

Обеспечение функции самовосстановления

СИЛОВЫХ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Способность самовосстановления после локального пробоя (self-healing) является одним из основных эксплуатационных свойств металлопленочных конденсаторов. Однако, в отличие от газовых или жидких диэлектриков, металлизированная полимерная пленка не способна самостоятельно восстановить свою электрическую прочность. Реализация данного свойства в силовых конденсаторах обусловлена выбором диэлектрической системы и конструктивной адаптацией обкладок.

**Сергей Шишкин,
к. т. н.**

shishkin53@mail.ru

Для уменьшения габарита активной части силовых конденсаторов применяют полимерные материалы, допускающие высокую напряженность электрического поля E и в то же время обладающие необходимой изоляционной электрической прочностью (пробивной напряженностью $E_{\text{проб.}}$).

Надмолекулярная структура изотактичного полипропилена (базового диэлектрического материала силовых конденсаторов) представляет сложную совокупность чередования плотных кристаллических образований, менее плотных аморфных участков и возможных инородных включений (рис. 1). Несмотря на то, что специальные конденсаторные пленки отличает точность выдержки толщины (в пределах 5–10 мкм) по всей площади, их поверхность содержит мелкие выступы (рис. 1), которые можно рассматривать как случайное распределение закруглений с малым радиусом. Осаждение на пленку частиц металла в процессе вакуумного напыления слоя металлизации толщиной около десяти нанометров [1] сформирует микрорельеф поверхности электродов конденсатора, при этом размер отдельных радиусов может увеличиться. В свою очередь, значение E заряженного электрода

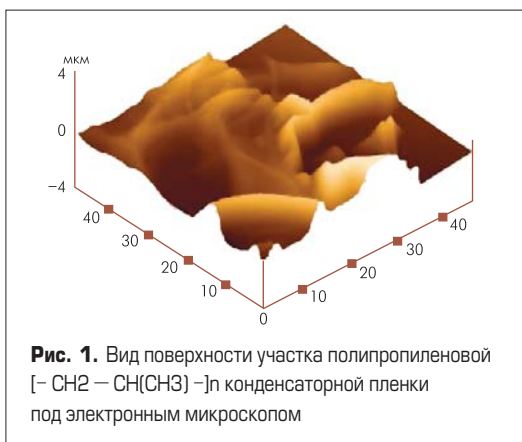
обратно пропорционально квадрату радиуса кривизны поверхности. Теоретически, поскольку расстояние между обкладками намного меньше их длины и ширины, электрические заряды должны равномерно распределиться по внутренним (обращенным друг к другу) поверхностям электродов.

Нарушения однородности электрического поля из-за увеличения E у выступов металлизации приводят к локальным разогревам, ионной поляризации пленки и истечению зарядов, которое при определенных условиях переходит в частичные искровые (коронные) разряды, разрушающие диэлектрик (рис. 2, 3). Затем следует мгновенная (за 10^{-8} с) [2, 3] концентрация на месте пробоя сосредоточенной в объеме V активной части конденсатора энергии W , равной

$$W = \frac{C \times U^2}{2} = \frac{\epsilon_a}{2} \int_V E^2 dV, \quad (1)$$

где C и U — номинальные емкость и напряжение, ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость конденсатора. Это вызывает электрическую дугу, сопровождающуюся броском разрядного тока $I_p \cong dW/dt$, стимулирующего резкий рост температуры до 6000 К [2, 3] и давления, инъекцию плазмы, равномерно вытесняющую из образовавшегося сквозного канала испаренный диэлектрик (рис. 2, 3).

На месте дефекта появляется изоляционная зона (рис. 2, 3), выйдя за пределы которой плазма охлаждается в объеме слоя металлизации, дуга гаснет, а конденсатор продолжит работу с незначительной (не более 0,0001% [1]) потерей номинальной емкости. Отметим, что на стадии существования электрической дуги напряжение на конденсаторе падает, а плотность тока в обкладках достигает значения 10^7 – 10^9 А/м² [2], ограничивая, тем самым, развитие теплового пробоя [4] и самовосстановления несколькими миллисекундами [2, 3] — временем, заведомо недостаточным для срабатывания токоограничивающего быстродействующего плавкого предохранителя с крутопадающей ампер-секундной характеристикой [1].



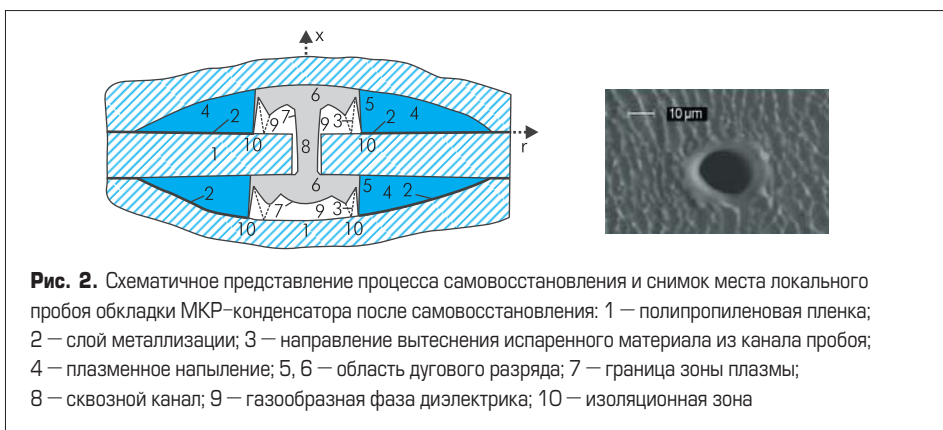


Рис. 2. Схематичное представление процесса самовосстановления и снимок места локального пробоя МКР-конденсатора после самовосстановления: 1 — полипропиленовая пленка; 2 — слой металлизации; 3 — направление вытеснения испаренного материала из канала пробоя; 4 — плазменное напыление; 5, 6 — область дугового разряда; 7 — граница зоны плазмы; 8 — сквозной канал; 9 — газообразная фаза диэлектрика; 10 — изоляционная зона

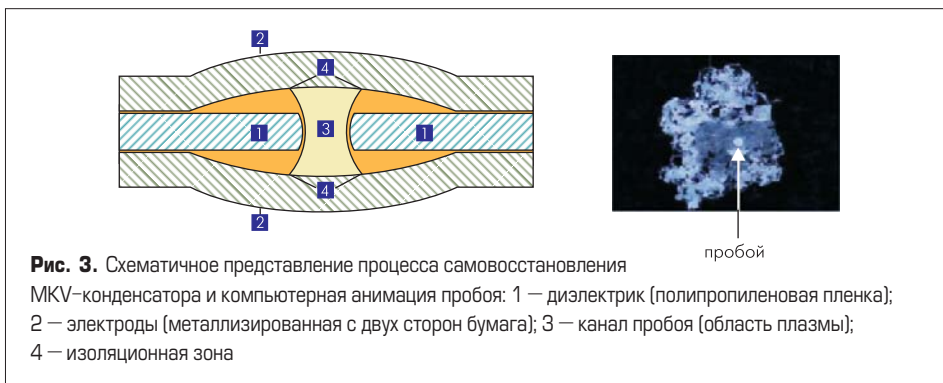


Рис. 3. Схематичное представление процесса самовосстановления МКВ-конденсатора и компьютерная анимация пробоя: 1 — диэлектрик (полипропиленовая пленка); 2 — электроды (металлизованный с двух сторон бумага); 3 — канал пробоя (область плазмы); 4 — изоляционная зона

Если за этот период выделенная энергия (1) не будет полностью рассеяна в области самовосстановления, разрушение лавинообразно распространится на соседние витки обкладки, вплоть до момента срабатывания защиты: максимально токовой (плавкой вставки) или от превышения избыточного давления внутри корпуса, практически означающего выход из строя конденсатора. Случаи обширного пробоя, обусловленные высокой единичной концентрацией энергии (1), особенно типичны для силовых металлопленочных конденсаторов большой реактивной мощности. Таким образом, без специальной

адаптации электродов реализовать их функцию самовосстановления невозможно.

Например, компания ABB [1] в низковольтных конденсаторах МКР (односторонняя металлизация пленки) применяет защитную систему IPE — Internally Protected Elements (рис. 4). Между концами двух металлизированных лент обкладок вставляется короткий (не превышающий длины окружности секции — πD) отрезок пленки, материал которой выбирается с меньшей $E_{\text{проб}}$, чем у диэлектрика ленты. На одной и той же стороне отрезка закрепляют не менее двух листов фольги. После намотки торцы рулона покрывают металлом [5]. В результате получают два параллельных цилиндрических конденсатора (рис. 4): основной — самовосстанавливающийся металлопленочный и окружающий его вспомогательный — самовосстанавливающийся фольговый [1, 5].

Для повышения чувствительности системы IPE необходимо избежать образования пробоя вблизи боковых границ секций [5], поэтому поперечная (в плоскости оси намотки секций) толщина слоя металлизации пленки изменяется на выборочных промежутках от краев к центру [5, 6], тем самым провоцируя пробой в районе повышенного удельного сопротивления обкладки. На рис. 5 показан статистический анализ распределения частичных пробоев секции конденсатора с вариацией толщины металлизации электродов, подвергнутого экспериментальному ускоренному старению. Когда результирующее тепловыделение от сосредоточенных в центральной области обмотки часто повторяющихся процессов самовосстановления достигнет вспомогательного конденсатора, диэлектрическая прочность его пленки быстро нарушится и ток короткого замыкания фольговых электродов отключит плавкий предохранитель (рис. 4), приостано-

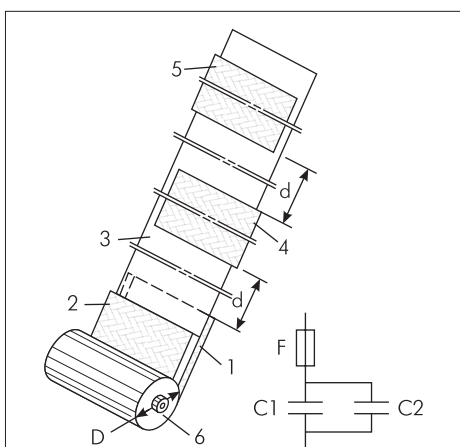


Рис. 4. Схема защитной системы IPE силового металлопленочного конденсатора: 1, 2 — металлизированная лента обкладок; 3 — отрезок пленки; 4, 5 — лист фольги; 6 — рулон обмотки секции; C1 — основной, самовосстанавливающийся конденсатор; C2 — дополнительный, не самовосстанавливающийся конденсатор; F — внешний быстродействующий плавкий предохранитель

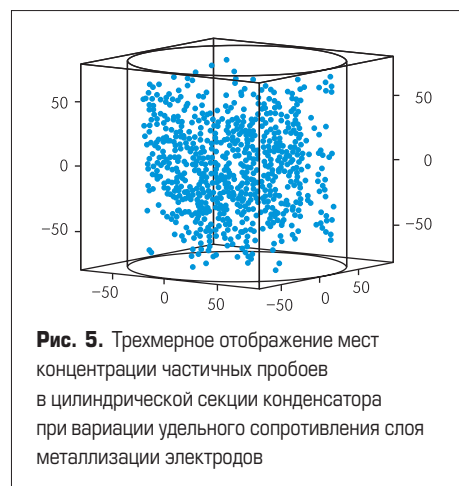


Рис. 5. Трехмерное отображение мест концентрации частичных пробоев в цилиндрической секции конденсатора при вариации удельного сопротивления слоя металлизации электродов

вив пробой основного конденсатора до того, как разрушение его диэлектрической системы станет необратимым. Разрывная способность предохранителя (рис. 4) должна соответствовать мощности короткого замыкания на выводах, а его конструкция должна предусматривать возможность замены, поэтому предохранитель нельзя встраивать в корпус конденсатора.

Более универсальный способ обеспечения самовосстановления — локализация места пробоя путем разбивки поверхности металлизации одного из электродов на отдельные равномерные (около 1 см^2) сегменты, соединенные между собой несколькими перемычками (токовыми коридорами; см. рис. 6). Функционально это эквивалентно матрице плавких вставок параллельных пакетов секций высоковольтных силовых конденсаторов. Ландшафтная мозаика сегментации может быть прямоугольной (рис. 6), ромбовидной, шестиугольной или T-образной [6], также неодинакова и геометрическая форма токовых коридоров. Радиус R сопряжения углов периметра емкостного сегмента способствует эквипотенциальному распределению зарядов [6].

Симметричное продольное разграничение сегментированного слоя металлизации пленки (рис. 6) позволяет сформировать относительно электрода со сплошным слоем металлизации два последовательно соединенных емкостных пакета, попарно перераспределяющих приложенное к конденсатору напряжение, снижая, таким образом, значение W (1). Помимо этого, так как одновременно пробой в двух пакетах маловероятен, при каждом пробое одного из пакетов второй будет являться буферным сопротивлением, ограничивающим величину I_p . Подобное конструктивное построение — внутреннее соединение на требуемое номинальное напряжение определенного числа последовательных емкостных элементов — обеспечивает свойство самовосстановления у высоковольтных металлопленочных конденсаторов [7].

Считается, что деградация силовых конденсаторов наиболее интенсивна в местах неоднородности (искривления) вектора E , особенно на краях обмоток, являющихся контактными узлами выводов [8]. Для относительно толстых фольговых электродов (в единицы и десятки микрон), не обладающих свойством самовосстановления, эта закономерность хорошо

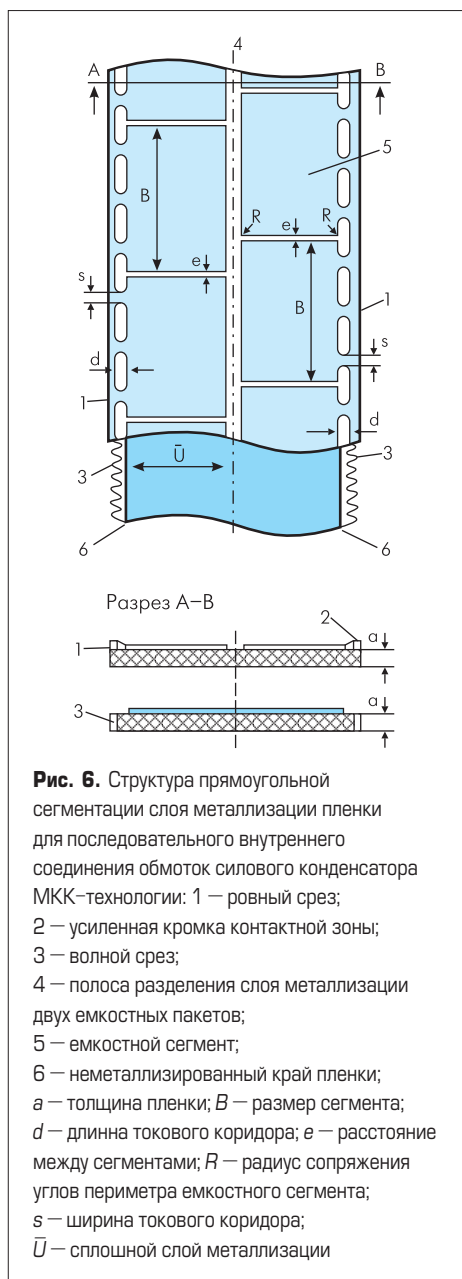


Рис. 6. Структура прямоугольной сегментации слоя металлизации пленки для последовательного внутреннего соединения обмоток силового конденсатора МКК-технологии: 1 — ровный срез; 2 — усиленная кромка контактной зоны; 3 — волной срез; 4 — полоса разделения слоя металлизации двух емкостных пакетов; 5 — емкостной сегмент; 6 — неметаллизированный край пленки; a — толщина пленки; B — размер сегмента; d — длина токового коридора; e — расстояние между сегментами; R — радиус сопряжения углов периметра емкостного сегмента; s — ширина токового коридора; \bar{U} — сплошной слой металлизации

изучена [4]. На процесс разрушения тонких металлизированных электродов дополнительное влияние окажет вероятность распределения нанодфектов и адгезионные качества границы «металл — полимер». Кроме того, существенная роль в предотвращении объемно разрядных процессов и коррозии металлического покрытия электродов МКК-конденсаторов принадлежит качеству газового или компаундного заполнения остаточного объема корпуса [1, 9]. Вызванные высокой плотностью тока динамические и термоупругие нагрузки приводят к образованию микротрещин на слое металлизации и полимерной подложке [9]. Поэтому всем типам силовых металлопленочных конденсаторов присуще дополнительное упрочнение края контактных узлов. Одним из наиболее удачных решений следует признать запатентованную компанией Siemens Matsushita Components GmbH&Co (ныне EPCOS AG) технологию МКК (Metalized Kunststoff Kompakt) — одновременное усиление напыления торцов обкладок и расширение площади их контактной поверхности за счет сочетания ровного и волнового среза кромок пленки (рис. 6), укладываемой с харак-

терным для конденсаторов МКК небольшим смещением витков [8, 10, 11]. Такая конфигурация входа контактной зоны снижает пропорциональное значительной доле общих потерь P (dissipation factor) последовательное сопротивление R_S (series resistance) — суммарное сопротивление выводов и обмоток конденсатора — и сглаживает динамическое воздействие пиков пульсаций тока $\hat{i} = C \times (du/dt)_{\text{макс}}$. [3] на обмотки, однако, как любое техническое решение, применима с различной степенью продуктивности в зависимости от типа пленочного конденсатора.

В силовой электронике технология МКК позитивно зарекомендовала себя для косинусных конденсаторов — наибольшей по объему производства группы силовых конденсаторов [4] — ввиду присущей им специфики режима работы: больших (до 200–250% от номинального) бросков пускового тока и ограниченным стандартом IEC 831 допустимым числом включений (не свыше 5000 за год). По сравнению с широко распространенными в схемах компенсации реактивной мощности конденсаторами МКК-технологии [1, 4] косинусные конденсаторы типа МКК/МКК позволяют на 10–15% (до $1,5 I_{\text{ном}}$) увеличить допустимую длительную токовую перегрузку и примерно в 2–2,5 раза (до 200–250 $I_{\text{ном}}$) — кратность пускового тока (относительно регламентируемых IEC 831 значения) [11].

Основной недостаток металлопленочных конденсаторов — плохая теплопроводность секций — объясняется тем, что слой металлизации электродов, подобно фольге, не может выступать за край рулона, обеспечивая отвод тепла [7]. Как известно, тепловой пробой связан с экспоненциальным ростом тангенса угла потерь пленки $tg\delta_0$ (Т) вследствие активации поверхностной проводимости диэлектрика [9], так как внутренний нагрев конденсатора соразмерен значению $tg\delta_0$ на рабочей частоте f_0 [3]. При протекании через конденсатор среднеквадратичного тока I_{rms} , вызванного пульсацией амплитуды приложенного напряжения \hat{u} , интенсивность тепловыделения обмоток, интенсивно равная величине P , складывается из потерь в слое металлизации P_R и диэлектрике P_D [3]:

$$P = P_R + P_D = I_{\text{rms}}^2 \times R_S + \hat{u}^2 \times \pi \times f_0 \times C \times tg\delta_0. \quad (2)$$

Соотношение значений P (2) и коэффициента рассеяния (decisive factor — ΔT_{cap}), соответствующего условию охлаждения, определяет нагревостойкость (thermal resistance — R_{th}) конденсатора: $R_{th} = \Delta T_{\text{cap}}/P$ [3]. Вот почему эффективность самовосстановления, особенно при установке силового металлопленочного конденсатора в сглаживающей, фильтрационной или разделительной цепи [8], связана с оптимизацией теплового режима его диэлектрической системы.

Хорошо известная на протяжении более тридцати лет MKV — технология (рис. 3) изоляции пропиленовой пленкой двухсторонне металлизированной конденсаторной бумаги с пропиткой минеральным маслом —

улучшает теплопроводность силовых конденсаторов [3, 8]. Хотя слой бумаги непосредственно не влияет на E электродов, ее пористая структура способствует качеству пропитки, устойчивости торцевого контакта, а также равномерности распределения продуктов разложения, образующихся на месте пробоя металлизированного покрытия в процессе самовосстановления [8]. Еще один метод повышения теплопроводности обмоток (технология MFP): с одной стороны пленки расположен лист фольги, обеспечивающий прочность касания выводов и низкое R_S (2) конденсатора, с другой — обладающий свойством самовосстановления слой металлизации [7].

Надежность любого электронного устройства зависит от ресурса отдельных компонентов. Средний срок службы силовых металлопленочных конденсаторов ведущих европейских компаний [1–3, 11], соответствующий 0,3% интенсивности отказов, составляет не менее 100 000 часов. Во многом этот результат достигнут благодаря постоянному совершенствованию защитной функции самовосстановления.

Литература

- 1 Reactive Power Compensation. MNS®, KNS and UNIKIT System. Technical Information ABB. DEAST 0016.98E. Replaces ITGR 400 001E. 1999.
- 2 Self-healing process in metallized capacitors. <http://www.wima.com>.
- 3 MKV Power Electronic Capacitors for Heavy Duty Applications. Product Profile 2006. EPCOS AG. Ordering No EPC: 26016-7600.
- 4 Кучинский Г. С., Назаров Н. И. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1992.
- 5 А. с. СССР № 1426472 H01G4/32. Способ изготовления самовосстанавливающего конденсатора (его варианты). Азеа-Жюме С. А. (Be), Франц Воглер (Be). № 3652708/24-21, заявл. 19.10.83, опубл. 23.09.88. Бюллетень № 35.
- 6 EP 1060488 H01G4/015, 4/008 — Metal-plating for self-healing foil capacitors. Vetter H., Eppling W. 17.02.1998. DE 4328615.
- 7 Патент РФ 2042986 H01G4/00. Высоковольтный рулонный конденсатор. Максимова О. П., Хрусталева Б. Д., Черников Л. А. № 4887242/07, заявл. 28.11.90, опубл. 27.08.95. Бюллетень № 24.
- 8 Шишкин С. А. Силовые конденсаторы EPCOS AG для IGBT-инверторов мощных преобразователей систем электроснабжения // Компоненты и технологии. Силовая электроника. 2005. № 3.
- 9 Емельянов О. А. Особенности работоспособности металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах // Электротехника. 2004. № 8.
- 10 EP 640996 H01G4/015 // Elektrischer Kondensator // Vetter H., Fuchs F.-J. 25.08.1993. DE 4328615.
- 11 Power Factor Correction. Product Profile 2005. EPCOS AG. Ordering No EPC: 26013-7600.