

УДК 621.315.3.61

ОЦЕНКА РОЛИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ТВЕРДЫХ СЛОИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.И. Меркулов, И.В. Ким

Томский политехнический университет

E-mail: mir742@enin.tpu.ru

Исследовано влияния частичных разрядов на развитие разряда на границе раздела твердых слоистых композиционных диэлектриков от времени воздействия приложенного переменного напряжения в системе электродов, создающих резко неравномерное электрическое поле. Установлено наличие трех этапов в развитии разряда на границе раздела исследуемых композиционных слоистых диэлектриков в зависимости от времени приложения напряжения. Показано, что изменение частоты следования частичных разрядов в процессе электрического старения отражает динамику развития разряда на границе раздела.

Ключевые слова:

Композиционные материалы, наполнитель, диэлектрическая проницаемость, слоистые диэлектрики, пробой, частичные разряды.

Key words:

Composite materials, filler, dielectric constant, layered dielectrics, breakdown, partial discharges.

В работах [1–3] показано, что одной из причин электрического старения органических диэлектриков является воздействие частичных разрядов, возникающих в воздушных включениях. Широко используемые в электротехнической промышленности в качестве электрической изоляции высоковольтных конструкций (вводов, трансформаторов, электрических машин и др.) различные композиционные материалы (стекло и лакоткани, синтофлекс, изофлекс, стекломиканит, текстолит, гетинакс и многие другие) имеют слоистую структуру. В процессе изготовления таких материалов на границе раздела различных слоев могут возникать микроскопические воздушные включения, расслоения и другие дефекты, в которых под воздействием электрического поля высокой напряженности могут развиваться частичные разряды. При испытании таких материалов в резко неравномерном продольном электрическом поле наряду с нормальной составляющей напряженности поля будет наблюдаться значительная тангенциальная составляющая, которая приведет к увеличению суммарной напряженности поля и, тем самым, может оказывать влияние на характер развития разряда.

В [4, 5] было показано, что при кратковременном (непрерывно возрастающем) напряжении развитие разряда на границе раздела таких слоистых композиционных материалов могло протекать по трем возможным направлениям. В первом случае, при толщине исследуемого материала не более 50 мкм, наблюдался пробой исследуемого материала и выход канала разряда на его поверхность. В других случаях, при толщине исследуемого материала порядка 100 мкм и более, развитие разряда происходило на границе раздела исследуемых материалов с подложкой или с эффектом заглужения канала разряда в исследуемый диэлектрик. В этом случае развитие разряда сопровождалось образованием трекового канала. Было предположено, что

определенную роль в развитии разряда и образовании треков могли оказывать частичные разряды или корона, возникающие около острия иглы или на границе раздела слоев. Данное предположение требует дополнительной проверки, что послужило основой для выполнения данной работы.

В данной работе проводилось исследование роли частичных разрядов в развитии разряда на границе раздела различных композиционных материалов при длительном воздействии приложенного переменного напряжения частотой 50 Гц. В качестве образцов использовалась комбинация из различных диэлектрических материалов (стеклолакоткань, изофлекс, синтофлекс, Votastop 2235, Votafix E 2102 и др.), наклеенных на подложку из полиметилметакрилата (оргстекла) размером 50×100 мм² и толщиной 3 мм с помощью эпоксидного компаунда холодного отверждения на основе смолы ЭДБ и отвердителя – полиэтиленполиамины. Характеристики исследуемых материалов приведены в [6]. В работе использовались образцы материалов со средней толщиной 150...180 мкм. Толщина слоя эпоксидного клея составляла порядка 180...200 мкм.

Для изменения соотношения нормальной и тангенциальной составляющих напряженностей электрического поля использовались две системы электродов: симметричная (игла–игла, когда иглы располагались на границе раздела исследуемого материала и подложки) и несимметричная (игла–край фольги, когда фольга располагалась сверху исследуемого материала). Количество образцов на точку составляло не менее 5. Во всех случаях расстояние между электродами составляло 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 закру-

гления порядка 40...60 мкм. Радиус закругления игл определялся с помощью горизонтального компаратора ИЗА-2 с точностью $\pm 0,5$ мкм. В образцах с несимметричной системой электродов игла–край фольги, поверх фольги для устранения развития разряда по поверхности наклеивался слой пленки ПЭТФ толщиной 50 мкм. В качестве фольги использовалась алюминиевая фольга толщиной 20 мкм, край которой для устранения острых кромок заворачивался в виде манжет. За радиус закругления края фольги принималась толщина фольги.

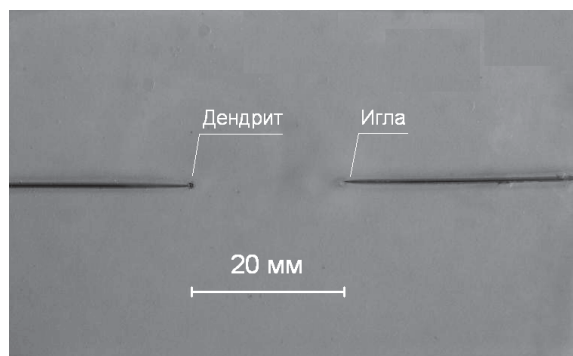
Перед испытанием во всех образцах оценивалось напряжение начала ионизации $U_{ни}$ и частота следования частичных разрядов n при напряжении 10 кВ. Далее на подготовленные таким образом образцы подавалось испытательное переменное напряжение величиной 0,8 и 0,9 от $U_{разр}$.

В результате проведенных исследований установлено, что после приложения к образцам напряжения начало развития разряда имеет локальный характер и, как правило, наблюдается в области расположения острия игл, т. е. в области с наибольшей напряженностью электрического поля (рис. 1).

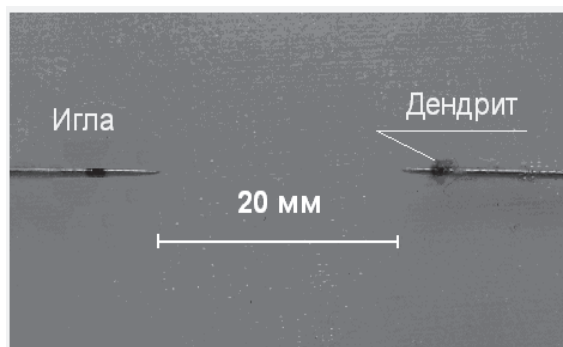
Как видно из рис. 1, развитие разряда сопровождается образованием дендритов шарообразной формы, наибольший размер которых имеет место

у острия с меньшим радиусом кривизны. Следует отметить, что в ряде случаев начало развития разряда и образование дендритов шарообразной формы могло наблюдаться на некотором расстоянии от острия иглы (рис. 1, б). Это, по-видимому, обусловлено неровностью поверхности самих игл либо наличием каких-то загрязнений в составе клеящего лака композиции или микроскопических воздушных пузырьков на поверхности игл.

При увеличении времени воздействия приложенного напряжения дальнейшее развитие разряда замедляется. Можно предположить, что это связано с уменьшением напряженности электрического поля в местах образования разрядных структур в виде шарообразных дендритов. По мере увеличения времени воздействия приложенного напряжения дальнейший рост каналов разряда зависит от материала композиции. Так, в композиции оргстекло–стеклолакоткань развитие разряда сопровождается увеличением размеров дендритов шарообразной формы в области острия игл, что показано на рис. 2, а. Такая же картина чаще всего имела место и в композициях оргстекло–синтофлекс 828, оргстекло–синтофлекс 616 и оргстекло–Votafix® Е 2102. В композиции оргстекло–слюдопласт развитие разряда характеризуется образованием ветвистых каналов дендрита на границе раздела (рис. 2, б).

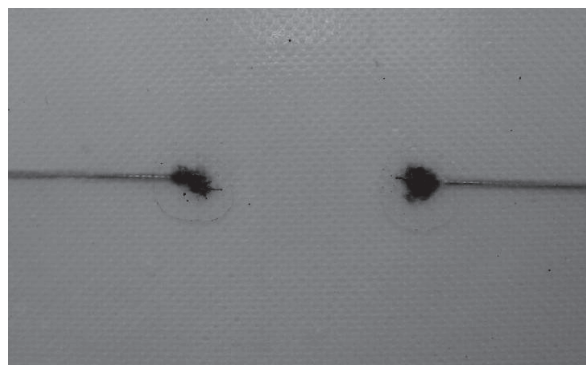


а

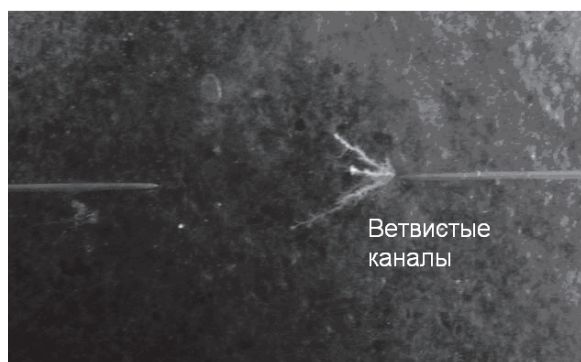


б

Рис. 1. Начальный этап развития разряда после приложения напряжения в композициях: а) оргстекло–лавсан; б) оргстекло–стеклолакоткань



а



б

Рис. 2. Развитие разряда при увеличении уровня воздействующего напряжения в композициях: а) оргстекло–стеклолакоткань; б) оргстекло–слюдопласт

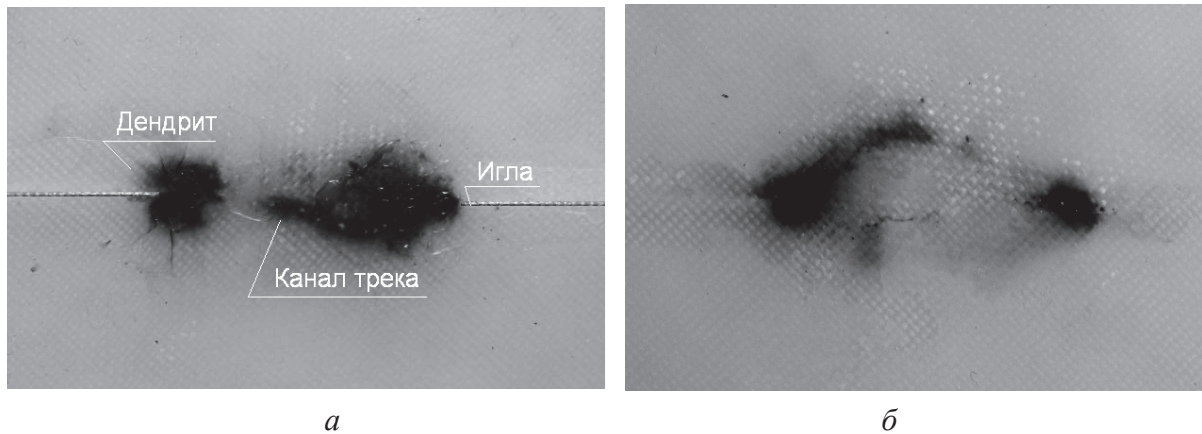


Рис. 3. Рост шарообразного дендрита (а) и образование канала трека на границе раздела слоев (б) в композиции оргстекло–стеклолакоткань



Рис. 4. Пробой исследуемого материала и выход канала разряда на его поверхность в композиции оргстекло–синтофлекс 616 (а) и развитие трекового канала на границе раздела слоев в композиции оргстекло–изофлекс (б)

В композиции оргстекло–стеклолакоткань дальнейшее увеличение времени воздействия приложенного напряжения может сопровождаться выходом канала разряда на поверхность материала (рис. 3, а) или развитием трековых каналов,двигающихся навстречу друг другу от одной иглы к другой (рис. 3, б).

В композициях оргстекло–синтофлекс 828, оргстекло–синтофлекс 616, оргстекло–Votafix® E 2102, оргстекло–ПЭТФ, оргстекло–имидофлекс, оргстекло–Votastop 2235 после образования шарообразного дендрита наиболее часто происходит пробой исследуемого материала с выходом канала разряда на его поверхность (рис. 4, а). Другим примером является развитие разряда в композиции оргстекло–изофлекс, когда после образования шарообразного дендрита практически всегда наблюдается развитие трекового канала в толще исследуемого материала на границе раздела полиимидных пленок и клеящего лака (рис. 4, б).

Использование несимметричной системы электродов (игла–фольга) в сравнении с симметричной системой не оказывает существенного влияния на время до пробоя. Однако было установлено, что при использовании несимметричной системы электродов на начальном этапе электрического старения вместо шарообразных дендритов происходит образование разрядных структуры в виде петли (рис. 5), а в процессе старения значительно увеличивается

количество образцов исследуемых композиций, у которых наблюдается прорастание канала разряда с его выходом на поверхность. Такой механизм наиболее часто наблюдается в образцах оргстекло–синтофлекс. В образцах других композиций развитие разряда практически всегда начинается с образования шарообразного дендрита у острия иглы.

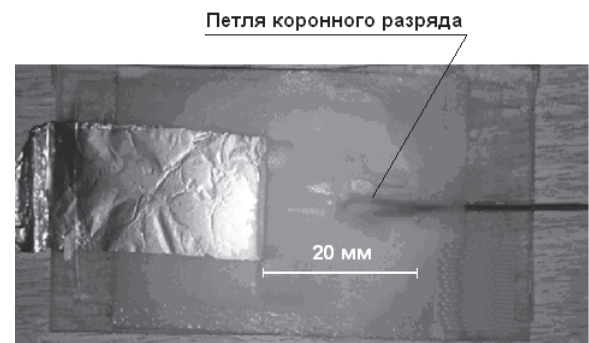


Рис. 5. Характер развития разряда на границе раздела слоев при несимметричной системе электродов в композиции оргстекло–синтофлекс

Было предположено, что изменение характера разряда связано с увеличением тангенциальной (продольной) составляющей напряженности электрического поля за счет несимметричности расположения электродов относительно друг друга.

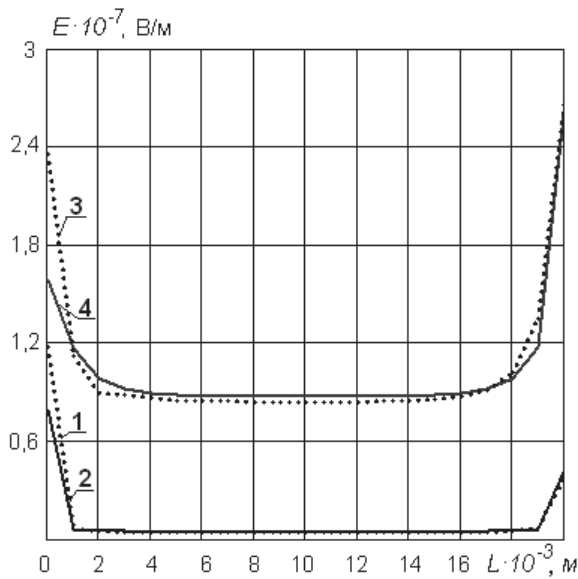


Рис. 6. Распределение напряженностей электрического поля по длине разрядного промежутка L для композиции оргстекло–изофлекс при напряжении 10000 В (кривые 1, 2) и напряжении 20000 В (кривые 3, 4) для симметричной (кривые 2, 4) и несимметричной системы электродов (кривые 1, 3)

Для оценки величины напряженности электрического поля и ее распределения по длине разрядного промежутка в исследуемых композициях производился расчет с использованием программы *E/cut* [7]. Результаты расчета представлены на рис. 6.

Как следует из рис. 6, использование несимметричной системы электродов игла–фольга действительно приводит к некоторому возрастанию значения напряженности электрического поля у острия иглы (кривые 1, 3) за счет увеличения тангенциальной (продольной) составляющей напряженности поля согласно проведенным расчетам. При увеличении приложенного к образцам испытательного напряжения от 20 до 24 кВ значения напряженностей электрического поля возрастают практически в два раза, что согласуется с уменьшением времени до пробоя.

Ранее нами было предположено, что образование дендритов шарообразной формы и продвижение трековых каналов может быть связано с развитием ионизации в области расположения острия игл. Для проверки данного предположения проводилось измерение частоты следования частичных разрядов в процессе электрического старения исследуемых образцов при напряжениях 10, 11 и 12 кВ. Измерение характеристик частичных разря-

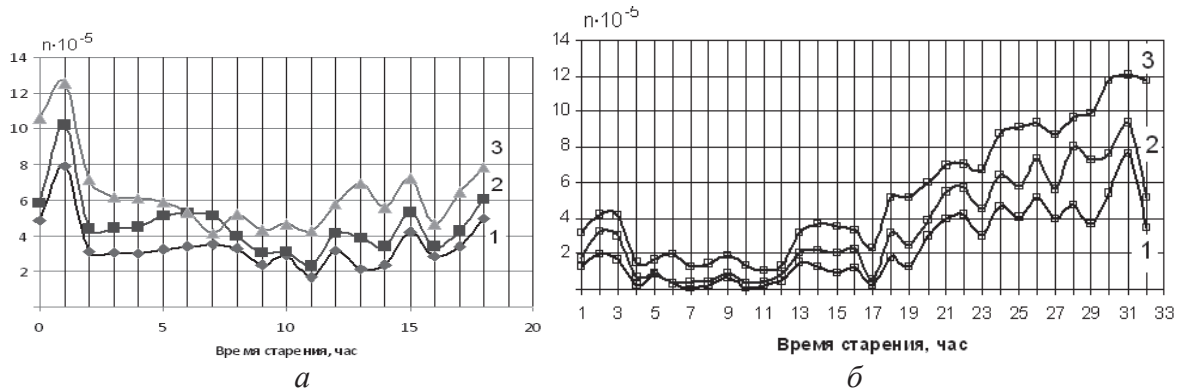


Рис. 7. Зависимость частоты следования частичных разрядов n от времени электрического старения для композиции оргстекло–изофлекс при температуре 20 °С и напряжениях а) 20; б) 24 кВ. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют напряжениям 10, 11 и 12 кВ, при которых проводились измерения

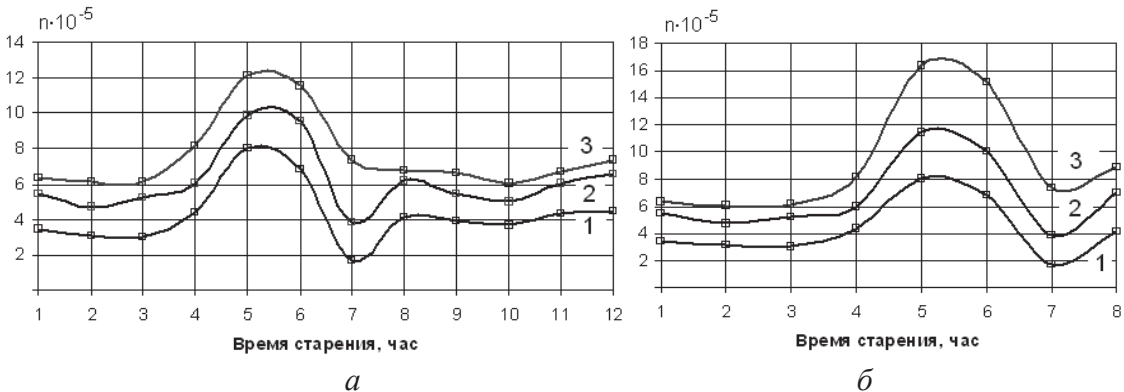


Рис. 8. Зависимость частоты следования частичных разрядов от времени электрического старения для композиции оргстекло–синтофлекс при температуре 20 °С и напряжениях а) 20; б) 24 кВ. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют напряжениям 10, 11 и 12 кВ, при которых проводились измерения

дов (ХЧР) проводилось по известной методике [3, 6] с помощью электронно-счетного частотомера ЧЗ–34 и осциллографа С1–55 с чувствительностью 0,01 В/мм. Измерения показали, что напряжение начала ионизации для исследуемых образцов составляло порядка 5...8 кВ, что соответствует напряженности электрического поля у острия игл порядка $(2,67...4,27) \cdot 10^7$ В/м при радиусе иглы 40 мкм. Расчет напряженности электрического поля на острие иглы производился по уравнению [8, 9].

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

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

Следует отметить, что приведенное уравнение не учитывает влияние материала среды (диэлектрика) на величину напряженности электрического поля. Более точные результаты расчета напряженности электрического поля дает программа *El-cut*, согласно которой величина напряженности поля на острие иглы при напряжении 10000 В составляет порядка $(0,8...1,2) \cdot 10^7$ В/м.

Результаты измерения частоты следования частичных разрядов представлены на рис. 7 и 8.

Из рис. 7, 8 следует, что на начальном этапе электрического старения частота следования частичных разрядов несколько возрастает, что соответствует началу формирования шарообразного дендрита. При увеличении значения приложенного испытательного напряжения с 20 до 24 кВ это возрастание частоты следования частичных разрядов на начальном этапе происходит более резко как в композиции оргстекло–изофлекс, так и в композиции оргстекло–синтофлекс. В дальнейшем в процессе формирования шарообразного дендрита или разрядной структуры в виде петли частота следования частичных разрядов уменьшается, что свидетельствует об уменьшении на данном участке напряженности электрического поля. Следует отметить, что образование шарообразного дендрита в композиции оргстекло–изофлекс наблюдается в течение первых двух часов старения, тогда как в композиции оргстекло–синтофлекс формирование разрядной структуры в виде петли требует времени порядка 5 часов. Было предположено, что это связано с пропиткой синтофлекса эпоксидным клеем, за счет чего интенсивность частичных разрядов на начальном этапе уменьшена, однако далее она возрастает и достигает максимальной величины при формировании разрядной структуры.

При дальнейшем увеличении времени воздействия напряжения после формирования разрядной структуры и, как уже отмечалось, за счет уменьше-

ния напряженности электрического поля на данном участке, частота следования частичных разрядов несколько уменьшается, а далее остается практически на одном уровне или слабо возрастает с течением времени. Исключением является комбинация оргстекло–изофлекс при напряжении 24 кВ, при котором частота следования частичных разрядов постоянно растет со временем старения. Возможно, это обстоятельство обусловлено прорастанием трекового канала на границе раздела слоев исследуемой композиции, сопровождаемое усилением ионизации.

Выводы

1. Показано, что путь развития пробоя (разряда) в процессе электрического старения имеет различный вид в зависимости от типа материала исследуемых композиции. Для большинства композиций оргстекло–стеклоакоткань, оргстекло–синтофлекс, оргстекло–Votafix E2102 развитие разряда сопровождается пробоем исследуемого материала и выходом канала разряда на поверхность. Для композиций оргстекло–изофлекс, оргстекло–слоупласт развитие разряда сопровождается заглублением канала разряда в толщу исследуемых материалов и образованием трещин в их толще.
2. Установлено, что характер развития разряда определяется степенью неравномерности электрического поля. При использовании несимметричной системы электродов по сравнению с симметричной системой происходит увеличение продольной (тангенциальной) составляющей напряженности электрического поля, что обуславливает некоторое уменьшение времени до пробоя исследуемых композиционных материалов и образование разрядных структур в виде петли или усов.
3. На начальном этапе электрического старения в области расположения острия иглы или края фольги, где имеет место максимальная напряженность электрического поля, наблюдается образование дендритов шарообразной формы или дендритов в виде петли и усов. Образование таких разрядных структур приводит к уменьшению напряженности электрического поля у острия игл и края фольги и замедляет дальнейшее развитие канала разряда.
4. Установлено, что изменение частоты следования частичных разрядов в процессе электрического старения отражает динамику развития разряда на границе раздела исследуемых слоистых диэлектриков, но не является определяющим механизмом в процессе электрического старения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.
2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 223 с.
3. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. – М.; Л.: Энергия, 1968. – 287 с.
4. 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.
5. Лысенко А.Н. Электрическая прочность границы раздела полимерной композиционной изоляции: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1986. – 168 с.
6. Электроизоляционные материалы // Каталог группы компаний по поставке электроизоляционных материалов. 2010. URL: <http://www.electroelmika.ru/catalog> (дата обращения: 25.01.2011).
7. ELCUT® Программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Производственный кооператив ТОР, г. Санкт-Петербург, URL: <http://www.elcut.ru> (дата обращения: 02.10.2012).
8. Гефле О.С., Лебедев С.М., Похолков Ю.П. Барьерный эффект в диэлектриках. – Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 172 с.
9. Резвых К.А. Расчет электростатических полей. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.

Поступила 15.11.2012 г.

УДК 621.311.1.016

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Н.Н. Харлов, Т.Б. Акимжанов

Томский политехнический университет

E-mail: rcr@tpu.ru

Исследовано изменение активного сопротивления фильтровых реакторов при регулировании их индуктивности. Установлено, что в реакторах помимо омического сопротивления, зависящего от количества витков, имеются составляющие, зависящие от поверхностного эффекта, гистерезиса, вихревых токов. Также произведена оценка эффективности работы фильтрокомпенсирующих устройств на основе данных, полученных при их инструментальном обследовании. Сделан вывод о необходимости учета изменения перечисленных параметров при проектировании и настройке фильтрокомпенсирующих устройств. Показано, что эффективность работы фильтрокомпенсирующих устройств может быть объективно оценена в результате суточного мониторинга режимов.

Ключевые слова:

Высшие гармоники, фильтрокомпенсирующее устройство, реактор, эффективность фильтрации.

Key words:

Higher harmonics, filter device, reactor, filtration efficiency.

Горнодобывающая промышленность относится к одной из наиболее энергоёмких отраслей экономики. Основными электроприёмниками при этом являются подъемные машины с электроприводом постоянного тока, работающие от управляемых выпрямителей. Работа управляемых выпрямителей сопровождается потреблением из питающей сети реактивной мощности и высших гармонических составляющих тока, который, протекая по элементам предвключенной сети, вызывает искажения питающего напряжения. Несинусоидальность тока и напряжения является причиной возникновения добавочных потерь электроэнергии, износа и сокращения срока службы изоляции и электрооборудования, ухудшения работы устройств релейной защиты и автоматики и снижения надежности, и, как следствие, – экономического ущерба [1–3].

Традиционным средством борьбы с высшими гармоническими составляющими тока и напряжения является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), состоящих из реактора

и комплекта конденсаторов, настраиваемых на резонансную частоту. Схема одной из цепочек ФКУ приведена на (рис. 1).

Эффективность работы ФКУ обеспечивается его настройкой на одну из частот гармонических составляющих, т. е. на частоту, при которой входное сопротивление ФКУ имеет минимальное значение. Помимо соотношения между индуктивностью и емкостью, на величину входного сопротивления фильтра влияют также:

- поверхностный эффект в проводниках реактора;
- гистерезис, вызывающий потери в магнитопроводе реактора;
- вихревые токи в магнитопроводе реактора;
- зависимость индуктивного сопротивления от насыщения стали магнитопровода реактора.

Угол диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и диэлектрическая проницаемость ϵ изоляции конденсаторов, используемых в конструкции ФКУ, до частот 10^3 – 10^4 Гц сохраняются неизменными и не влияют на величину входного сопротивления фильтра [4].