

Глава седьмая

ОБКЛАДКИ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

7.1. ФОЛЬГОВЫЕ ОБКЛАДКИ

Алюминиевая фольга, используемая в качестве обкладок при изготовлении намотанных секций силовых конденсаторов с бумажным, бумажно-плёночным и плёночным диэлектриком, выпускается по ГОСТ 618-73. Она содержит 99,5—99,7% алюминия. Применение алюминия обосновано тем, что он обладает небольшим удельным сопротивлением, высокой теплопроводностью, легко прокатывается до малых толщин и относительно дешев. В конденсаторах других типов применяются также фольговые обкладки из других материалов: оловянная — 84—85% Sn, 13—14% Pb, 1—2% Sb, красномедная, танталовая. Алюминиевая фольга для электролитических конденсаторов содержит 99,95—99,99% алюминия.

В подавляющем большинстве силовых конденсаторов применяется алюминиевая фольга толщиной 7—8 мкм. Временное сопротивление разрыву этой фольги, не подвергавшейся отжигу

и называемой жесткой, должно быть не менее $7,5 \cdot 10^5$ Па при удлинении не менее 0,5%. Для удаления следов технологической смазки, загрязняющей диэлектрик конденсатора и ухудшающей его $\tan \delta$, фольга отжигается. Такая фольга называется мягкой, и удлинение ее достигает 2%, но прочность на разрыв понижается. Как показывает опыт, без ущерба для технических характеристик конденсатора толщина фольги с 7—8 мкм может быть снижена до 5—6 мкм. В конденсаторах для повышенных частот (электротермических) применяется фольга толщиной 16 мкм.

В бумажном и бумажно-пленочном диэлектрике применяется гладкая фольга. В пленочном диэлектрике гладкая фольга слипается с пленкой, что препятствует проникновению пропитывающей жидкости, в результате чего целые участки диэлектрика остаются непропитанными и содержат воздух. Для устранения этого фольга делается тисненой, и через канавки тиснения обеспечивается полная пропитка диэлектрика [7.1].

В намотанных секциях поверхность обкладок сравнительно велика по сравнению с объемом диэлектрика, прилегающего к ней. Это усиливает каталитическое воздействие алюминия на химические и электрохимические процессы старения. При постоянном напряжении и повышенных температурах наличие алюминия приводит к быстрому разложению хлорированных полярных жидкостей, что имеет следствием возрастание проводимости и сокращение ресурса конденсатора. При этом на поверхности фольги, особенно анодной, находящейся под положительным потенциалом, наблюдается сильное коррозионное разрушение. В переменном электрическом поле металлические фольговые обкладки могут вибрировать, в результате чего увеличиваются потери. Повышением коэффициента запрессовки можно снизить эффект от этого явления.

7.2. ОБКЛАДКИ В ВИДЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Обкладки в виде металлизированного диэлектрика получают испарением металла в вакууме (до 10^{-4} мм рт. ст.) и осаждением его на поверхность диэлектрического материала с образованием металлического слоя и обычно называются металлизированными. Этот термин будет сохранен и в дальнейшем. Металлический слой может осаждаться непосредственно на диэлектрик, и тогда обкладка и диэлектрик образуют единую систему, или на отдельную диэлектрическую подложку, как, например, лист бумаги, и тогда обкладка является самостоятельным элементом. Процесс образования слоя металлизации зависит от многих факторов: физических свойств

металла и поверхности, определяющих сродство металла к поверхности, температуры поверхности и др. Осаждение молекул металла на поверхности диэлектрика может происходить только в том случае, когда температура поверхности T меньше некоторой критической температуры T_k . При $T > T_k$ молекулы металла не закрепляются на поверхности диэлектрика, и она остается чистой.

При попадании на поверхность диэлектрика молекула металла закрепляется на нем, отдавая избыточную кинетическую энергию молекулам диэлектрика, и участвует вместе с ними в тепловом движении. Время пребывания молекулы в закрепленном состоянии определяется степенью сродства металла с поверхностью и ее температурой. При больших T это время невелико, и молекула металла быстро отрывается от поверхности в окружающее пространство. В этом случае при малой интенсивности потока падающих на поверхность молекул металла образуется рыхлый молекулярный слой. При низкой температуре поверхности, обуславливающей большое время пребывания молекулы в закрепленном состоянии, и большой интенсивности потока молекул металла создаются условия для образования полимолекулярного слоя. Поскольку молекулы металла в последующих слоях, кроме первого, сцепляются друг с другом, силы сцепления возрастают, и процесс отдачи молекул в окружающее пространство затрудняется. Значения T_k различны для различных потоков молекул металла. Процесс металлизации осуществляется в специальных установках.

Металл, используемый для изготовления обкладок из металлизированного диэлектрика, должен исключать возможность их разрушения или окисления в процессе работы конденсатора и обеспечивать в то же время его надежное самовосстановление после пробоя диэлектрика. Кроме того, он должен иметь малое сопротивление, низкую температуру кипения, а упругость его паров должна быть высокой при сравнительно низких температурах, поскольку применяемые в силовом конденсаторостроении изоляционные материалы отличаются малой теплостойкостью в силу их органической природы. Металлы с низкой температурой кипения требуют также меньших затрат энергии в процессе металлизации. Температуры кипения некоторых металлов, °С, в вакууме приведены ниже.

Кадмий.....	260
Цинк.....	340
Алюминий.....	1000
Серебро.....	1050
Медь.....	1270
Олово.....	1350

Самую низкую температуру кипения имеет кадмий. Но он дорог и поэтому не применяется для металлизации.

Следующим идет цинк. Однако тонкие пленки цинка на конденсаторном диэлектрике в атмосферных условиях быстро окисляются, в результате чего увеличивается их сопротивление, и поэтому секции с металлизированным цинком обкладками могут только кратковременно храниться в обычных условиях. Кроме того, оксиды цинка обладают полупроводящими свойствами, в результате чего самовосстановление может быть неполным. От указанных недостатков цинка свободен алюминий, который хотя и имеет более высокую температуру кипения по сравнению с цинком, но широко применяется для металлизации.

Самовосстановление конденсаторов с обкладками из металлизированного диэлектрика зависит от многих факторов: толщины слоя металлизации; свойств металла, химического состава материала, на который она наносится; натяжения лент при намотке (плотности намотки). Основным и определяющим является толщина слоя металлизации. Для улучшения самовосстановления, а также снижения разрушения и окисления металлизированных обкладок применяется ряд специальных мер, рассматриваемых далее.

7.3. САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С ОБКЛАДКАМИ В ВИДЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИКА

При пробое диэлектрика в конденсаторе с обкладками из металлизированного диэлектрика под действием возникающей между ними дуги и протекающего через место пробоя тока происходит испарение металла обкладок (их деметаллизация) вокруг места пробоя. Деметаллизированная зона имеет форму круга. Процесс деметаллизации продолжается до тех пор, пока дуга не погаснет, т. е. пока не восстановятся электроизоляционные свойства диэлектрика в данной его точке и конденсатор снова не станет работоспособным. Следовательно, его длительность и затрачиваемая при этом энергия должны быть такими, чтобы исключалась возможность повреждения самого диэлектрика. Оба эти значения определяются количеством подлежащего испарению металла, которое, в свою очередь, зависит от размеров зоны деметаллизации и толщины слоя металлизации δ . Диаметр круга деметаллизации определяется приложенным к обкладкам напряжением. Следовательно, для уменьшения времени процесса деметаллизации и затрачиваемой на него энергии необходимо уменьшать δ . С уменьшением δ возрастает сопротивление обкладок, что увеличивает $\tan \delta$ конденсатора и потери в нем. Задача сводится к нахождению оптимального значения δ . Изучению процесса деметаллизации посвящен ряд исследований [7.2].

Непосредственное измерение толщины δ , составляющей сотые доли микрометра, практически чрезвычайно трудно, и поэтому она оценивается по сопротивлению слоя металлизации. Если взять металлизированную обкладку в форме квадрата, то ее сопротивление

$$r = \rho / \delta, \quad (7.1)$$

где ρ — удельное сопротивление металла обкладки.

Из уравнения следует, что сопротивление r квадрата при известном ρ является характеристикой толщины слоя δ . Но величина ρ сама является функцией δ . Эта зависимость объясняется тем, что в начальный период образования слоя металлизации, когда количество молекул металла на поверхности диэлектрика невелико, они не образуют сплошного слоя, а располагаются разрозненно, и ρ в этом случае велико. В процессе миграции при тепловом движении по поверхности диэлектрика молекулы металла — сталкиваются друг с другом и образуют группы, происходит осаждение других молекул, и ρ уменьшается вследствие уменьшения расстояния между группами. После достижения слоем определенной толщины значение ρ становится постоянным, равным ρ сплошного куска металла. Поэтому расчет δ по сопротивлению r квадрата может дать лишь приближенное значение, поскольку ρ зависит от δ до толщины слоя 0,1 мм в зависимости от его плотности. Температурный коэффициент α сопротивления металла также зависит от толщины (рис. 7.1). Характер зависимости энергии разрушения металлизированной обкладки от ее толщины при металлизации цинком, полученной в [1.7], приведен на рис. 7.2. Оптимальные толщины слоя металлизации, характеризующиеся сопротивлением квадрата, несколько различаются для различных материалов, на которые они наносятся, а также используемых для металлизации металлов (цинк, алюминий) и находятся в пределах 1—3 Ом.

Процесс самовосстановления может быть улучшен путем применения ряда дополнительных мер [7.4—7.8]. Во избежание образования проводящих мостиков между обкладками проводящие продукты (частицы металла, свободный углерод) должны быть приведены в непроводящее состояние. Это достигается образованием их соединений с кислородом или водородом, в результате чего получают непроводящие оксиды металлов, CO , CO_2 и газообразные углеводороды. Насыщение поверхностей подложек или пленки диэлектрика кислородом и водородом или соединениями с большим количеством кислорода и водорода способствует этому. Для надежного самовосстановления необходимо, чтобы молекула материала подложки или металлизированной пленки содержала не менее 10% атомов кислорода, т. е. должна иметь не менее чем 10%-ный

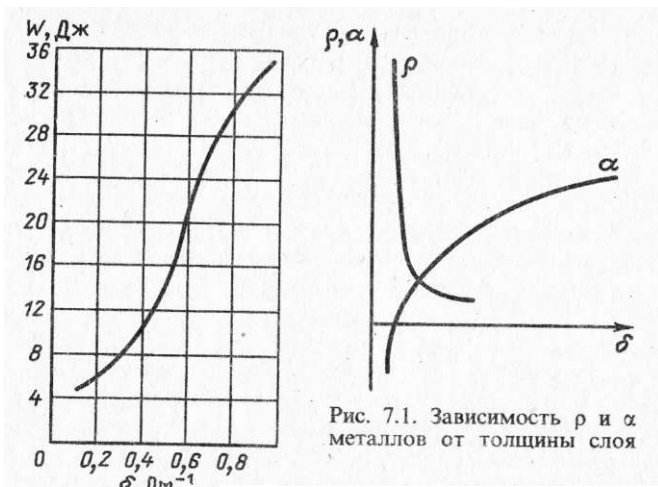


Рис. 7.2. Зависимость энергии разрушения слоя металлизации от его толщины (по Горощину)

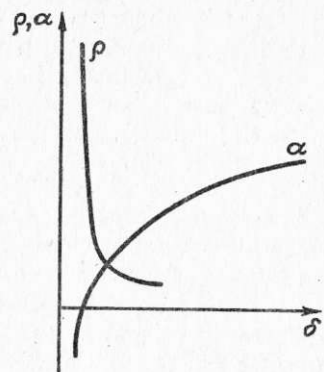


Рис. 7.1. Зависимость ρ и α металлов от толщины слоя

оксидационный баланс. Клетчатка, как основа мягкой обкладки, содержит большое число кислородных атомов в молекуле (обладает высоким оксидационным балансом), поэтому в системе с мягкой обкладкой в качестве диэлектрика могут быть использованы пленки с малым оксидационным балансом, тогда как в металлопленочной — только пленки с высоким оксидационным балансом. Для подложек, обладающих 10%-ным оксидационным балансом при металлизации их цинком, оптимальной будет толщина слоя металлизации, при которой проводимость квадрата не превышает 0,8 См [7.3]. Для связывания частиц металла в металлопленочной системе с малым оксидационным балансом в пропитывающий диэлектрик добавляется жидкий полиметилсилоксан со степенью полимеризации около 300.

При работе на постоянном напряжении в конденсаторах с металлизированными алюминием обкладками наблюдается явление электрохимического упрочнения, которое состоит в следующем. При наличии в диэлектрике конденсатора мест с малым сопротивлением изоляции через них протекает сквозной ток, имеющий большее значение по сравнению с током, протекающим по участку с нормальным сопротивлением изоляции. Разлагая остатки влаги, он способствует повышенному выделению кислорода у анодной обкладки, которым окисляется алюминий. Образующийся при окислении тонкий слой оксида алюминия Al_2O_3 обладает хорошими электроизоляционными свойствами, благодаря чему сопротивление изоляции этого участка возрастает и уменьшается ток утечки.

7.4. РАЗРУШЕНИЕ СЛОЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Приложенное к обкладкам напряжение разрушает слой металлизации обкладок как вследствие электролитических процессов и переноса металла с анодной обкладки, так и частичными разрядами. При электролитическом разрушении скорость его можно оценить с помощью уравнения, предложенного Мак-Лином:

$$-\frac{d\delta}{dt} = \frac{\epsilon_a U M}{0,64 d n \gamma_m \tau}, \quad (7.2)$$

где δ — толщина слоя металлизации, нм; U — приложенное напряжение, В; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; M — атомная масса; n — валентность и γ_m — плотность металла, которым выполнена металлизация, г/см³; d — толщина диэлектрика, мкм; τ — постоянная времени конденсатора.

Разрушение цинковой металлизации может происходить при повышенной температуре и в отсутствие электрического поля. Пропитка конденсаторов с обкладками из металлизированного диэлектрика ускоряет процесс их разрушения. Обкладка на основе металлизированного неполярного диэлектрика разрушается быстрее, чем полярного, поскольку адгезионные силы у него меньше, чем у полярного. В целях улучшения адгезии на подлежащий металлизации материал наносится слой из галогеносодержащего синтетического электроизоляционного материала, на который затем наносится слой алюминия. Для защиты от окисления слой металлизации из алюминия покрывается защитным слоем из свинца, олова, цинка, толщина которого составляет от 1 нм и выше. Для уменьшения разрушения слоя металлизации из алюминия к нему рекомендуется добавлять до 5% меди.