

Новое поколение косинусных конденсаторов среднего напряжения

компании Electronicon

Обеспечение бесперебойности электроснабжения технологического оборудования, подключенного на уровне среднего напряжения, требует все более надежных компонентов, способных даже в случае частичного повреждения продолжить реализацию своих функций. В полной мере это можно отнести и к силовым высоковольтным (свыше 1 кВ) конденсаторным батареям (КБ), используемым для повышения коэффициента мощности ($\cos \phi$). Прогресс в достижении высоких удельных электрических характеристик силовых конденсаторов всегда был следствием появления и применения более совершенных материалов и технологий. Одно из основных эксплуатационных преимуществ металлопленочных конденсаторов [1] — самовосстановление диэлектрической системы после локального пробоя (self-healing) — позволило повысить энергетическую эффективность пленочных конденсаторов за счет увеличения рабочей напряженности их электрического поля. С начала 1990-х годов большинство низковольтных (до 1 кВ) косинусных конденсаторов (КК) изготавливается по различным модификациям металлопленочной технологии [1]. Однако для КК среднего уровня напряжения (3–11 кВ), обладающих, по сравнению с низковольтными, гораздо большей запасаемой и выделяемой при процессе самовосстановления энергией, применение данной технологии встретило ряд проблем. Только за последние пять лет, благодаря оптимизации структуры обкладок, некоторым электротехническим компаниям удалось наладить производство металлопленочных конденсаторов, одновременно рассчитанных на высокое номинальное напряжение и большие единичные мощности. В их число входит и Electronicon Kondensatoren GmbH, разработавшая и серийно выпускающая КК среднего напряжения серии MSD [2–4].

Сергей Шишкин,
к. т. н.

shishkin53@mail.ru

Алексей Юшков

yushkov_alexei@argussoft.ru

Активная часть группы КК, под общим названием «пленочные», состоит из лент органического диэлектрика (неполярной полипропиленовой пленки) и фольговых или металлизированных обкладок (электродов). Исходные предпосылки расчета модели силового конденсатора [5] допускают принять следующее упрощенное соотношение между объемом его активной части — V (см³) и базовыми электрическими параметрами:

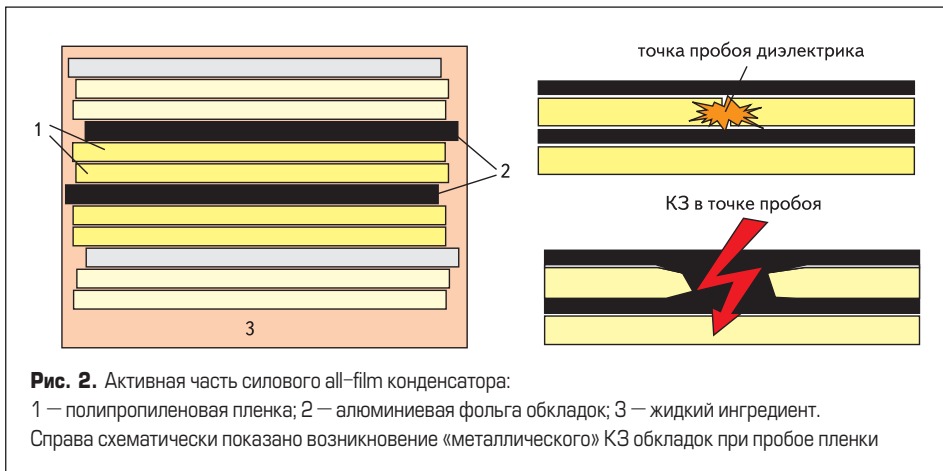
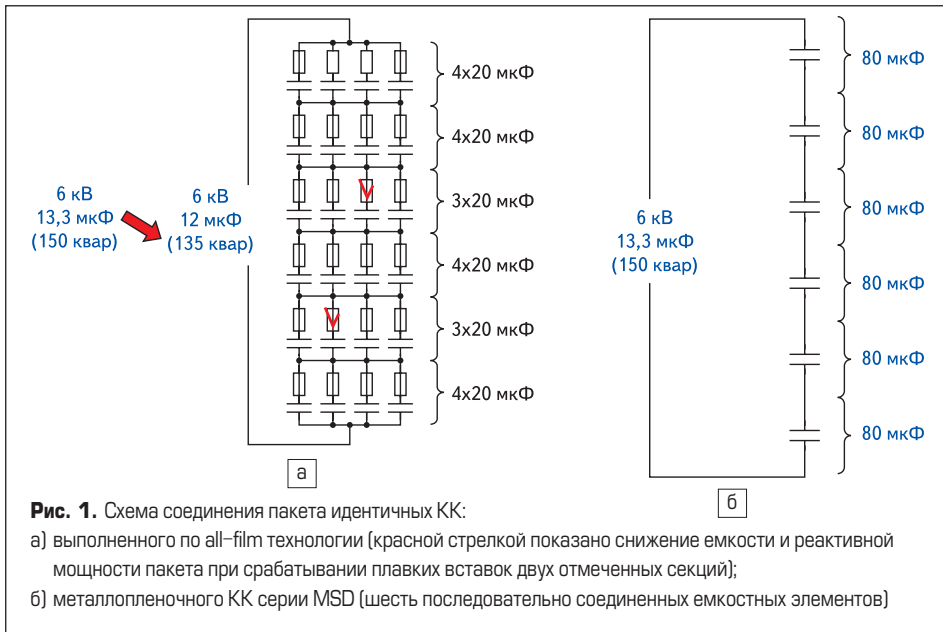
$$V = (36\pi U^2 C 10^{-5}) / \epsilon E^2, \quad (1)$$

где C — емкость конденсатора (мкФ); E — напряженность электрического поля (кВ/см); U — рабочее напряжение (кВ); ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость.

Из формулы (1) следует, что, повысив E до значения, предельно близкого к электрической прочности диэлектрика — $E_{\text{макс}}$ (в пределах 400–500 кВ/мм для металлизированной полипропиленовой пленки [6]), можно сократить расход материала и уменьшить габариты силового конденсатора. При прочих равных условиях увеличение E всего на 10% приведет к росту C и пропорциональной ей реактивной мощности пленочного КК — $Q = U^2 \times 2\pi \times f \times C \times 10^{-3}$ (квар)

на 21%, но практическая реализация этого режима в высоковольтных КК (значение E которых на порядок превышает напряженность электрического поля других видов высоковольтного оборудования) связана с обеспечением их эксплуатационной надежности. Учитывая важность данного вопроса, рассмотрим более подробно конструктивные способы защиты диэлектрической системы разных типов высоковольтных пленочных КК.

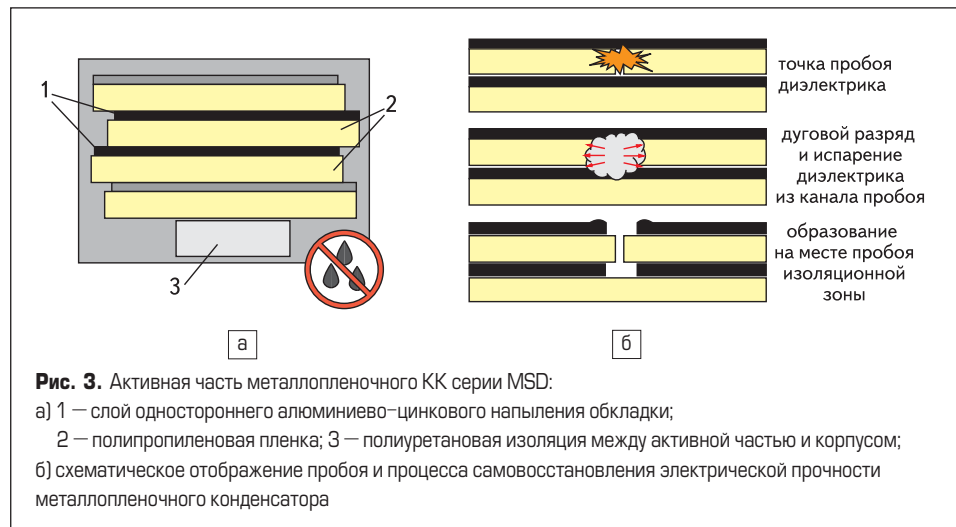
Сегодня подавляющую долю рынка высоковольтных КК занимают конденсаторы, выполненные по all-film технологии — набор пакета однотипных, спирально намотанных секций, имеющих, в зависимости от требуемых электрических характеристик, последовательное, параллельное или смешанное соединение (рис. 1а). В качестве токопроводящих обкладок секций используются ленты алюминиевой фольги, вынесенные за разделяющую их изоляционную прокладку из полипропиленовой (толщиной ≈ 10 мкм) пленки, с последующей пропиткой полостей витков и заполнением остаточного объема корпуса жидким ингредиентом — органическим маслом или синтетической жидкостью (рис. 2). Как правило, выступающий край фольги загибается вдоль продольного края пленки. Подобное построение способствует отводу



тепла за пределы активной части и электрической прочности торцевых соединений секций, делая их устойчивыми к токовым перегрузкам. Каждая параллельно включенная секция снабжается плавкой вставкой в виде тонкой (диаметром 0,25–0,35 мм) медной проволоки, отключающей секцию в случае пробоя (рис. 1а), поддерживая, тем самым, дальнейшую работоспособность конденсатора с потерей лишь некоторой части его номинальной емкости (1,5–5%, в зависимости от реактивной мощности КК [5]).

Следует отметить, что, в отличие от внешних предохранителей защиты, разрушение плавких вставок секций обусловлено не энергией, поступающей из сети, а энергией, запасенной непосредственно внутри конденсатора, соразмерной его фактической емкости [1]. Поэтому при значительной потере первоначальной емкости, например, из-за многочисленных аварийных отключений, вставки оставшихся в работе секций КК не будут расплавлены в требуемом временном интервале. Характерная для all-film конденсаторов деградация емкости (в том числе ее скачкообразное падение в конце срока службы) вызывает необходимость контроля симметрии емкостной нагрузки (дифференциально-фазовой токовой защиты) параллельных (шунтовых) батарей высоковольтных КК [2–4], так как у них гораздо большая (по сравнению с низковольт-

ными КБ) единичная реактивная мощность. Причем методы защиты от несимметрии допускают как схемные [4], так и конструктивные решения [5]. Например, некоторые трехфазные КБ all-film КК комплектуются идентичными однофазными конденсаторами, состоящими из двух одинаковых по емкости групп секций (общая точка секций соединяется с одной из фаз компенсируемой сети, а две другие, через индивидуальные выводы — в общие точки N_1 и N_2). В результате получаем подключение КК по схеме «двойной звезды»



и возможность контроля тока небаланса КБ между точками N_1 и N_2 .

Так как толщина фольги силовых конденсаторов — несколько микрон, то вследствие высокой проводимости электродов и, соответственно, большого тока КЗ, образующегося в точке пробоя обкладок (рис. 2), подключение к сети силовых all-film конденсаторов допускается только через токоограничивающие внешние или встроенные предохранители (ПУЭ, гл. 5.6.22). При этом номинальный ток внешнего предохранителя, по условию селективности с плавкими вставками секций, должен быть минимум в два раза выше номинального тока all-film конденсатора.

По оценке Electronicon, затраты на комплектацию схемы защиты батарей all-film КК составляют порядка 5–8% (для КБ ≥ 10 Мвар) и 80% (для КБ = 300 квар) от стоимости конденсаторов.

Защита металлоплёночных конденсаторов (рис. 3) использует совершенно иные технологические принципы, главный из которых — способность самовосстановления электрической прочности диэлектрика [1]. Локализация места пробоя металлизации обкладок обеспечивает крайне незначительную (не более 0,0001% [1]) потерю номинальной емкости (до момента, когда можно зафиксировать критичное снижение емкости КК серии MSD, должны произойти несколько тысяч регенераций пробоев). Кроме того, ограничению мощности разряда [1] — концентрации выделяющейся в точке пробоя тепловой энергии, не превышающей предела лавинообразного разрушения обкладок, — способствует высокое сопротивление электродов, так как толщина слоя алюминиево-цинковой металлизации примерно в 1000 раз меньше, чем у фольги.

Необходимое номинальное напряжение КК серии MSD достигается последовательным соединением внутренних емкостных элементов (рис. 1б). Поскольку одновременный пробой нескольких элементов маловероятен, то при пробое в одном из них остальные будут являться своеобразным буферным сопротивлением, ограничивающим величину разрядного тока.

Таким образом, для батарей металлоплёночных КК серии MSD риск появления асим-

Таблица. Основные технические параметры металлопленочных КК серии MSD производства Electronicon Kondensatoren GmbH [2, 4]

Параметр	Диапазон значений
Технологическое исполнение	МКР, заполнение полиуретаном
Номинальная реактивная мощность, $Q_{ном}$	50–400 квар
Номинальное напряжение, $U_{ном}$	3150...11 800 В/50 Гц
Допустимое перенапряжение, $U_{макс}$	$1,1 \times U_{ном}$ — до 12 ч за сутки; $1,15 \times U_{ном}$ — до 30 мин за сутки; $1,2 \times U_{ном}$ — до 5 мин за сутки (не более 200); $1,3 \times U_{ном}$ — до 1 мин за сутки (не более 200); максимальное пиковое значение — $3 \times U_{ном}$
Испытательное напряжение, $U_{исп}$	$2,15 \times U_{ном}$
Номинальный ток, $I_{ном}$	$3 \times 2,7...3 \times 78,8$ А
Максимальный пусковой ток, $I_{макс}$	$100 \times I_{ном}$
Номинальная емкость, $C_{ном}$	$3 \times 1,36...3 \times 132,0$ мкФ
Допустимое отклонение $C_{ном}$, $\Delta C_{ном}$	до $\pm 2,5\%$
Собственные потери	$< 0,25$ Вт/квар
Тангенс угла потерь, $tg\delta$	2×10^{-4}
Длина пути утечки изоляторов выводов	290 мм
Расстояние между выводами	118, 150 мм
Масса	15...53 кг
Размер корпуса (длина×ширина×высота)	340, 415×118, 144×240...755 мм
Максимальный диапазон рабочих температур	-40 °С/В, С, D*
Срок службы	$> 100\ 000$ ч

Примечание: * температурный класс указан на этикетке конденсатора.
 Монтажная шпилька выводов — M12×35 (максимальный крутящий момент — 10 Нм). Встроенные резисторы при отключении КК обеспечивают его разряд до напряжения менее 75 В за 10 мин. Степень защиты — IP00 (на верхней части корпуса находятся скобы, позволяющие закрепить защитную крышку выводов)

метрии емкости практически исключен, следовательно, отпадает необходимость ее контроля, а в случае лавинообразного развития пробоя отключение поврежденного конденсатора производится устройством коммутации по сигналу встроенного датчика давления [2–4].

Длительное время широкому внедрению высоковольтных металлопленочных КК препятствовали определенные помехи, в том числе резко выраженный краевой эффект (pinch effect) — разрушение контактной зоны окладки (образование микротрещин на слое металлизации и полимерной подложке) под интенсивным действием частичных разрядов, обусловленных ростом E , вызванного искривлением внутреннего электростатического поля [1, 5]. Поэтому, как и силовым all-film конденсаторам, металлопленочным КК необходимо дополнительное упрочнение (снижение плотности тока [1]) выводов контактных узлов секций, причем используемые для этого методы разнообразны [1, 5].

Существенную роль в предотвращении объемно-разрядных процессов электрохимической коррозии поверхности металлизации электродов МКР (Metallized Kunststoff Polypropylene) конденсаторов [2–4] играет качество газового, жидкого или твердого (компаундного) заполнения остаточного объема корпуса [1]. Благодаря специально разработанной технологии полиуретановой (твердой) изоляции между активной частью и корпусом, «сухие» КК серии MSD обладают высокой температурной стабильностью емкости и полной экологической безопасностью, соответствующей категории WGK — water risk category 0 [3]. Это позволяет применять трехфазные КК серии MSD там, где установка all-film конденсаторов, содержащих жидкие, низковязкие ингредиенты, не допускается.

После вакуумной сушки — удаления влаги из бобин активной части — соединенные по схеме «звезда» пакеты трехфазных КК помеща-

ются в прямоугольный металлический корпус, сверху которого монтируются проходные изоляторы выводов обмоток. Внутри корпуса встроены разрядные резисторы и датчик контроля превышения (свыше 0,5 МПа) избыточного давления [2–4]. Монтажное положение КК серии MSD произвольное, но вертикальное — наиболее предпочтительно. В зависимости от мощности КК, конвективный теплообмен сборки КБ обеспечивается 90- или 148-миллиметровым зазором [4] между боковыми поверхностями соседних MSD-конденсаторов. Технические характеристики КК серии MSD приведены в таблице.

В целом, новое поколение металлопленочных конденсаторов серии MSD полностью соответствует действующим стандартам для КК среднего напряжения (IEC 60871-1, 2:1997) и позволяет, без снижения уровня надежности, упростить построение схем защиты высоковольтных КБ, сократив связанные с этим затраты.

Литература

1. Шишкин С. А. Обеспечение функции самовосстановления силовых металлопленочных конденсаторов // Силовая электроника. 2005. № 4.
2. Конденсаторы и дроссели для компенсации реактивной мощности. Каталог Electronicon. 2006.
3. Юшков А. В. Использование конденсаторов и дросселей Electronicon для компенсации реактивной мощности // Силовая электроника. 2006. № 3.
4. MSD MEDIUM VOLTAGE CAPACITORS [ht tp://w ww.electronicon.c om](http://www.electronicon.com)
5. Кучинский Г. С., Назаров Н. И. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат. 1992.
6. Андреев А. М., Хаецкий В. С. Электрическая прочность пропитанного металлизированного пленочного диэлектрика // Электротехника. 2005. № 7.
7. Продукция Electronicon Kondensatoren GmbH [ht tp://w ww.argussoft.r.u/electronicon](http://www.argussoft.r.u/electronicon)