

УДК 621.319.4

## Современные импульсные высоковольтные конденсаторы с пленочным диэлектриком

И. В. Ермилов

ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина», Москва, Россия

*Представлены результаты разработки серии высоковольтных импульсных пленочных конденсаторов с удельной энергией 0,1—0,3 Дж/г, предназначенных для промышленных импульсных технологий и лазерных установок.*

В последние годы определенное развитие получили импульсные электротехнологии, основанные на свойствах сильноточного импульсного разряда, протекающего через катушку индуктивности, газовую или жидкую среду. К указанным технологиям можно отнести магнитную штамповку, дробление породы, очистку металлических отливок и пр. [1].

Все большее развитие получают также лазерные технологии, которые используются как в промышленности, так и в медицине.

В этих технологиях в качестве одного из основных элементов оборудования применяются импульсные высоковольтные конденсаторы. Расширяющийся круг применения импульсных и лазерных технологий предъявляет новые повышенные требования и к техническим характеристикам импульсных конденсаторов. Эти требования связаны с увеличением удельной энергии, ресурса, рабочей частоты конденсаторов, снижением  $\text{tg}\delta$ , собственной индуктивности и внутреннего сопротивления. Удовлетворить эти требования полностью, применяя традиционную для импульсных конденсаторов бумажно-масляную изоляцию, не представляется возможным из-за сравнительно высоких диэлектрических потерь бумажной изоляции. Положение осложняется еще и тем, что в последние годы ни в России, ни в странах СНГ, ни в Европе высококачественная конденсаторная бумага не выпускается. Поэтому разработанные на основе этой бумаги в конце 80-х гг. импульсные высоковольтные конденсаторы типов ИК и ИКМ с удельной энергией 0,2—0,3 Дж/г, как и другие импульсные конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией, в настоящее время в России не производятся.

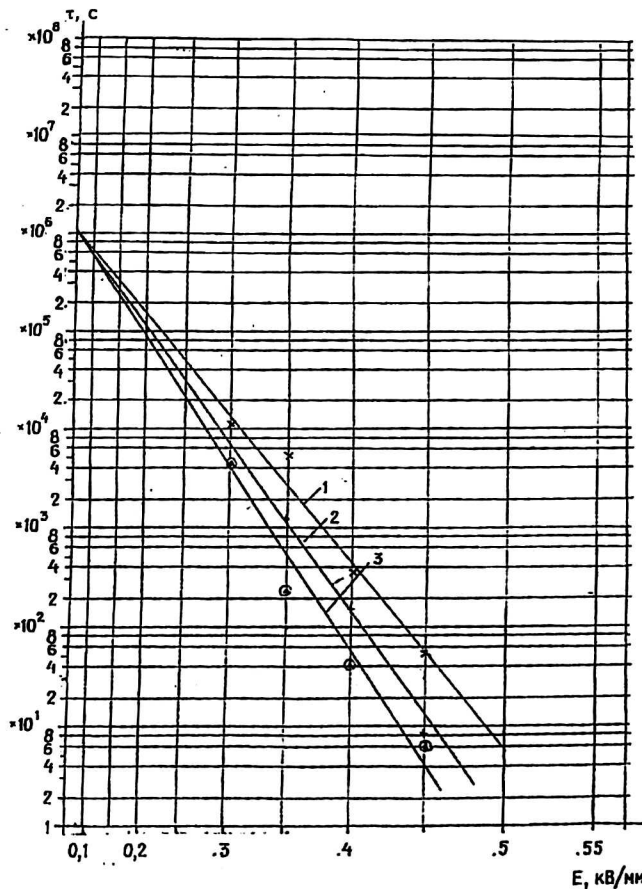
ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина» (ВЭИ) совместно с фирмой «Русская технологическая группа» были проведены работы по созданию серии пленочных конденсаторов с удельной энергией 0,1; 0,2; 0,3 Дж/г для импульсных технологий, а также серии малоиндуктивных высокочастотных конденсаторов для лазерных технологий.

Важная составная часть этих работ — исследования, направленные на более глубокое понимание физических механизмов, определяющих старение пленочных конденсаторов в процессе их эксплуатации. Характерной особенностью физических процессов в изоляции конденсаторов высокой удельной энергии является весьма высокая напряженность электрического поля, на порядок превосходящая рабочую напряженность поля в других электрических аппаратах, например трансформаторах, и составляющая 250—300 кВ/мм. Изучение поведения изоляции при таких экстремальных величинах электрического поля позволяет более глубоко понять природу кратковременной прочности изоляции, что представляет практический интерес не только для конденсаторостроения, но и для проектирования внутренней изоляции

большинства электрических аппаратов, подвергающихся экстремальным воздействиям электрического поля в процессе типовых испытаний, а также при грозовых и коммутационных перенапряжениях.

В процессе разработки конденсаторов были проведены исследования зависимости времени жизни полиэтилентерефталатной (ПЭТ КЭ) пленки от напряженности поля. Исследования проводились в стандартной системе электродов (по ГОСТ 6433.3—71), верхние и нижние электроды закрывались конденсаторной фольгой толщиной 7 мкм. Складки фольги разглаживались, и между электродами помещался исследуемый диэлектрик. Напряжение, подаваемое на электроды, поднималось со скоростью  $\sim 0,5$  кВ/с до уровня, соответствующего заданной напряженности. Далее напряжение фиксировалось и поддерживалось автоматически неизменным с точностью 0,1 %. После пробоя диэлектрика регистрировалось его время жизни.

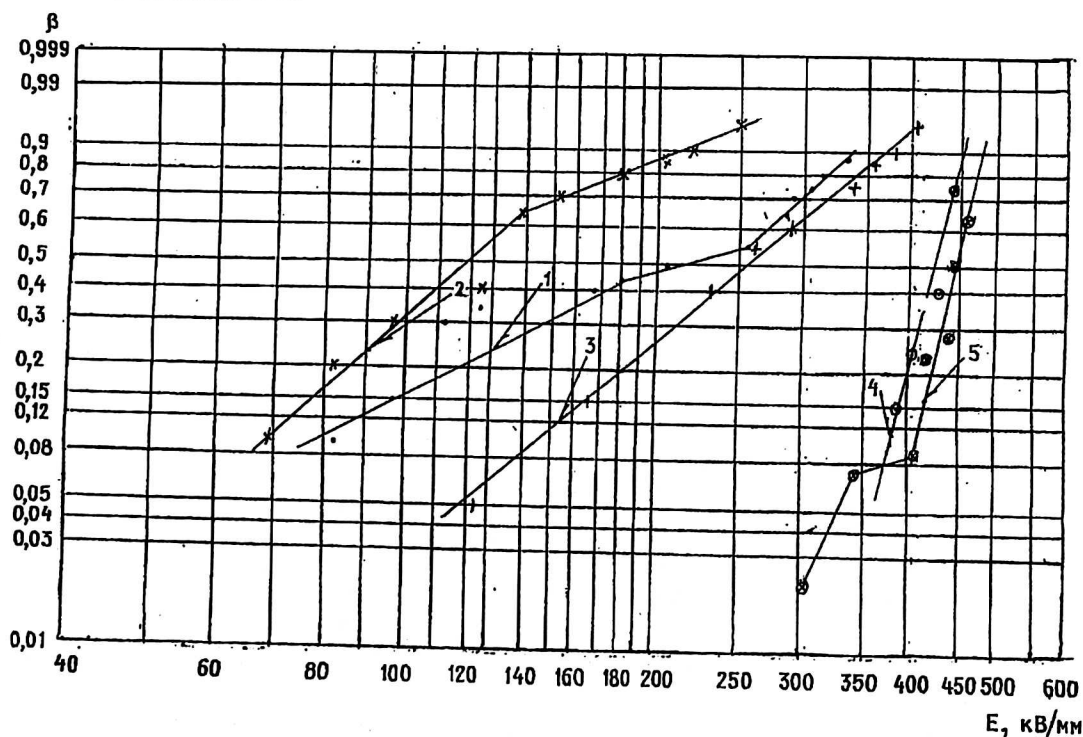
Из экспериментальных данных, представленных на рис. 1, видно, что они удовлетворительно описываются уравнением прямой линии в системе координат, в которой время откладывается на логарифмической шкале, а напряженность поля — на квадратичной. Объяснение такой зависимости дано в работе [2]. Вольт-секундные характеристики сухой пленки разных производителей (см. рис. 1) близки между собой и имеют одинаковую энергию активации разрушения связей, равную  $1,8 \cdot 10^{-19}$  Дж, т. е. примерно 1,1 эВ.



**Рис. 1.** Зависимость времени жизни ПЭТ КЭ пленки различной толщины от напряженности поля при вероятности пробоя  $\beta = 0,5$ :  
 1 —  $\delta = 7,0$  мкм (ВЗПМ); 2 —  $\delta = 7,2$  мкм (завод «Кетон»); 3 —  $\delta = 8,4$  мкм (ВЗПМ).  
 Система электродов выполнена по ГОСТ 6433.3—71

Один из существенных моментов, влияющих на качество изготовления конденсаторов, — зависимость электрической прочности непропитанной ПЭТ КЭ пленки от наличия пыли на электродах. Идея проведенных исследований заключалась в том, чтобы путем отбраковки получить образцы пленки, заведомо не имеющие дефектов, связанных с их структурой или влиянием пыли, а затем нанести на поверхность пленки комнатную пыль тонким слоем ( $\sim 0,001$  г/см<sup>2</sup>) и измерить электрическую прочность пленки со слоем пыли при разном механическом давлении электрода на образец пленки.

На рис. 2 приведены зависимости вероятности пробоя ПЭТ КЭ пленки (г. Владимир). Кривая 5 — это зависимость вероятности пробоя исходной пленки (без отбраковки) от напряженности электрического поля. Кривая 4 иллюстрирует зависимость вероятности пробоя в пленке, отбракованной напряжением 2,5 кВ. Кривая 3 представляет эту зависимость вероятности пробоя от напряженности поля вначале отбракованной, а затем специально запыленной пленки. Запыление производилось комнатной пылью, отобранной с запыленной металлической поверхности, находившейся в течение нескольких недель в комнате на высоте около 2 м от пола. Механическая нагрузка на пленку создавалась только собственной массой верхнего электрода, масса которого составляла 0,1 кг. Кривые 1 и 2 были получены при тех же условиях, что и кривая 3, за исключением механического давления. В одной из серий экспериментов (кривая 2) механическая нагрузка на электрод составляла 1,4 кг, в другой серии (кривая 1) эта нагрузка прикладывалась к электроду только в течение 5 с.



**Рис. 2. Кривые зависимости вероятности пробоя ПЭТ КЭ пленки толщиной 7,2 мкм от напряженности поля, давления электрода и запыленности:**

- 1 — механическое воздействие на запыленную пленку 1,4 кг в течение 5 с, далее 0,1 кг;
- 2 — механическое воздействие на 1,4 кг в течение всего опыта; 3 — механическое воздействие на запыленную пленку 0,1 кг в течение всего опыта; 4 — пленка без пыли, отбракована напряжением 2,5 кВ, механическое воздействие 0,1 кг; 5 — пленка без пыли, по напряжению не отбраковывалась

Как видно из вышеприведенных данных, пыль существенно влияет на электрическую прочность ПЭТ КЭ пленки, снижая ее минимальное значение в три—пять раз. Следует подчеркнуть, что достаточно кратковременного воздействия сравнительно небольшого механического давления (в нашем случае порядка  $0,3 \text{ кгс/см}^2$ ) в течение короткого времени, чтобы повредить пленку и значительно снизить ее электрическую прочность.

Вероятно, такое сильное влияние пыли объясняется тем, что в ее состав входят мельчайшие частицы песка размерами менее  $10 \text{ мкм}$ , обладающие острыми гранями, которые повреждают пленку даже при кратковременном приложении к электродам сравнительно небольшой механической нагрузки.

На рис. 3 приведены зависимости вероятности времени жизни ПЭТ КЭ пленки (г. Владикавказ) от напряженности поля и влажности окружающей среды, на рис. 4 — зависимость от напряженности поля при различной влажности  $B$  и вероятности времени жизни пленки (г. Владикавказ)  $\beta = 0,5$ . Как видно из рисунков, влажность существенным образом влияет также на электрическую прочность пленки.

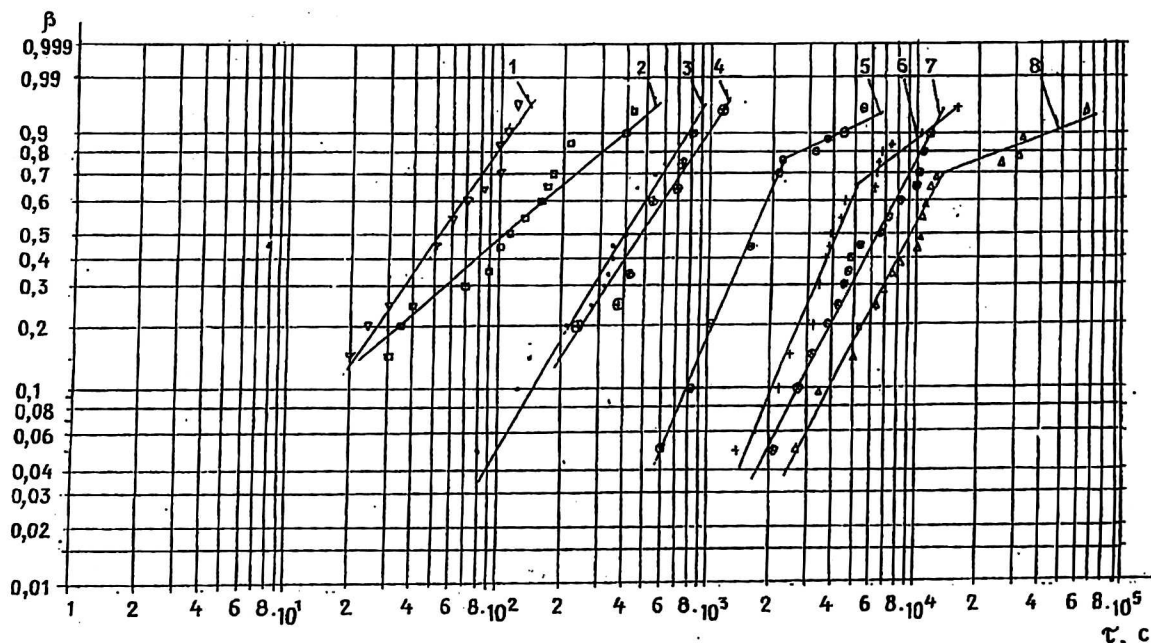


Рис. 3. Зависимость вероятности времени жизни ПЭТ КЭ пленки толщиной  $7,4 \text{ мкм}$  от напряженности поля и влажности:

- 1 —  $E = 450 \text{ кВ/мм}$ ;  $B = 60 \%$ ;  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 2 —  $E = 450 \text{ кВ/мм}$ ;  $B = 50 \%$ ;  $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 3 —  $E = 400 \text{ кВ/мм}$ ;  $B = 60 \%$ ;  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 4 —  $E = 450 \text{ кВ/мм}$ ;  $B = 50 \%$ ;  $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 5 —  $E = 350 \text{ кВ/мм}$ ;  $B = 62 \%$ ;  $T = 15-17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 6 —  $E = 300 \text{ кВ/мм}$ ;  $B_{\text{ср}} = 61,5 \%$ ;  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 7 —  $E = 300 \text{ кВ/мм}$ ;  $B_{\text{ср}} = 55 \%$ ;  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 8 —  $E = 300 \text{ кВ/мм}$ ;  $B_{\text{ср}} = 50 \%$ ;  $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$

Далее были проведены исследования ПЭТ КЭ пленки, пропитанной различными жидкими диэлектриками. Изучалась зависимость вероятности времени жизни ПЭТ КЭ пленки от напряженности поля и характеристик пропитывающей жидкости.

Методика исследований заключалась в следующем. Изготавливалась диэлектрическая система конденсаторного типа, состоящая из двух алюминиевых фольг толщиной  $7 \text{ мкм}$ , между которыми находилась ПЭТ КЭ пленка. Изоляция проходила сушку при температуре  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  не менее  $24 \text{ ч}$ . Далее производилась заливка диэлектрика предварительно вакуумированной жидкостью

(24 ч при температуре 70 °С), затем изоляция пропитывалась в вакууме в течение 24 ч при температуре 70 °С. Для проведения эксперимента полученная изоляция нарезалась на куски размером 120x120 мм и помещалась между стандартными электродами. Верхний лист алюминиевой фольги аккуратно поднимался вверх до контакта с боковой и верхней поверхностями электрода малого диаметра (верхнего). В остальном методика была такой же, что и при исследовании непропитанной пленки.

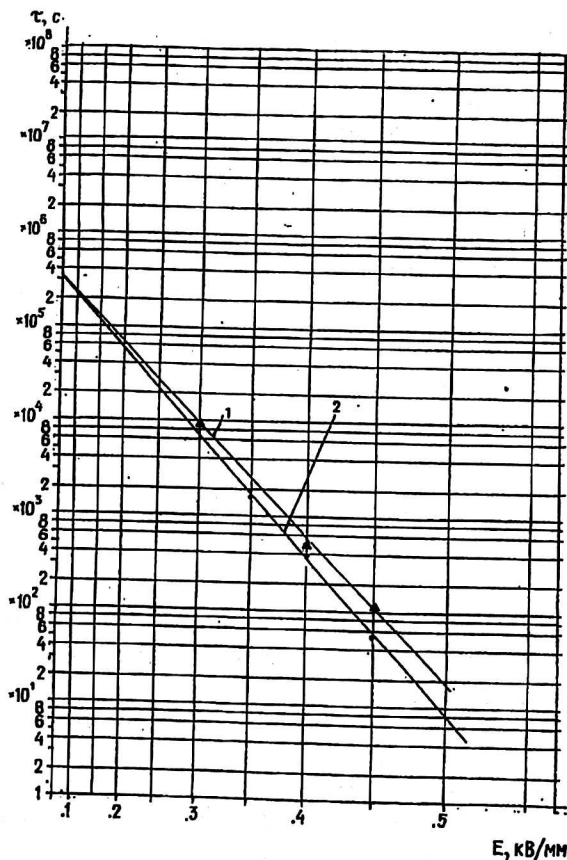


Рис. 4. Зависимость времени жизни ПЭТ КЭ пленки толщиной 7,4 мкм от напряженности поля и влажности при  $\beta = 0,5$ :  
1 —  $V = 50\%$ ; 2 —  $V = 60\%$

В качестве пропитывающей жидкости использовался фенилксиллэтан (ФКЭ).

Часть полученных данных приведена на рис. 5, из которого видно, что экспериментальные данные в основном описываются по закону Вейбулла, за исключением кривой 6. При заданных вероятности пробоя и напряженности поля пленка, пропитанная ФКЭ с добавкой эпоксидного стабилизатора ERL 4221, имеет время жизни в 2,5÷4 раза меньшее, чем та же пленка, пропитанная жидкостью АЗИ (АЗИ — отечественный аналог ФКЭ, не содержащий стабилизирующей добавки). Прослеживается также тенденция к увеличению этого отношения при уменьшении вероятности времени жизни.

По данным, полученным на рис. 5, а также по другим данным, были построены (при заданной вероятности) зависимости времени жизни ПЭТ КЭ пленки толщиной 7,2 мкм (ОАО «Кетон») от напряженности поля и типа пропитывающей жидкости.

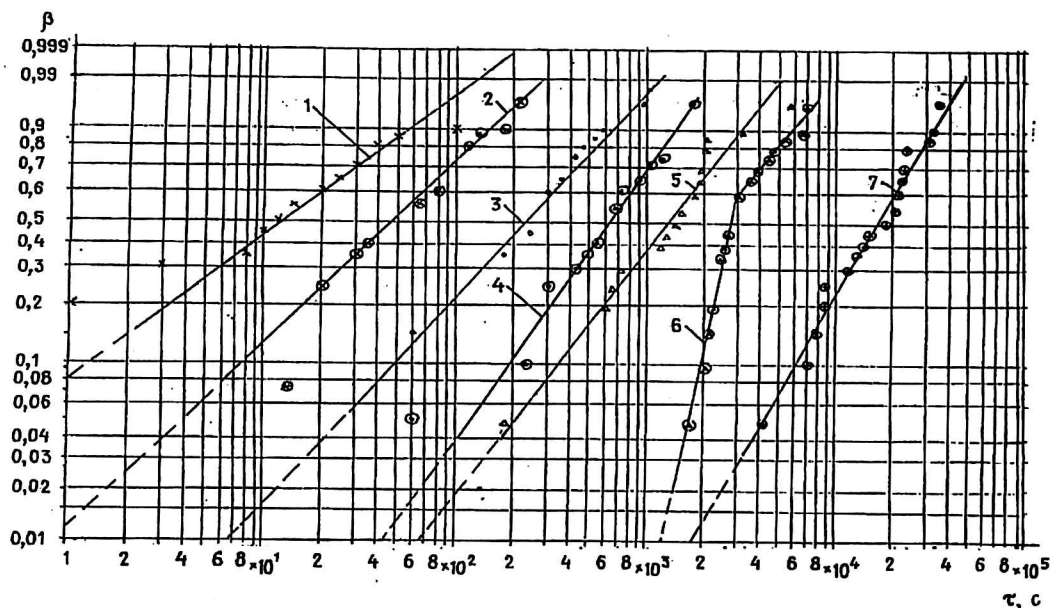


Рис. 5. Зависимость вероятности времени жизни ПЭТ КЭ пленки от напряженности поля и пропитывающей жидкости:

- 1 — ФКЭ + 1,5 % ERL 4221,  $E = 525$  кВ/мм; 2 — АЗИ,  $E = 525$  кВ/мм;  
 3 — ФКЭ + 1,5 % ERL 4221,  $E = 450$  кВ/мм; 4 — АЗИ,  $E = 450$  кВ/мм;  
 5 — ФКЭ + 1,5 % ERL 4221,  $E = 400$  кВ/мм; 6 — АЗИ,  $E = 400$  кВ/мм;  
 7 — ФКЭ + 1,5 % ERL 4221,  $E = 350$  кВ/мм.

Система электродов выполнена по ГОСТ 6433.3—71

Полученные данные, как и в случае непропитанной пленки, удовлетворительно описываются прямой линией в квадратично-логарифмической системе координат. Энергия активации, как видно из рис. 6, имеет такое же значение, как и у сухой пленки. Это говорит о том, что время жизни пропитанной изоляции определяется не пропитывающей жидкостью, а твердой изоляцией. При той же напряженности поля время жизни ПЭТ КЭ пленки, пропитанной АЗИ, на порядок выше, чем непропитанной, что видно из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 6 и 1, соответственно. Следует заметить, что при временах жизни пропитанной пленки более 1000 с, зависимость  $\ln \tau = f(E^2)$  отклоняется от прямолинейной. Вероятно, это связано с тем, что из-за частичных разрядов в ФКЭ напряжение на слое пропитки в исследованном диапазоне напряжений меняется слабо [3]. В связи с этим при уменьшении подаваемого на электроды напряжения напряжение на ПЭТ КЭ пленке уменьшается сильнее, чем подаваемое напряжение.

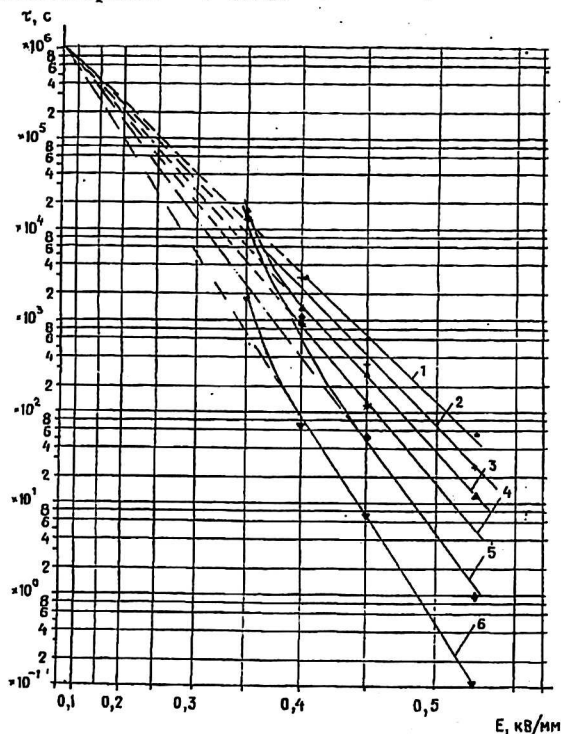
Из рис. 6 следует, что по мере увеличения содержания эпоксидной добавки ERL 4221 в ФКЭ время жизни уменьшается в 2—4 раза при одинаковой напряженности поля. В целом надо отметить, что данные, приведенные на рис. 1—6, однозначно свидетельствуют, что добавка эпоксидного стабилизатора отрицательно влияет на электрические характеристики ПЭТ КЭ пленки, пропитанной ФКЭ.

Были проведены также исследования влияния стабилизирующей добавки на электрическую прочность макетных секций конденсаторов. Методика исследования заключалась в том, что наматывались макеты секций конденсатора площадью  $0,33 \text{ м}^2$  различной толщины, а далее часть секций в сухом виде (20 шт.) пробивалось. Напряжение на секции подавалось со скоростью

0,5 кВ/с. Оставшиеся секции в сухом виде отбраковывались при напряженности поля 215—225 кВ/мм. Затем секции пропитывались ФКЭ со стабилизирующей добавкой и жидкостью АЗИ без стабилизатора. Количество секций в одном эксперименте составляло 20 шт., толщина изоляции секций 28—42 мкм, толщина отдельного листа диэлектрика — 7 мкм.

**Рис. 6. Зависимость времени жизни ПЭТ КЭ пленки толщиной 7,2 мкм (завод «Кетон») от напряженности поля и пропитывающей жидкости при различных вероятностях:**

- 1 — АЗИ,  $\beta = 0,5$ ;
  - 2 — ФКЭ + 0,5 % ERL 4221,  $\beta = 0,5$ ;
  - 3 — ФКЭ + 1,5 % ERL 4221,  $\beta = 0,5$ ;
  - 4 — АЗИ + 10 % ERL 4221,  $\beta = 0,5$ ;
  - 5 — АЗИ,  $\beta = 0,01$ ;
  - 6 — ФКЭ + 1,5 % ERL 4221,  $\beta = 0,01$ .
- Система электродов выполнена по ГОСТ 6433.3—71

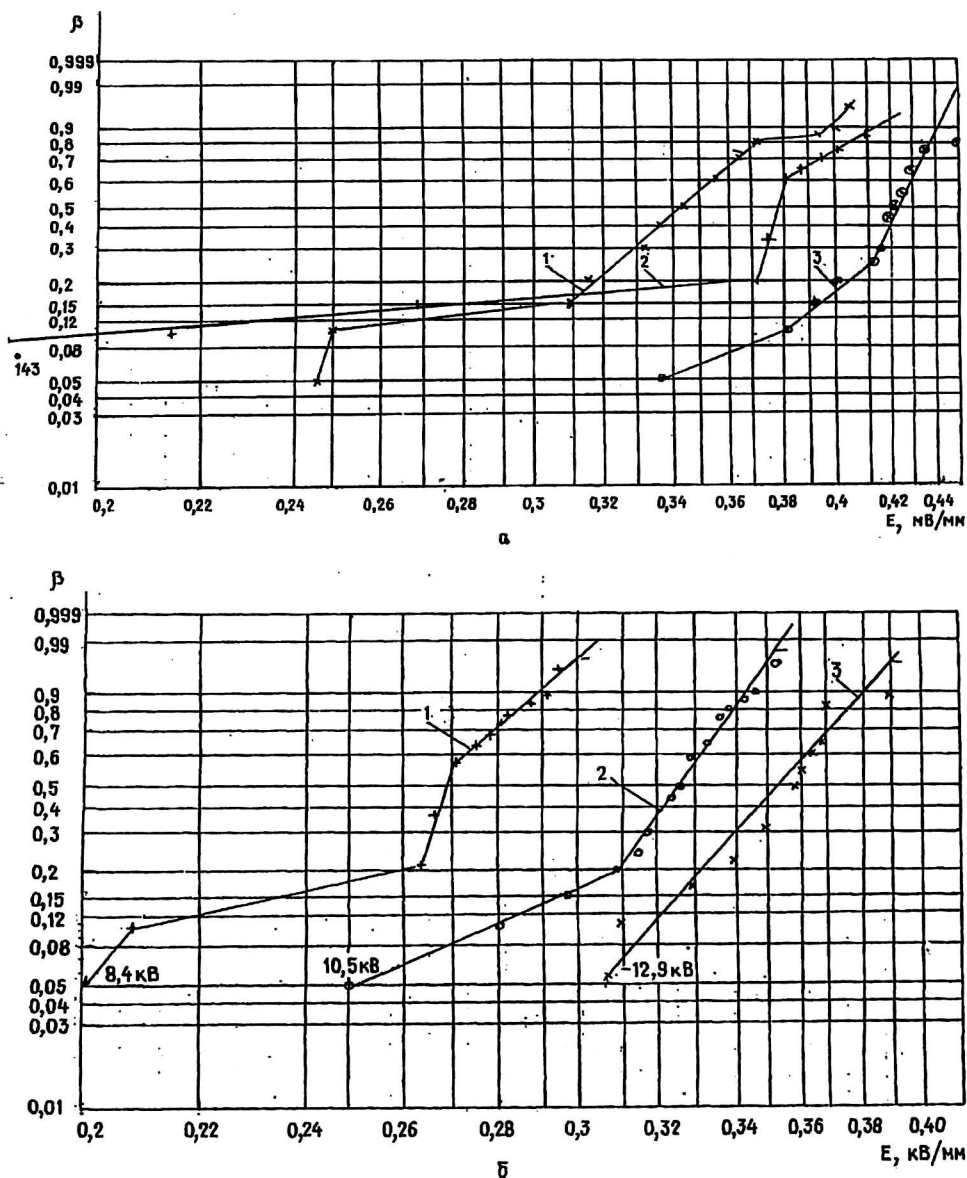


Результаты исследований представлены на рис. 7, а, б, из которого видно, что секции, пропитанные ФКЭ со стабилизирующей добавкой, имеют значения минимальной напряженности поля в 2—2,5 раза меньшее, чем секции, пропитанные АЗИ. Минимальные значения электрической прочности секций, пропитанных ФКЭ со стабилизатором, близки к минимальной прочности непропитанных секций. Например, минимальная электрическая прочность сухих секций толщиной диэлектрика 42 мкм составляет 202 кВ/мм, а секций, пропитанных ФКЭ с эпоксидной добавкой, — 213 кВ/мм, тогда как минимальная напряженность электрического поля секций, пропитанных АЗИ, составляет 308 кВ/мм.

Таким образом, исследование электрической прочности макетов секций конденсаторов, пропитанных ФКЭ с эпоксидной добавкой и АЗИ без добавки, также убедительно свидетельствует о негативном влиянии стабилизирующей добавки на электрическую прочность секций конденсаторов с диэлектриком из ПЭТ КЭ пленки.

Проведенные исследования позволили с более обоснованных позиций подойти к разработке технологии изготовления пленочных конденсаторов высокой удельной энергии. Основные черты этой технологии следующие:

использование оптимального коэффициента запрессовки секций в пакете (излишняя запрессовка аналогична увеличению механического давления) и устранение из технологии сборки пакета возможности «перепрессовки»;



**Рис. 7. Электрическая прочность секций из ПЭТ КЭ пленки:**

**а** — пропитанных ФКЭ + 0,5 % ERL 4221:

$\delta = 4 \times 7 = 28$  мкм;  $S = 4 \times 7 = 28$  мкм; отбраковка секций в сухом виде — 6 кВ;  
число секций — 20; 1 — без пропитки; 2 — пропитка ФКЭ + 0,5 % ERL 4221;  
3 — пропитка АЗИ;

**б** — сухих и пропитанных секций:

$\delta = 6 \times 7 = 42$  мкм;  $S = 0,33$  м<sup>2</sup>; число секций — 20; 1 — без пропитки;  
2 — пропитка ФКЭ + 0,5 % ERL 4221; 3 — пропитка АЗИ

устранение источников дополнительного загрязнения пленки при изготовлении секций и сборке сухих пакетов (намотка секций в «чистой» комнате, соблюдение производственной гигиены и т. д.);

устранение возможного загрязнения изоляции конденсатора в процессе его пропитки за счет перехода от группового метода пропитки к индивидуальному и исключение повторного использования жидкости после очистки ее сорбентами;

тщательная вакуумная сушка пленочной изоляции конденсатора в течение 48 ч при температуре 95—105 °С;

тщательная вакуумно-термическая подготовка заливаемой жидкости в целях устранения растворенной влаги;

отказ от применения стабилизирующих эпоксидных добавок.

Следует отметить, что указанная технология направлена на устранение из конденсаторной изоляции пылевидных загрязнений, влаги и стабилизирующих добавок. Подобные требования к технологии изготовления конденсаторов не являются новыми, однако новым является то, что жесткость соблюдения этих требований, как показали наши исследования, на порядок выше, чем при изготовлении, например, конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией. Это объясняется тем, что бумажная изоляция:

во-первых, сама изначально содержит токопроводящие включения, поэтому пылевидные загрязнения, поступающие из воздуха и пропитывающей жидкости относительно слабо, даже не при жестком соблюдении вышеуказанных технологических условий, увеличивают общее загрязнение изоляции;

во-вторых, касторовое масло как ярко выраженный полярный диэлектрик, по-видимому, обладает способностью к растворению в определенных пределах атмосферной влаги в молекулярном виде без образования суспензии, а молекулярно растворенная влага почти не влияет на электрическую прочность пропитывающей жидкости [4];

в-третьих, бумажная изоляция в отличие от пленочной из-за своей пористости мало чувствительна к перепрессовкам и колебаниям коэффициента запрессовки.

На основе проведенных исследований и разработанной технологии изготовления была создана серия импульсных конденсаторов типа КПИ из ПЭТ КЭ пленки с удельной энергией 0,1; 0,2 и 0,3 Дж/г для импульсных технологий. Серия, приведенная в табл. 1, насчитывает 27 типоразмеров с напряжением 5—100 кВ и емкостью 0,5—250 мкФ.

Таблица 1

Тип конденсатора	C, мкФ	Напряжение, кВ	Индуктивность, нГн	Ресурс, циклов	Удельн. энергия, Дж/г	Частота, Гц	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
КПИ-8-240	240	8	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x250x326	31
КПИ-16-60	60	16	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x150x326	31
КПИ-25-26	26	25	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x150x326	31
КПИ-33-15	15	33	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x150x326	31
КПИ-42-10	10	42	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x150x326	31
КПИ-50-6,7	6,7	50	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x150x326	31
КПИ-75-3	3	75	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x150x326	31
КПИ-100-1,7	1,7	100	100	1·10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	450x150x326	31
КПИ-6,0-250	250	6,0	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-13-60	60	13	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-20-28	28	20	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-27-15	15	27	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-33-10	10	33	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-40-7	7	40	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-60-3	3	60	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-80-1,7	1,7	80	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-100-1,1	1,1	100	100	1·10 <sup>5</sup>	0,2	1,0	450x150x326	31
КПИ-5-250	250	5	100	1·10 <sup>5</sup>	0,1	1,0	450x250x326	31
КПИ-10-60	60	10	100	1·10 <sup>5</sup>	0,1	1,0	450x150x326	31
КПИ-15-28	28	15	100	1·10 <sup>5</sup>	0,1	1,0	450x150x326	31
КПИ-20-15	15	20	100	1·10 <sup>5</sup>	0,1	1,0	450x150x326	31

Окончание табл. 1

Тип конденсатора	C, мкФ	Напряжение, кВ	Индуктивность, нГн	Ресурс, циклов	Удельн. энергия, Дж/г	Частота, Гц	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
КПИ-25-10	10	25	100	$1 \cdot 10^5$	0,1	1,0	450x150x326	31
КПИ-30-7	7	30	100	$1 \cdot 10^5$	0,1	1,0	450x150x326	31
КПИ-45-3	3	45	100	$1 \cdot 10^5$	0,1	1,0	450x150x326	31
КПИ-60-1,7	1,7	60	100	$1 \cdot 10^5$	0,1	1,0	450x150x326	31
КПИ-80-0,8	0,8	80	100	$1 \cdot 10^5$	0,1	1,0	450x150x326	31
КПИ-100-0,5	0,5	100	100	$1 \cdot 10^5$	0,1	1,0	450x150x326	31

Для лазерных технологий была разработана серия конденсаторов типа ИКЧ с изоляцией из полипропиленовой пленки, пропитанной ФКЭ.

Характерные особенности указанных конденсаторов — рекордно низкая собственная индуктивность (5—15 нГн), низкий ( $3 \cdot 10^{-4}$ ) tg $\delta$ , высокая предельная рабочая частота и малое внутреннее активное сопротивление.

Серия насчитывает 35 типоразмеров с напряжением 5—50 кВ и емкостью 0,03—4,0 мкФ (табл. 2).

Таблица 2

Тип конденсатора	C, мкФ	Напряжение, кВ	Индуктивность, нГн	Ресурс, циклов	Удельн. энергия, Дж/г	Частота, Гц	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ИКЧ-5-2,0	2,0	5	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x40	2,0
ИКЧ-5-2,6	2,6	5	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x50	2,5
ИКЧ-5-3,3	3,3	5	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x60	3,0
ИКЧ-5-4,0	4,0	5	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x70	3,3
ИКЧ-5-5,3	5,3	5	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x90	4,0
ИКЧ-10-0,5	0,5	10	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x40	2,0
ИКЧ-10-0,65	0,65	10	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x50	2,5
ИКЧ-10-0,80	0,80	10	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x60	3,0
ИКЧ-10-1,0	1,0	10	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x70	3,3
ИКЧ-10-1,3	1,3	10	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x90	4,0
ИКЧ-15-0,22	0,22	15	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x40	2,0
ИКЧ-15-0,33	0,33	15	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x60	2,5
ИКЧ-15-0,44	0,44	15	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x70	3,3
ИКЧ-15-0,55	0,55	15	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x90	4,0
ИКЧ-20-0,08	0,08	20	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x35	1,7
ИКЧ-20-0,16	0,16	20	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x50	2,5
ИКЧ-20-0,24	0,24	20	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x70	3,3
ИКЧ-20-0,32	0,32	20	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x90	3,5
ИКЧ-20-0,75	0,75	20	12	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x190	8,0
ИКЧ-25-0,06	0,06	25	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x40	1,8
ИКЧ-25-0,13	0,13	25	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x60	2,5
ИКЧ-25-0,2	0,20	25	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x85	3,5
ИКЧ-25-0,26	0,26	25	10	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x110	4,2
ИКЧ-25-0,4	0,40	25	12	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x160	6,0
ИКЧ-25-0,6	0,60	25	14	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x230	9,0
ИКЧ-30-0,06	0,06	30	8	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x40	2,0
ИКЧ-30-0,11	0,11	30	9	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x70	3,3
ИКЧ-30-0,16	0,16	30	10	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x100	4,0
ИКЧ-30-0,22	0,22	30	11	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x130	5,6
ИКЧ-30-0,27	0,27	30	12	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x160	6,0
ИКЧ-30-0,33	0,33	30	12	$5 \cdot 10^7$	0,012	500	300x126x190	8,0

Окончание табл. 2

Тип конденсатора	C, мкФ	Напряжение, кВ	Индуктивность, нГн	Ресурс, циклов	Удельн. энергия, Дж/г	Частота, Гц	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ИКЧ-50-0,03	0,03	50	10	$10^8$	0,007	500	310x126x60	3,0
ИКЧ-50-0,1	0,10	50	12	$10^8$	0,018	500	300x126x155	7,0
ИКЧ-50-0,12	0,12	50	12	$10^8$	0,007	500	300x126x210	12
ИКЧ-50-0,4	0,40	50	15	$10^6$	0,023	500	300x126x198	9

Исследования опытной партии конденсаторов типа КПИ подтвердили более высокую надежность этих конденсаторов по сравнению с аналогичными бумажно-касторовыми.

Серия конденсаторов типа ИКЧ не имеет аналогов в России. Они используются в течение последних лет ведущими лазерными центрами России в источниках питания лазеров.

### Л и т е р а т у р а

1. Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Тез. докл. V Всес. шк. — г. Николаев, 1991. — 131 с.
2. Ермилов И. В. Кинетическая теория электрической прочности твердых диэлектриков// Электричество. 1994. № 9. С. 1—12.
3. Кучинский Г. С., Назаров Н. И. Силовые электрические конденсаторы. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 319 с.
4. Сканави Г. И. Физика диэлектриков. — М.: ГИФМЛ, 1958. — 907 с.

*Автор выражает благодарность своим коллегам В. И. Рудю, В. А. Александрову, В. Л. Лаптеву, Г. А. Кузнецовой за участие в проведении многолетних исследований и экспериментов, направленных на создание современных импульсных высоковольтных конденсаторов с пленочным диэлектриком.*

## Modern impulse high-voltage capacitors with the film dielectric

*I. V. Ermilov*

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*The results of development of high-voltage impulse film capacitors with the 0.1—0.3 J/g specific energy are submitted in the paper. These capacitors are intended for industrial impulse technologies and laser machines.*