

Дальнейшие усилия авторов будут направлены на оформление накопленных практикой знаний в области электроэкспертизы в стройную систему —

электроэкспертологию, а также на решение некоторых частных задач, относящихся к данной проблеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муженская Н.Е. Развитие правового института судебной экспертизы: фрагменты истории // Государство и право. — 2009. — № 8. — С. 78–87.
2. Нестеров А.В. О зарождении некоторых категорий экспертизы // Препринт — сентябрь 2011 г. (Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики).
3. Винберг А.И., Малаховская Н.Т. Судебная экспертология. Общетеоретические и методологические проблемы судебных экспертиз. — Волгоград: Изд-во НИИРЮ ВСШ МВД СССР, 1979. — 183 с.
4. Позаченюк Е.А. Экспертология // Ученые записки Таврического национального государственного университета. — 1998. — № 6 (45). — С. 37–47.
5. Сидельников Ю.В. Экспертология — новая научная дисциплина // Автоматика и телемеханика. — 2000. — Вып. 2. — С. 107–126.
6. Сидельников Ю.В. Системный анализ экспертного прогнозирования. — М.: Изд-во МАИ, 2007. — 453 с.

Поступила 25.01.2013 г.

УДК 621.315.61

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ В СОСТАВЕ КЛЕЯЩЕГО ЛАКА НА РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В ТВЕРДЫХ СЛОИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.И. Меркулов, О.В. Карпицкий

Томский политехнический университет
E-mail: mir742@enin.tpu.ru

Исследовано влияние наполнителя в составе клеящего лака на развитие разряда в твердых слоистых композиционных диэлектриках в системе электродов, создающих неравномерное электрическое поле. Установлено, что введение наполнителя в состав клеящего лака приводит к перераспределению напряженностей электрического поля в слоях композиции и обуславливает изменение величины разрядной напряженности и характера развития разряда на границе раздела исследуемых диэлектриков.

Ключевые слова:

Композиционные материалы, наполнитель, диэлектрическая проницаемость, слоистые диэлектрики, пробой, трек.

Key words:

Composite materials, filler, dielectric constant, layered dielectrics, breakdown, track.

В настоящее время в качестве электрической изоляции высоковольтных конструкций (высоковольтных вводов, трансформаторов, электрических машин, изоляционных штанг и др.) широкое применение находят полимерные композиционные материалы, имеющие слоистую структуру. Это стекло и лакоткани, синтофлекс, изофлекс, стекломиканит, текстолит, гетинакс и многие другие. При воздействии электрического поля в таких материалах, наряду с нормальной составляющей напряженности электрического поля, будет наблюдаться значительная тангенциальная (продольная) составляющая, наличие которой может оказывать влияние на характер развития пробоя. В случае неоднородного электрического поля за счет наличия тангенциальной составляющей напряженности развитие разряда может происходить вдоль слоев такой изоляции или на границе раздела их с другим диэлектриком [1, 2].

В работе [1] было показано, что при кратковременном (непрерывно возрастающем) напряжении

развитие разряда на границе раздела таких слоистых композиционных материалов могло протекать по разным направлениям. Так, при толщине исследуемого материала менее 50 мкм наблюдался пробой исследуемого материала и выход канала разряда на его поверхность. В других случаях, при толщине исследуемого композиционного материала порядка 100 мкм и более, развитие разряда происходило на границе раздела этих материалов с подложкой или с эффектом заглубления канала разряда в толщу исследуемого диэлектрика. Было предположено, что различный характер развития разряда в таких слоистых диэлектриках связан с перераспределением напряженностей электрического поля в их слоях и изменением соотношения нормальной и тангенциальной составляющих. Это соотношение нормальной и тангенциальной составляющих напряженностей электрического поля может быть изменено путем введения в состав клеящего лака исследуемых композиционных материалов специальных добавок, изменяющих величину их

диэлектрической проницаемости или проводимости. Конкретных исследований по данному вопросу в литературе не достаточно, что послужило основой для выполнения данной работы.

Для проверки высказанного предположения в работе проводилось исследование развития разряда на границе раздела различных композиционных материалов при длительном воздействии приложенного переменного напряжения частотой 50 Гц. Испытания проводились в системе электродов игла–игла, создающих резконеоднородное продольное электрическое поле. В качестве образцов использовалась комбинация из различных диэлектрических материалов (стеклолакоткань, изофлекс, синтофлекс, Votastop 2235, Votafix® E 2102 и др.), наклеенных на подложку из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 3 мм с помощью эпоксидного компаунда холодного отверждения на основе смолы ЭДб и отвердителя – полиэтиленполиамины. Характеристики исследуемых материалов приведены в [3]. Средняя толщина образцов исследуемых материалов составляла 150...170 мкм.

Для изменения величины диэлектрической проницаемости клеящего компаунда в него вводился наполнитель тонкодисперсного порошка Al_2O_3 , ZrO_2 , Ba_2TiO_3 и сегнетoeлектрика ЦТС. Толщина слоя клеящего компаунда составляла в среднем 180...200 мкм. Количество образцов на точку бралось не менее 5. В промежутке между пластинками разных материалов размером $50 \times 100 \text{ мм}^2$ (на границе их раздела с подложкой) располагались электроды игла–игла на расстоянии 20 мм. Чтобы исключить образование воздушных прослоек и обеспечить ровную склеиваемую поверхность материала с подложкой, в ней делались специальные проточки (углубления), в которые утапливались иглы. В качестве игл использовались швейные иглы RTV 14539, имеющие радиус закругления порядка 50...70 мкм. Радиус закругления игл определялся с помощью горизонтального компаратора ИЗА-2 с точностью $\pm 0,5 \text{ мкм}$. Образцы, имеющие видимые воздушные включения или другие дефекты, отбраковывались. На подготовленные таким образом образцы подавалось возрастающее ступенчато переменное напряжение частотой 50 Гц с шагом 1 кВ каждый час. Начальное приложенное напряжение составляло 10 кВ, что соответствовало значению $0,5U_{разр}$.

Для оценки величины диэлектрической проницаемости клеящего эпоксидного компаунда были подготовлены плоские образцы толщиной порядка 1 мм с диаметром электрода 25 мм. Количество наполнителя в составе клеящего компаунда бралось 50, 60 и 70 % от весовой части эпоксидного компаунда. Измерения емкости образцов проводилось с помощью автоматического моста диэлектрических потерь Е7–8.

Расчет диэлектрической проницаемости исследуемых образцов производился по формуле:

$$\varepsilon = C \frac{h}{\varepsilon_0 S}, \quad (1)$$

где C – емкость образца, Ф; ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость; h – толщина образца, м; S – площадь электродов, м^2 .

Результаты измерения емкости и расчета диэлектрической проницаемости по (1) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений емкости и расчета диэлектрической проницаемости

Материал	Концентрация наполнителя, %	C, пФ	$\text{tg} \delta \cdot 10^3$	Диаметр электрода $d \cdot 10^3$, м	Толщина образца $h \cdot 10^3$, м	ε
Эпоксидный компаунд (ЭК)	–	29,61	175	25	1,03	5,76
ЭК+ЦТС (сегнетоэлектрик)	50	27,80	229	25	1,09	6,59
	60	32,60	590		1,01	7,13
	70	27,51	297		1,28	7,72
ЭК+ Al_2O_3	50	35,17	385	25	0,77	5,75
	60	31,97	390		0,95	6,55
	70	33,35	368		0,98	7,06
ЭК+ ZrO_2	50	36,97	417	25	0,95	7,57
	60	42,77	487		0,98	9,06
	70	37,55	370		1,18	9,68
ЭК+ Ba_2TiO_3	50	53,56	485	25	0,81	9,25
	60	52,35	418		0,95	10,78
	70	51,80	312		1,25	14,19

Как следует из табл. 1, введение в состав клеящего эпоксидного компаунда (ЭК) наполнителя приводит к увеличению его диэлектрической проницаемости от 5,76 до 14,19 при использовании наполнителя Ba_2TiO_3 .

В табл. 2 представлены результаты исследования развития разряда на границе раздела различных композиционных материалов при длительном воздействии приложенного напряжения в зависимости от величины диэлектрической проницаемости клеящего компаунда.

Из табл. 2 видно, что в композиции на основе синтофлекса развитие полного разряда между электродами игла–игла в процессе электрического старения происходило при разрядном напряжении 16,6 кВ без использования наполнителя в составе клеящего компаунда. При введении в состав клеящего эпоксидного компаунда наполнителя ультрадисперсного порошка Al_2O_3 разрядное напряжение возрастало до значения 21 кВ, а при введении наполнителя Ba_2TiO_3 – до 23,2 кВ, т. е. практически в два раза. Аналогичная закономерность наблюдалась в композиции на основе синтофлекса 828. В этом случае при введении в состав клеящего компаунда наполнителя сегнетокерамического порошка ЦТС наблюдалось возрастание разрядного напряжения от 16,4 до 23 кВ.

В композициях на основе синтофлекса 616, изофлекса 191 и Votafix® E 2102, имеющих более

высокое значение диэлектрической проницаемости, введение в состав клеящего компаунда наполнителя Al_2O_3 не оказывает существенного влияния на величину разрядного напряжения. По-видимому, это связано с небольшим различием величин диэлектрической проницаемости исследуемого материала композиции и клеящего компаунда с наполнителем, что видно из табл. 2.

Таблица 2. Влияние наполнителя в составе клеящего эпоксидного компаунда на значения разрядного напряжения U_{cp} исследуемых композиций

Наименование материала	Среднее значение разрядного напряжения U_{cp} , кВ	Диэлектрическая проницаемость материала	Диэлектрическая проницаемость клеящего лака
Синтофлекс (без наполнителя Al_2O_3)	16,6	2,95	5,76
Синтофлекс (с наполнителем Al_2O_3)	21	2,95	6,55
Синтофлекс (с наполнителем Ba_2TiO_3)	23,2	2,95	14,9
Синтофлекс 616 (без наполнителя Al_2O_3)	27,9	2,95	5,76
Синтофлекс 616 (с наполнителем Al_2O_3)	27,3	2,95	6,55
Синтофлекс 828 (без наполнителя ЦТС)	16,4	2,62	5,76
Синтофлекс 828 (с наполнителем ЦТС)	23	2,62	7,72
Изофлекс 191 (без наполнителя Al_2O_3)	25,2	3,1	5,76
Изофлекс 191 (с наполнителем Al_2O_3)	23,8	3,1	6,55
Votafix® E 2102 (без наполнителя Al_2O_3)	18	5,09	5,76
Votafix® E 2102 (с наполнителем Al_2O_3)	19	5,09	6,55

Можно предположить, что полученные закономерности в изменении величины разрядного напряжения и характера развития разряда обусловлены перераспределением напряженностей электрического поля в области расположения острия иглы за счет различия диэлектрических проницаемостей и проводимостей клеящего лака и исследуемого материала.

Приводимое в [4, 5] ур. (2) для расчета напряженности электрического поля у острия иглы позволяет оценить его значение, но не позволяет учесть влияния на его величину параметров изоляции, а в частности значения диэлектрической проницаемости материала среды или ее проводимости.

$$E = \frac{Uc}{(c^2 - x^2) \operatorname{arcth}\left(\frac{d}{c}\right)}, \quad (2)$$

где $c=d+r$, d – расстояние между иглами; r – радиус острия игл; U – приложенное напряжение.

Учитывая, что ур. (2) не позволяет учесть влияние диэлектрической проницаемости среды на напряженность электрического поля, для анализа характера распределения напряженностей поля в такой слоистой изоляции воспользуемся программой *Elcut*, разработанной Производственным кооперативом ТОР г. Санкт-Петербург [6].

Картина электрического поля в слоистой структуре исследуемых образцов с композиционной изоляцией (синтофлекс) показана на рис. 1.

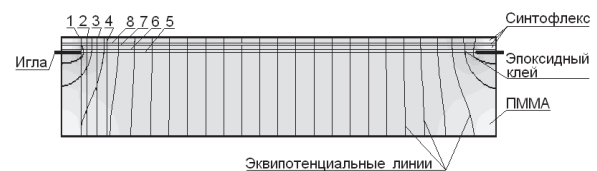


Рис. 1. Картина эквипотенциальных линий электрического поля в образце композиции (линии 1–8 соответствуют сечениям, в которых производился расчет величины напряженности электрического поля)

Расчет величин напряженностей электрического поля в исследованных композициях производился в сечениях 1–4, удаленных от острия иглы на различное расстояние, а также и по линиям 5–8, расположенным на границах раздела слоев при напряжении $U=20000$ В.

В табл. 3 приведены результаты расчета напряженности электрического поля в слое клеящего компаунда (линии 5 и 6 на рис. 1) на различных расстояниях от острия иглы в образцах композиции на основе синтофлекса.

Таблица 3. Значения напряженностей электрического поля для композиции на основе синтофлекса

Материал композиции	Напряженность электрического поля $E \cdot 10^{-7}$, В/м				
	Расстояние от иглы $l \cdot 10^{-3}$, м				
	0	5	10	15	20
В образцах без наполнителя на линии 5	0,8485	0,0894	0,0885	0,0895	0,8374
В образцах с наполнителем Ba_2TiO_3 на линии 5	0,6177	0,0878	0,0870	0,0878	0,6096
В образцах без наполнителя на линии 6	0,3514	0,0892	0,0886	0,0894	0,3482
В образцах с наполнителем Ba_2TiO_3 на линии 6	0,2198	0,0869	0,0868	0,0870	0,2094

Из табл. 3 видно, что наибольшее значение напряженности электрического поля наблюдается у образцов композиции без использования в составе клеящего компаунда наполнителя Ba_2TiO_3 . При введении в состав клеящего компаунда наполнителя Ba_2TiO_3 в количестве 70 % от его весовой части значение напряженности электрического поля в области острия иглы уменьшается практически в два раза. В средней части промежутка между иглами значения напряженностей электрического поля ниже на порядок и практически остаются на одном уровне. Такой же характер распределения напряженностей электрического поля наблюдается и в слоях 7,

8. Следует отметить, что по мере удаления от осевой линии (от слоя клеящего компаунда) значения максимальной напряженности поля уменьшаются. При этом их различие в образцах без наполнителя и с наполнителем сглаживается. Это хорошо видно из рис. 2, на котором представлено распределение напряженностей электрического поля по длине разрядного промежутка в слое клеящего компаунда без наполнителя (кривая 1) и с наполнителем Ba_2TiO_3 в составе клеящего компаунда (кривая 2).

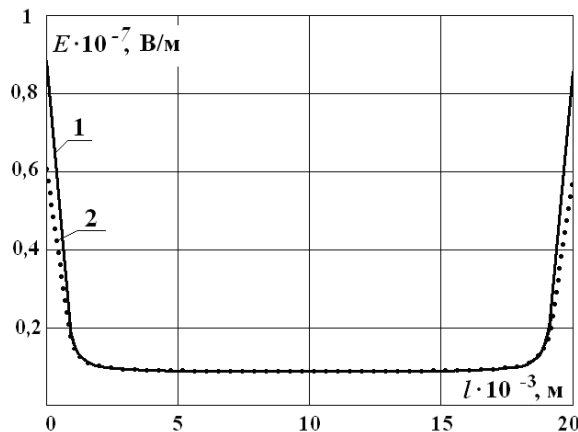


Рис. 2. Распределение напряженностей электрического поля по длине разрядного промежутка в слое клеящего компаунда в композиции на основе синтофлекса

На рис. 3 приведен график распределения напряженностей электрического поля в сечениях 1–3, перпендикулярных слою клеящего компаунда, удаленных от острия иглы на различное расстояние d .

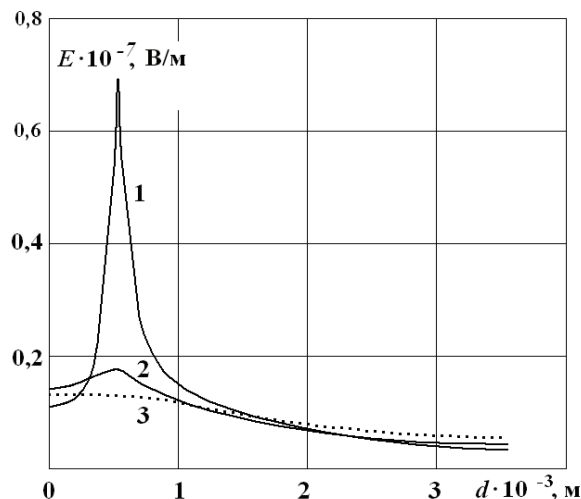


Рис. 3. Распределение напряженностей электрического поля в сечениях 1–3, перпендикулярных слою клеящего компаунда, на различном расстоянии от острия иглы в композиции на основе синтофлекса

Из рис. 3 видно, что изменение напряженности электрического поля по толщине образца d (в поперечном направлении) проходит через максимум на острие иглы. В сечении 2, удаленном от иглы на расстояние порядка 1 мм, значение напряженности

электрического поля в области иглы резко уменьшается и кривая распределения напряженностей электрического поля становится более полой и максимум сглаживается. Следует обратить внимание на характер распределения напряженностей поля в сечении 3. Видно, что в сечении 3 на расстоянии порядка 3...5 мм от острия иглы область наибольшей напряженности электрического поля смещается от острия иглы в сторону поверхности исследуемого материала. Возможно, это является причиной заглубления канала разряда в толщу исследуемого материала с последующим его выходом в виде трека на поверхность. Это соответствует результатам, полученным при исследовании развития разряда в образцах композиции ПММА – синтофлекс 616, приведенным на рис. 4.



Рис. 4. Пробой исследуемого материала и выход канала разряда на его поверхность в композиции ПММА – синтофлекс 616

Выводы

1. Показано, что введение наполнителя тонкодисперсного порошка Al_2O_3 , Ba_2TiO_3 и ЦТС в состав клеящего лака исследуемых композиций на основе синтофлекса приводит к увеличению величины их разрядного напряжения за счет перераспределения напряженностей электрического поля на границах раздела отдельных слоев. В композиционных материалах, обладающих повышенным значением диэлектрической проницаемости, соизмеримым с диэлектрической проницаемостью клеящего лака при введении в его состав наполнителя, значение разрядной напряженности практически не изменяется.
2. Подтверждено, что увеличение диэлектрической проницаемости клеящего компаунда за счет введения в его состав наполнителя вызывает уменьшение величины максимальной напряженности электрического поля у острия иглы, что затрудняет развитие разряда на границе раздела слоев.
3. Установлено, что заглубление канала разряда в толщу исследуемого материала с последующим его выходом на поверхность связано со смещением области наибольшей напряженности электрического поля вглубь материала при удалении ее от острия иглы в сторону внешней поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов В.И., Почивалова А.В. Особенности разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 313. — № 2. — С. 91–94.
2. Лысенко А.Н. Электрическая прочность границы раздела полимерной композиционной изоляции: дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 1986. — 168 с.
3. Электроизоляционные материалы // Каталог электроизоляционных материалов компании «Миг Сервис». 2010. URL: <http://migservice-spb.ru/index.php?id=197> (дата обращения: 02.10.2012).

4. Гефле О.С., Лебедев С.М., Похолков Ю.П. Барьерный эффект в диэлектриках. — Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. — 172 с.
5. Резвых К.А. Расчет электростатических полей. — М.: Энергия, 1967. — 120 с.
6. ELCUT® Программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Производственный кооператив ТОО, г. Санкт-Петербург, URL: <http://www.elcut.ru> (дата обращения: 02.10.2012).

Поступила 10.11.2012 г.

УДК 621.311.1.016

О НЕОБХОДИМОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В.С. Боровиков, Н.Н. Харлов, Т.Б. Акимжанов

Томский политехнический университет
E-mail: rcr@tpu.ru

Установлено, что в линиях электропередачи 110 кВ в условиях высокого искажения синусоидальности тока имеют место добавочные потери активной мощности и энергии от действия высших гармонических составляющих. Добавочные потери во многих случаях составляют значительную часть от основных потерь, но не учитываются в расчете технологических потерь электроэнергии. Сделан вывод о том, что добавочные потери активной мощности и энергии от действия высших гармонических составляющих необходимо рассчитывать для каждой конкретной линии на основе инструментального обследования параметров режима и утверждать как технологические потери.

Ключевые слова:

Основные и добавочные потери, эффективность транспорта электрической энергии, технологические потери.

Key words:

Main and stray-load losses, efficiency of electric power transport, process losses.

Введение

Многочисленные измерения параметров режима работы электрических сетей 110 кВ Сибири и энергосистем Юга показали, что токи большинства обследованных линий имеют высокий коэффициент искажения синусоидальности [1]. Искажения коэффициента синусоидальности тока в линиях электропередачи (ЛЭП), начиная уже с 10 %, вызывают негативные последствия, такие как искажения синусоидальности напряжения в узлах нагрузки, возникновение перенапряжений вдоль трассы линии, увеличение потерь активной мощности и энергии, ложную работу релейной защиты и автоматики энергосистемы [2, 3].

Влияние искажений синусоидальности тока на эффективность транспорта электрической энергии

Эффективность транспорта электрической энергии определяется такими основными показателями, как качество электрической энергии и ее потери.

Качество электрической энергии регламентируется ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электро-

магнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Потери электрической энергии можно разделить на две группы (рис. 1).



Рис. 1. Структура потерь электрической энергии

К технологическим потерям относятся все технические потери, расход на собственные нужды и недоучет электроэнергии, связанный с погрешностью приборов учета. К коммерческим потерям относятся разность между отпущенной в сеть электроэнергией и полученной потребителем с учетом технологических потерь.

Потери электрической энергии при протекании несинусоидальных токов по ЛЭП (токов высших