции.

Формование экспериментальных образцов для исследования трекингоустойкости смеси производили аналогично изготовлению образцов из эмали.

### ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Исследование на трекингоустойкость изоляционных материалов проводили на приборе TRACKING TEST APPARATUS типа Т4-41 (прибор изготовлен в Словении), конструкция которого содержит испытательную камеру для размещения образца. На рисунке схематически показано как испытательное напряжение прикладывается к образцу в процессе испытаний.

При проведении испытаний к горизонтальной поверхности образца между двух электродов специальной формы (1) прикладывали переменное электрическое напряжение синусоидальной формы с частотой 50 Гц. Электроды прижимали к образцу (5) с усилием 1,0 Н, которое создавал груз (7). Металл ис-

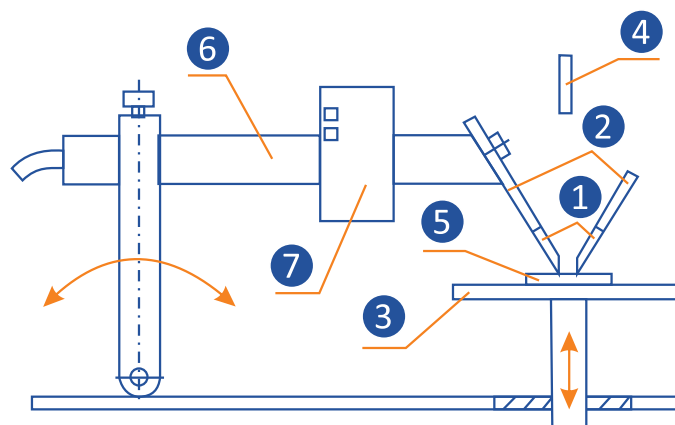


Рис. Схема приложения напряжения к образцу при испытании на трекингоустойкость: 1 – электроды; 2 – медные удлинители; 3 – опора; 4 – носик пипетки; 5 – образец; 6 – крепёжный стержень; 7 – груз



пытательных электродов в точке соприкосновения с образцом – платина. В начале испытаний между электродами устанавливали случайно выбранное значение напряжения 300 В и проводили испытания [7].

При испытаниях в зону между электродами, которая имеет ширину 4 мм, из пипетки (4) капали специальный электролит. В качестве электролита использовали 0,1-процентный раствор соли NH<sub>4</sub>Cl в деионизированной воде. Удельное электрическое сопротивление электролита в нормальных условиях составляло 397 Ом·см. Капли электролита следовали друг за другом с интервалом около 30 секунд. Капли падали в середину зоны между электродами с высоты 35 мм. Объём каждой капли составлял, примерно, 20 мм<sup>3</sup>. Испытания проводили до тех пор, пока не было нанесено 50 капель или пока между электродами не возник ток более 0,5 А. Это допустимый ток, который необходим для срабатывания защитного реле прибора, отключающего подачу напряжения на электроды в течение 2 секунд. Если в ходе эксперимента при нанесении 50 капель электролита на образец не возникал ток более допустимого, то эксперимент прекращали и повторяли испытание на другом участке образца при напряжении на 25 В выше значения, чем в предыдущем испытании. Испытание продолжали до тех пор, пока не было установлено напряжение, при котором происходило отключение подачи напряжения к электродам до падения 50 капель электролита. Эксперимент проводили на пяти различных участках образца одного и того же материала.

Сравнительным индексом трекинговости (СИТ), согласно указанному выше стандарту, называют максимальное значение напряжения, при котором не возникает тока более допустимого после падения 50 капель электролита на всех пяти участках испытательного образца. Однако числовое значение СИТ считается подтверждённым при условии, если напряжение, сниженное на 25 В, не вызывает отключения подачи напряжения после падения 100 капель при испытании на каждом из пяти новых участков. Поэтому, после определения СИТ испытания продолжали при сниженном напряжении и увеличенном до 100 количестве капель. Максимальное значение испытательного напряжения, которое можно получить на рассматриваемой установке, составляет 650 В.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая, что в литературе, в проспектах и в сопроводительных паспортах предприятий-изготовителей на исследуемые в данной работе материалы отсутствуют сведения о СИТ, было решено начинать испытания с напряжения 375 В. При положительных

результатах испытаний на одном участке, приложенное напряжение увеличивали сразу на 150 В и вновь проводили испытания. Для материала изоляции на основе полиолефинов и экспериментальной смеси результаты были положительные, поэтому напряжение при испытании этих образцов последовательно увеличивали на 25 В до момента получения отрицательного результата. Затем напряжение снижали на 25 В и испытания проводили уже на пяти участках и количество капель увеличивали до 100. Если в ходе испытаний не было получено отрицательных результатов, то при максимально возможном напряжении проводили испытания на 5 участках с количеством капель равным 100.

Для изоляции из эмали марки ЭКП-9303 ГС при испытаниях после увеличения напряжения на 150 В получен отрицательный результат и напряжение стали снижать так же ступенями по 25 В до получения положительных результатов испытаний на 5 участках. Значение этого напряжения приняли за СИТ образца и для подтверждения полученного значения СИТ напряжение снижали еще на 25 В и испытание продолжали вновь на 5 участках в течение времени падения 100 капель электролита.

Ниже в табл. 2 и 3 приведены результаты испытаний образцов материалов, указанных в табл. 1.

*Таблица 2  
Результаты испытаний образцов полиолефинов марок 153-10К, H2001WC и HE6081*

Напряжение, В	Число измерений	Число капель
<b>Материал: полиолефин марки ПЭВД 153-10К</b>		
375	1	50
525	1	50
550	1	50
575	1	50
600	1	18
575	5	100
<b>Материал: полиолефин марки H2001WC</b>		
375	1	50
525	1	50
550	1	50
575	1	50
600	1	39
575	5	100
<b>Материал: полиолефин марки HE6081</b>		
375	1	50
525	1	50
550	1	50
575	1	50
600	1	50
625	5	100
650	5	100

Таблица 3

Результаты испытаний образцов эмали марки ЭКП-9303 ГС и экспериментальной смеси

Напряжение, В	Число измерений	Число капель
Материал: эмаль марки ЭКП-9303 ГС		
375	1	50
525	1	19
500	1	25
475	2	50
		14
450	2	50
		40
425	2	50
		35
400	2	50
		49
375	4	50
	1	48
350	5	50
	1	86
325	5	100
Материал: экспериментальная смесь		
375	1	50
525	1	50
550	1	50
575	1	50
600	1	50
625	5	100
650	5	100

Таким образом, получены значения СИТ для исследованных в данной работе материалов, значения которого приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значение параметра СИТ для исследованных материалов

Марка материала	Значение СИТ
ПЭВД 153-10К	575
H2001WC	575
HE6081	>650
ЭКП-9303 ГС	350 (325)
Смесь	>650

## ВЫВОДЫ

Исходя из приведённых выше результатов испытаний, можно сделать следующие выводы:

– исследованные в данной работе электроизоляционные материалы на основе полиолефинов устойчивы к трекингу, и их применение в качестве оболочек для кабельных изделий вполне оправдано;

– электроизоляционные материалы, используемые в качестве покрытия обмоток и деталей электротехнических изделий, имеют различные значения СИТ.

Отдельно следует отметить, что метод оценки устойчивости к трекингу, изложенный в ГОСТ 27473 87, охватывает далеко не всю область твёрдых электроизоляционных материалов, для которых необходима такая оценка. Поэтому для материалов, работающих в зонах воздействия более высокого напряжения, необходимы дополнительные исследования другими методами. ■

### Список источников

1. GUI Jianhua, YANG Cheng, LEI Yunfeng, ZHANG Hanfei, HUANG Zixing. Study on Effect of Different Filler on Tracking Performance of Epoxy Resin // High Voltage Apparatus. – 2022. Vol. 58, No 1. P. 170–174.

2. Loganathan N., Muniraj C., Chandrasekar S. Tracking and erosion resistance performance investigation on nanosized SiO<sub>2</sub> filled silicone rubber for outdoor insulation applications // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014. Vol. 21, No 5. P. 2172–2180.

3. CHEN Can, JIA Zhidong, WANG Xilin, et al. Micro characterization and degradation mechanism of liquid silicone rubber used for external insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22, No 1. P. 313–321.

4. Кислякова Е.В. Механизмы пробоя твердых диэлектриков с неоднородной структурой / Е. В. Кислякова // Молодой учёный. 2013. № 3 (50). С. 1–4.

URL: <https://moluch.ru/archive/50/6335/> (дата обращения: 04.03.2023).

5. Суй Чуньюй, Боев М.А. Влияние силанового «сшивания» полиэтиленовой изоляции на реологические свойства и технологию экструзии. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XXVII Междунар. науч.-техн. конф. Тез. докл. – М.: НИУ «МЭИ», 2021. С. 393.

6. Суй Чуньюй, Боев М.А. Влияние толщины на электрическое сопротивление полиэтиленовой защитной оболочки кабеля. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. Тез. докл. – М.: НИУ «МЭИ», 2022. С. 304.

7. Даниелян. Н.Г. Трекингостойкость литой изоляции измерительных трансформаторов // Энергетика и промышленность России. 2010. № 8. С. 16.