

DOI: 10.18721/JEST.230208

УДК 621.319.4

В.О. Белько, Д.Ю. Гливенко, О.А. Емельянов, И.О. Иванов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ФОРСИРОВАННЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Экспериментально исследована работа металлопленочных конденсаторов в режимах высокой токовой нагрузки. Обнаружены изменения частотных зависимостей емкости и диэлектрических потерь в процессе деградации. Было установлено, что в форсированном режиме работы эффективная емкость конденсаторов резко снижается в области высоких частот (более 1 кГц). Также обнаружено увеличение диэлектрических потерь и образование максимумов на частотной зависимости. Проведено численное моделирование процесса деградации контактных узлов. Результаты численного моделирования показали, что изменение частотных зависимостей емкости и диэлектрических потерь конденсатора связано с деградацией контактных узлов и последующим неравномерным распределением потенциала по электродам конденсатора. На основании экспериментальных и расчетных данных предложена эквивалентная схема металлопленочного конденсатора, учитывающая деградацию электродов в процессе эксплуатации в форсированном режиме.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ; ЕМКОСТЬ; ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ; ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Ссылка при цитировании:

В.О. Белько, Д.Ю. Гливенко, О.А. Емельянов, И.О. Иванов. Влияние форсированных токовых нагрузок на параметры электрических конденсаторов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 81–90. DOI: 10.18721/JEST.230208

V.O. Belko, D.Yu. Glivenko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

CURRENT OVERLOAD MODE INFLUENCE ON ELECTRICAL CAPACITORS PARAMETERS

We have experimentally studied the operation of metallized film capacitors in high current overload mode. We have detected changes in the frequency dependencies of capacitance and dissipation factor were found. It was found that effective capacitance rapidly decreases in the high frequency region (more than 1 kHz). Moreover, an increase in the dissipation factor increasing and the appearance of maxima in the frequency dependence were found. The degradation of contact edges was numerically modelled. The results of numerical modeling showed that the changes in the frequency dependencies of capacitance and dissipation factor is due to the degradation of contact edges and the subsequent non-uniform distribution of electric potential in capacitor electrodes. Based on the experimental and calculated data, we have suggested an equivalent circuit of a metallized film capacitor. This circuit takes into account the degradation of electrodes during operation in overload mode.

ELECTRICAL CAPASITORS; CAPACITANCE; DISSIPATION FACTOR; EQUIVALENT CIRCUIT; NUMERICAL MODELING.

Citation:

V.O. Belko, D.Yu. Glivenko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov, Current overload mode influence on electrical capacitors parametrs, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (02) (2017) 81–90, DOI: 10.18721/JEST.230208

Введение

В устройствах низковольтной преобразовательной техники широкое применение нашли металлопленочные конденсаторы (МПК) на основе органических диэлектриков (полиэтилентерефталат, полипропилен, полифениленсульфид и др.). Электрические режимы в ряде устройств характеризуются уровнем напряжения, не превышающим 1 кВ (обычно 300–600 В), а рабочие частоты составляют от сотен герц до десятков килогерц. В этом диапазоне конденсаторы с пленочным диэлектриком имеют достаточно высокие значения удельной реактивной мощности. В технических условиях (ТУ) на серийно выпускаемые электрические конденсаторы допустимые параметры режимов эксплуатации определяются исходя из сроков службы ($\tau_{сл}$) на уровне от единиц до десятков тысяч часов. Основные факторы, определяющие работоспособность конденсаторов, — это напряженность электрического поля E в диэлектрике, частота приложенного напряжения f , максимальная рабочая температура T_{max} (как правило в центре конструкции), а также действующее значение тока через конденсатор I_p .

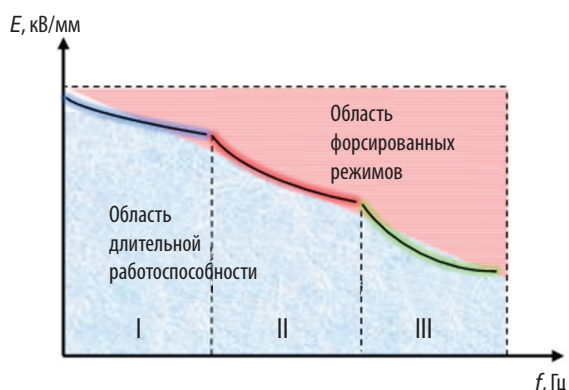


Рис. 1. Качественная зависимость допустимого значения напряженности электрического поля конденсаторного диэлектрика от частоты

Fig. 1. Qualitative dependence of maximum electric field versus operating frequency

На рис. 1 представлена качественная зависимость предельно допустимого значения напряженности электрического поля в диэлектрике конденсатора от частоты при определенной температуре окружающей среды и неизменном сроке службы. В области низких частот (зона I) предельно допустимое рабочее напряжение определяется исходя из соображений запаса по кратковременной электрической прочности $E_{кр}$ диэлектрика и деградации емкости конденсатора вследствие развития процессов самовосстановления (СВ). В случае локального пробоя в местах пониженного значения электрической прочности (что неизбежно связано с неоднородной структурой рабочего диэлектрика и большой площадью электродов) возникает значительная величина плотности тока пробоя. При этом в зоне пробоя выделяется энергия, достаточная для частичного уничтожения некоторой области тонкого металлизированного электрода (толщиной 10–20 нм) вблизи канала пробоя. Образующая таким образом зона деметаллизации изолирует место пробоя от остальной части электрода и конденсатор восстанавливает значение электрической прочности.

В области II основным критерием служит ограничение мощности тепловыделения P_A в конденсаторе, которая определяется в первую очередь потерями энергии электромагнитного поля в диэлектрике и металлических частях (электроды, контактные узлы, выводы). В этом случае существуют ограничения на градиент и максимальное значение температуры в диэлектрике с точки зрения его длительной эксплуатации с учетом теплового старения. Кроме того, для конденсаторов с сильной температурной зависимостью фактора потерь $\epsilon''(T)$ допустимое значение напряжения U ограничивается необходимостью запаса относительно критической мощности тепловыделения для предотвращения развития тепловой неустойчивости, заканчивающейся, как правило, тепловым пробоем.

При дальнейшем увеличении частоты действующего напряжения (зона III) существен-

ным становится токовая устойчивость металлических частей конструкции конденсатора (в первую очередь — контактных узлов и электродов). В этом случае процесс термического разрушения носит локальный характер, а критерий выбора режима эксплуатации определяется ограничением действующего значения тока I_p . Предлагаемая статья посвящена исследованию режимов работы МПК, соответствующих III зоне рассматриваемых параметров на рис.1.

Многие исследования подтверждают, что контактный узел металлопленочных конденсаторов — наиболее критичный элемент конструкции в плане воздействия больших импульсных токов. Деграция контакта может быть обусловлена как электродинамическими, так и термомеханическими нагрузками. При этом имеется ряд исследований, указывающих на пороговое значение начала разрушения в зависимости от амплитуды тока, энергии импульса, частоты и т. д. [1–3]. Процесс разрушения контактного узла в общем случае имеет несколько стадий: джоулев нагрев контактной зоны, интенсивное локальное испарение металла (электрический взрыв) и последующий пробой по парам испарившегося металла с формированием микродугового разряда. Некоторые перечисленные стадии рассматривались в работах, где приведен ряд экспериментальных [4–6] и теоретических результатов [7–9]. В качестве параметров меры деграции конденсаторов можно рассматривать снижение первоначальных значений емкости, рост эквивалентного последовательного сопротивления ESR и тангенса угла потерь испытываемых конденсаторов [2]. При этом указанные величины могут иметь частотную дисперсию своих зависимостей в широком диапазоне частот от 20 Гц до 50 МГц, что отмечалось в [10]. В последние годы опубликованы несколько результатов исследований, касающихся деграции МПК в условиях значительных нагрузок. Приводятся данные по статистическим закономерностям отказа конденсаторов и выявлению их чувствительных параметров к исследованным режимам [3, 11–12]. Вместе с тем рассмотренные публикации не содержат данных экспериментальных исследований о работоспособности конденсаторов в форсированных режимах. В связи с невозможностью использования ТУ для прогнозирования работоспособности МПК

в форсированных режимах необходимо было провести соответствующие экспериментальные и теоретические исследования.

Цель данной статьи — изложить результаты исследования работы МПК в режиме высокой токовой нагрузки, когда амплитуда импульса тока в несколько десятков раз выше установленного в ТУ значения.

Методика

В качестве экспериментальных образцов использовались металлопленочные конденсаторы на основе полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) пленки. Диапазоны номинальных параметров конденсаторов составили 0,22–1 мкФ и 63–630 В.

Для исследования работоспособности конденсаторов в условиях высоких электродинамических нагрузок был разработан специальный лабораторный стенд. Схема испытательного стенда представлена на рис. 2.

Испытуемый конденсатор заряжался через зарядное сопротивление $R_{зар} = 10$ кОм, которое обеспечивало относительно низкую амплитуду зарядного тока. После этого посредством управляемого IGBT-модуля конденсатор разряжался на низкоиндуктивную нагрузку $R_n = 0,5$ Ом. Сопротивление нагрузки было выбрано таким образом, чтобы обеспечить аperiodический режим разряда с минимальным обратным выбросом. При этом амплитуда разрядного тока лежала в диапазоне 250–650 А, что в 40 и более раз превышает допустимые токи для исследуемых типов конденсаторов. Нагрузочное сопротивление также использовалось в качестве токового шунта. Частота повторения цикла заряд-разряд составила 50 Гц. Критерием окончания эксперимента была потеря емкости испытываемого конденсатора.

В ходе эксперимента при помощи цифрового осциллографа Lecroy WJ322 осуществлялась запись осциллограмм тока в цепи и напряжения на выводах конденсатора. Типичные экспериментальные осциллограммы представлены на рис. 3.

С периодичностью в несколько тысяч циклов заряда-разряда при помощи анализатора иммитанса HIOKI IM3570 проводились измерения частотных спектров емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора в диапазоне 10–10⁶ Гц.

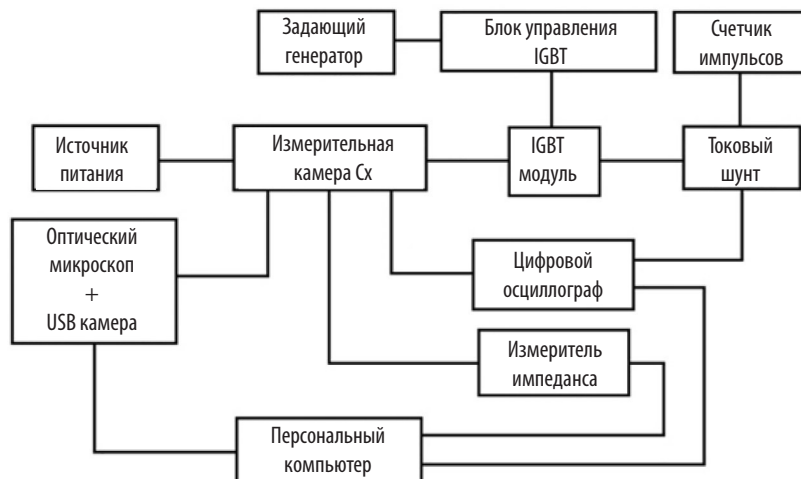


Рис. 2. Блок-схема испытательного стенда

Fig. 2. Block diagram of the test stand

Экспериментальные результаты

В предыдущих работах на примере модельных образцов авторами был обнаружен эффект полярного разрушения контактных узлов металлопленочных конденсаторов в условиях значительных электродинамических нагрузок [10]. В настоящей работе аналогичный эффект был показан на реальных конденсаторах. После окончания эксперимента конденсаторы разбирались с целью установления причины отказа. В 7 из 10 случаев отказ был обусловлен полным разрушением зоны контактного узла, соответствующего положительному выводу конденсатора. Это подтверждает, что в условиях форси-

рованных токовых нагрузок скорость разрушения «положительного» контактного узла выше, чем «отрицательного». В соответствии с [13] полярный эффект может быть объяснен электромиграционными процессами в области контактного узла металлопленочного конденсатора.

В ходе экспериментов был обнаружен еще один эффект, заключающийся в появлении существенной частотной дисперсии емкости конденсатора по мере его деградации. При этом существенные изменения претерпевает частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора. Частотная дисперсия емкости конденсаторов связана с диссипацией энергии электромагнитного поля и обусловлена в первую очередь процессами джоулевых и релаксационных потерь в элементах конденсатора (металлические части и рабочий диэлектрик). Совокупно указанные процессы могут быть охарактеризованы величиной комплексной эффективной емкости конденсатора и соответствующим значением тангенса угла диэлектрических потерь:

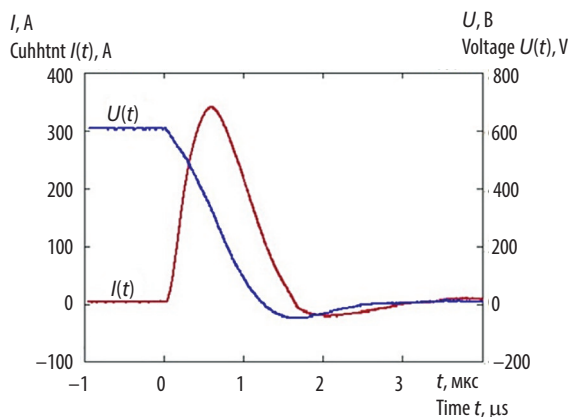


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения

Fig. 3. Current and voltage oscillograms

$$\dot{C}_{eff} = \frac{1}{i\omega \dot{Z}(\omega)} = C'(\omega) - iC''(\omega); \quad (1)$$

$$\text{tg}\delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)}, \quad (2)$$

где $\dot{Z}(\omega)$ — импеданс исследуемого конденсатора.

В случае мостовых схем измерения обычно пользуются значениями параметров эквивалентных схем замещения конденсаторов. Для последовательной схемы замещения импеданс конденсатора обусловлен эквивалентным последовательным сопротивлением $r_{SE}(\omega)$, емкостью $C_S(\omega)$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta(\omega)$:

$$\dot{Z}(\omega) = r_{SE}(\omega) + \frac{1}{i\omega C_S(\omega)}; \quad (3)$$

$$\text{tg } \delta(\omega) = \omega r_{SE}(\omega) C_S(\omega). \quad (4)$$

Связь между измеренными параметрами и параметрами эффективной емкости принимает следующий вид:

$$C'(\omega) = \frac{C_S(\omega)}{1 + \omega^2 \tau_{SE}^2(\omega)}; \quad (5)$$

$$C''(\omega) = \frac{\omega \tau_{SE} C_S(\omega)}{1 + \omega^2 \tau_{SE}^2(\omega)}, \quad (6)$$

$$\text{tg } \delta(\omega) = \omega \tau_{SE}(\omega). \quad (7)$$

В формулах (5)–(7) $\tau_{SE}(\omega) = r_{SE}(\omega) C_S(\omega)$. При этом частотное поведение модуля эффективной емкости определяется следующей зависимостью:

$$|\dot{C}_{eff}(\omega)| = \frac{C_S(\omega)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_{SE}^2(\omega)}}. \quad (8)$$

Для практических случаев измерения параметров обычно можно полагать

$$\text{tg}^2 \delta(\omega) \ll 1 \text{ и } |\dot{C}_{eff}| \approx C_S(\omega).$$

Деградация контактных узлов сопровождается значительным ростом тангенса в широком диапазоне частот, а также тенденцией к появлению одного или двух максимумов зависимости в области высоких частот. На рис. 3 и 4 представлены частотные зависимости емкости и тангенса угла потерь, измеренные в ходе испытания конденсатора 630 В — 0,47 мкФ. В данном случае отказ конденсатора наступил вскоре после достижения им 20 000 циклов заряда-разряда, поэтому кривую N_4 можно считать соответствующей состоянию, близкому к потере емкости исследуемого объекта.

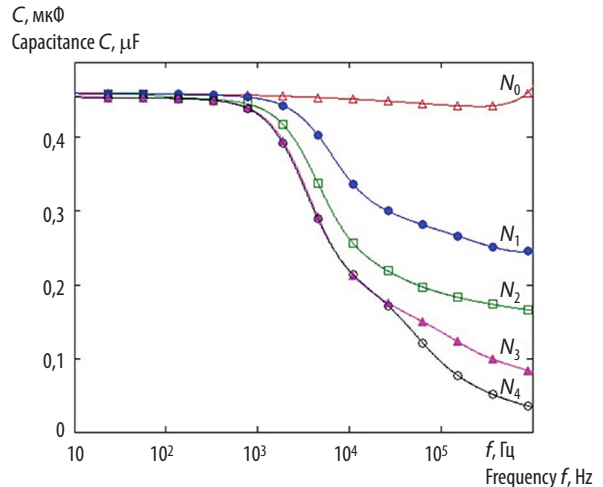


Рис. 4. Частотные спектры эффективной емкости исследуемого конденсатора после N ($N_0 = 0$, $N_1 = 5\,000$, $N_2 = 10\,000$, $N_3 = 15\,000$, $N_4 = 20\,000$) циклов заряд-разряд

Fig. 4. Capacitance spectra of testing capacitor after N ($N_0 = 0$, $N_1 = 5\,000$, $N_2 = 10\,000$, $N_3 = 15\,000$, $N_4 = 20\,000$) charge-discharge cycles

Как видно из рис. 4, на частотах свыше 1 кГц наблюдается существенное снижение емкости по отношению к исходному состоянию. В предельном случае (N_4 , 1 МГц) имеет место 90-процентное снижение эффективной емкости, что является неочевидным следствием старения конденсатора в условиях повышенных токовых нагрузок. Действительно, при размотке конденсатора после окончания эксперимента было установлено, что активная зона электродов не имеет следов деградации, т. е. разрушения металлизации из-за процессов самовосстановления (и, как следствие, уменьшения площади электродов) не наблюдалось. Также факт отсутствия разрушения основной площади электродов подтверждается сохранением конденсатором своей емкости в области низких частот. Обсуждение причин обнаруженного явления проводится в следующей части работы.

Как видно из рис. 5, частотная зависимость тангенса угла потерь по мере деградации конденсатора приобретает явно выраженный максимум, а после 10 000 циклов заряд-разряд появляется и второй пик. При этом значения тангенса угла потерь, которые для высоких частот лежат в интервале 0,5–1, во-первых, не могут быть объяснены потерями на поляризацию

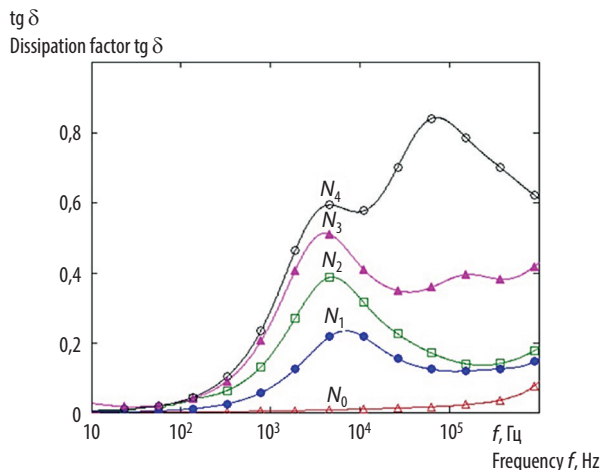


Рис. 5. Тангенс угла диэлектрических потерь исследуемого конденсатора после N ($N_0 = 0$, $N_1 = 5\,000$, $N_2 = 10\,000$, $N_3 = 15\,000$, $N_4 = 20\,000$) циклов заряд-разряд

Fig. 5. Dissipation factor of testing capacitor after: $N_0 = 0$, $N_1 = 5\,000$, $N_2 = 10\,000$, $N_3 = 15\,000$, $N_4 = 20\,000$ charge-discharge cycles

в диэлектрике конденсатора, а во-вторых, не позволяют говорить об исследуемом объекте как о классическом конденсаторе, у которого угол сдвига фазы приближается к 90° .

Обсуждение

Явление дисперсии емкости металлопленочных конденсаторов, возникающее в условиях старения, упоминается в литературе. Так, в [14, 15] автор описывает выраженную частотную зависимость емкости конденсаторов, у которых наблюдалась значительная коррозия металлизированных электродов вблизи контактных узлов. Автор проводил исследования на моделях, в которых имитировалось практически полное отсутствие электрического контакта между контактным узлом и металлизацией, при этом оставшиеся зоны контактирования находились на расстоянии, превышающем единицы — десятки метров. Действительно, в данном случае конденсаторная структура на основе металлизированных пленок должна рассматриваться как длинная линия со своими погонными емкостью и сопротивлением. В таком случае распределение потенциала по поверхности металлизации и, как следствие, общая емкость структуры будут определяться частотой приложенного напряжения.

Однако сложно представить, что деградация контактных узлов конденсатора будет сопровождаться появлением длинных (единицы — десятки метров) сплошных деметаллизированных областей, разделяющих металлизацию и контактный узел. Деградация контактных узлов и появление деметаллизированных областей — это в большей степени случайный процесс, так как зависит от технологии создания контактного узла, среднего размера частиц напыляемого металла, глубины их проникновения между слоями пленки и т. д. Поэтому стоит ожидать более равномерного расположения по длине электрода как деметаллизированных зон, так и областей, где электрический контакт металлизации с контактным узлом сохранен.

Но и при относительно равномерном расположении зон контактирования, когда расстояние между точками подвода потенциала к электроду не превышает малых десятков см, может наблюдаться существенная неоднородность распределения потенциала по поверхности металлизации, зависящая от расстояния между зонами контактирования, а также их геометрических размеров. В подтверждение данного предположения в программном пакете Comsol Multiphysics был смоделирован участок конденсаторной структуры, состоящей из ПЭТФ пленки толщиной 6 мкм и двух слоев алюминиевых металлизированных электродов толщиной 20 нм. Подвод потенциала $\varphi = 100$ В к верхнему металлизированному электроду осуществляется «точно» через две области шириной 50 мкм, расположенные на расстоянии 100 м друг от друга. Нулевой потенциал сообщается противоположному торцу нижнего металлизированного электрода. Расчет проводился для диапазона частот $10-10^6$ Гц.

Математическая постановка задачи моделирования

В расчетной области решаются уравнения вида

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho;$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D};$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad (9)$$

где \mathbf{D} — вектор электрического смещения; ρ — объемный заряд; \mathbf{J} — вектор плотности тока;

E — вектор напряженности электрического поля; σ — проводимость среды; ω — циклическая частота переменного поля; φ — потенциал; j — мнимая единица.

При этом граничные условия принимают следующий вид:

для областей подвода потенциала — $\varphi = 100$ В;

для заземленного электрода — $\varphi = 0$ В;

для внешних поверхностей расчетной области — $n \cdot J = 0$.

В результате численного моделирования была построена картина распределения потенциала по поверхности металлизированного электрода (рис. 6). Как видно, вблизи зон контактирования наблюдается большой градиент потенциала, а на расстоянии порядка ширины электрода потенциал спадает более чем в 3 раза, при этом в области между контактными площадками образуются так называемые «мертвые зоны», в пределах которых потенциал имеет наименьшее значение (снижение по отношению к исходному уровню более чем в 5 раз). Понятно, что полная емкость такой структуры значительно ниже ее геометрической емкости в условиях электростатического поля или поля низкой частоты и будет определяться преимущественно областями вблизи контактных площадок. Таким образом, для испытанных конденсаторов неоднородное распределение потенциала по площади металлизации на высоких частотах определяется не только конечной скоростью распространения электромагнитного поля вдоль электродов, но и неравномерным контактированием металлизации с контактным узлом.

Для численного описания параметров конденсатора в широком диапазоне частот с учетом процессов, происходящих при деградации контактных узлов, была предложена эквивалентная схема металлопленочного конденсатора (рис. 7). Схема состоит из трех групп элементов. Конденсаторы C_1 и C_3 отвечают за емкость катодных и анодных приконтактных областей, резисторы R_{k1} и R_{k2} — за сопротивление контактных узлов, то есть областей перехода к металлизации. Разделение их на отдельные цепочки правомерно, так как было показано, что скорости деградации контактных узлов различных полярностей существенно

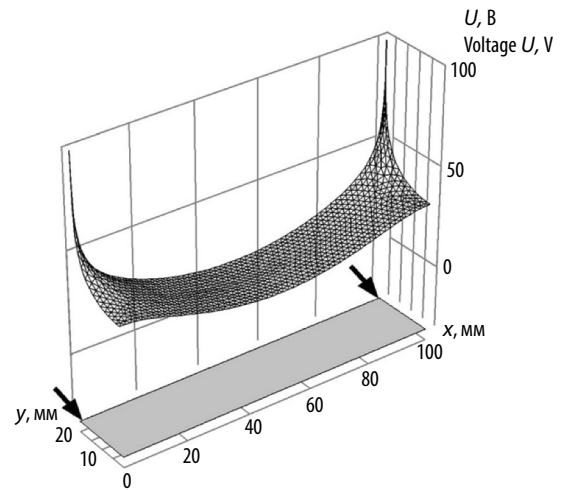


Рис. 6. Распределение потенциала по поверхности электрода при неравномерном («точечном») подводе тока. Черными стрелками указаны зоны контактирования металлизации с контактным узлом. Частота напряжения 1 МГц

Fig. 6. Potential distribution at the electrode surface with nonuniform current supply. Black arrows are contacts of metallization and contact edge. Operating frequency is 1 MHz

различаются. Конденсатор C_2 символизирует емкость участков, отдаленных от контактных зон, где градиент потенциала незначительный. Сопротивления R_1, R_2 и R_3, R_4 являются эквивалентными сопротивлениями металлизированных электродов соответственно положительной и отрицательной полярности.

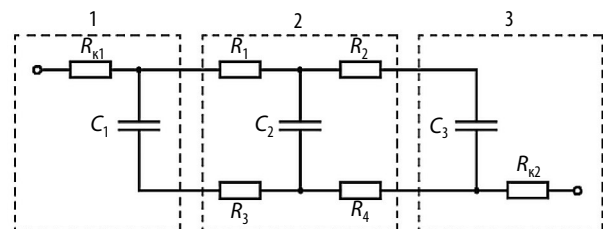


Рис. 7. Эквивалентная схема МПК для описания частотной зависимости емкости: группы элементов 1 и 3 символизируют прианодную и прикатодную области конденсатора, в пределах которых имеет место большой градиент потенциала; группа 2 — область конденсатора с относительно равномерным распределением потенциала по площади электродов

Fig. 7. MFC's equivalent circuit for capacitance frequency dependence description: elements groups 1 and 3 symbolize anode and cathode area, group 2 is area with relatively uniform potential distribution at the electrode surface

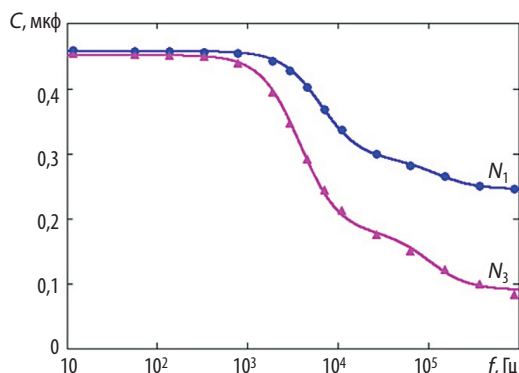


Рис. 8. Частотные спектры емкости конденсатора после $N_1 = 5\,000$ и $N_3 = 15\,000$ циклов заряд-разряд. Маркеры — эксперимент; сплошные линии — расчет

Fig. 8. Capacitance spectra after $N_1 = 5\,000$ and $N_3 = 15\,000$ charge-discharge cycles. Markers are experiment data and lines are calculating data

В результате подбора параметров эквивалентной схемы были получены частотные зависимости емкости для разных стадий деградации контактных узлов. На рис. 8 представлены некоторые частотные спектры емкости, полученные экспериментально и расчетным путем. Параметры эквивалентной схемы для полученных зависимостей приведены в табл. 1. Значения параметров $R_{к1}$ и $R_{к2}$ приняты равными 0,01 Ом для все расчетных кривых.

Как видно из рис. 8, расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными, что свидетельствует об адекватности применяемого подхода. Таким образом, предложенная эквивалентная схема позволит оценивать текущее состояние контактных узлов металлопленочного конденсатора на основе измерений частотных спектров емкости и прогнозировать работоспособность изделий в форсированных режимах.

Параметры эквивалентной схемы МПК

Equivalent circuit parameters of the MFC

N	C_1 , нФ	C_2 , нФ	C_3 , нФ	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом
5000	83	214	160	136	7	149	6
15000	79	213	159	264	2	139	10

Выводы

Проведено исследование влияния высоких (форсированных) токовых нагрузок на параметры МПК. Установлено, что в данном режиме работы эффективная емкость конденсаторов резко снижается в области высоких частот (более 1 кГц). Также обнаружено увеличение диэлектрических потерь и образование максимумов на частотной зависимости.

Проведено численное моделирование влияния разрушения контактных узлов на распре-

деление потенциала по электродам в программном пакете COMSOL Multiphysics. Установлено, что частотная дисперсия эквивалентной емкости связана с неравномерным распределением плотности тока в электродах.

На основании экспериментальных данных и численного моделирования предложена эквивалентная схема МПК. Она учитывает деградацию конденсаторных электродов в области контактных узлов и может быть использована при оценке работоспособности МПК в форсированных режимах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Picci G., Rabuffi M. Pulse Handling Capability of Energy Storage Metallized Film Capacitors // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. Vol. 28. № 5. P. 1603–1606.
2. El-Husseini M.H., Venet P., Al-Majid A., Fathallah M., Rojat G., Ferreira J.A. Manufacturing Technology Effect on Current Pulse Handling Performance of

Metallized Polypropylene Film Capacitors // Journal of Physics D: Applied Physics. 2003. Vol. 36. № 18. P. 2295–2303.

3. Li H., Wang B., Li Z., Liu D. Effect of Pulsed Discharge Current on Lifetime Performance of Metallized Polypropylene Film Capacitors // IEEE Transactions on

Dielectrics and Electrical Insulation. 2014. Vol. 39. № 1. P. 353–356.

4. **Lin F., Dai X., Yao Z., Li J.** Research on Electrode-End Contact Degradation of Metallized Polypropylene Capacitors // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003. Vol. 21. № 3. P. 957–963.

5. **Li Z., Li H., Lin F., Chen Y., Liu D., Wang B.** Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors // *Microelectronics Reliability*. 2013. Vol. 53. № 12. P. 1962–1967.

6. **Borghetti A., Nucci C.A., Pasini G., Pirani S., Rinaldi M.** Tests on Self-Healing Metallized Polypropylene Capacitors For Power Applications // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1995. Vol. 10. № 1. P. 556–561.

7. **Qi X., Boggs S.** Electrothermal failure of metallized film capacitor endconnections — computation of temperature rise at connection spots // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 94. № 7. P. 4449–4456.

8. **Qi X., Boggs S.** Transient Finite Element Computation of the Temperature Rise in Metallized Film Capacitor End Connections Caused by Underdamped Discharge // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. Vol. 15. № 1. P. 277–283.

9. **Qi X., Boggs S.** Analysis of the Effects of End Connection Quality on the Dielectric Loss of Metallized Film Capacitors // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2004. Vol. 11. № 6. P. 990–994.

10. **Sivakumar J., Usa S., Panneerselvam M.A.** Effect of Asymmetrical Edge Disconnection on Equivalent Series Resistance of Metallized Polypropylene Capacitors // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 7. № 3. P. 639–644.

11. **Makdessi M., Sari A., Venet P.** Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation // *Microelectronics Reliability*. 2014. Vol. 45. № 9–10. P. 1823–1827.

12. **McCluskey F.P., Li N.M., Mengotti E.** Eliminating infant mortality in metallized film capacitors by defect detection // *Microelectronics Reliability*. 2014. Vol. 54. № 9–10. P. 1818–1822.

13. **Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Glivlenko D.Y.** Metallized Film Capacitors Degradation under High Electrodynamic Load // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. P. 1–3.

14. **Brown R.W.** Linking corrosion and catastrophic failure in low-power metallized polypropylene capacitors // *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2006. Vol. 6. № 2. P. 326–333.

15. **Brown R.W.** Modeling of Capacitor Parameters Related to the Metal Film Layer with Partial Edge Disconnection // *IEEE Transactions on Components And Packaging Technologies*. 2007. Vol. 30, No. 4. P. 774–780.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛЬКО Виктор Олегович — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: vobelko@gmail.com

ГЛИВЕНКО Дмитрий Юрьевич — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: dmitry141094@gmail.com

ЕМЕЛЬЯНОВ Олег Анатольевич — кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: oaemel2@gmail.com

ИВАНОВ Иван Олегович — аспирант, инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

REFERENCES

1. **Picci G., Rabuffi M.** Pulse Handling Capability of Energy Storage Metallized Film Capacitors. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2000. Vol. 28. № 5. P. 1603–1606.

2. **El-Husseini M. H., Venet P., Al-Majid A., Fathallah M., Rojat G., Ferreira J.A.** Manufacturing Technology Effect on Current Pulse Handling Performance of Metallized Polypropylene Film Capacitors. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003. Vol. 36. № 18. P. 2295–2303.

3. **Li H., Wang B., Li Z., Liu D.** Effect of Pulsed Discharge Current on Lifetime Performance of Metallized Polypropylene Film Capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 39. № 1. P. 353–356.

4. **Lin F., Dai X., Yao Z., Li J.** Research on Electrode-End Contact Degradation of Metallized Polypropylene Capacitors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003. Vol. 21. № 3. P. 957–963.

5. **Li Z., Li H., Lin F., Chen Y., Liu D., Wang B.** Life-time investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors. *Microelectronics Reliability*. 2013. Vol. 53. № 12. P. 1962–1967.
6. **Borghetti A., Nucci C.A., Pasini G., Pirani S., Rinaldi M.** Tests on Self-Healing Metallized Polypropylene Capacitors For Power Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1995. Vol. 10. № 1. P. 556–561.
7. **Qi X., Boggs S.** Electrothermal failure of metallized film capacitor endconnections — computation of temperature rise at connection spots. *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 94. № 7. P. 4449–4456.
8. **Qi X., Boggs S.** Transient Finite Element Computation of the Temperature Rise in Metallized Film Capacitor End Connections Caused by Underdamped Discharge. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. Vol. 15. № 1. P. 277–283.
9. **Qi X., Boggs S.** Analysis of the Effects of End Connection Quality on the Dielectric Loss of Metallized Film Capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2004. Vol. 11. № 6. P. 990–994.
10. **Sivakumar J., Usa S., Panneerselvam M.A.** Effect of Asymmetrical Edge Disconnection on Equivalent Series Resistance of Metalized Polypropylene Capacitors. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 7. № 3. P. 639–644.
11. **Makdessi M., Sari A., Venet P.** Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation. *Microelectronics Reliability*. 2014. Vol. 45. № 9–10. P. 1823–1827.
12. **McCluskey F.P., Li N.M., Mengotti E.** Eliminating infant mortality in metallized film capacitors by defect detection. *Microelectronics Reliability*. 2014. Vol. 54. № 9–10. P. 1818–1822.
13. **Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Glivenko D.Y.** Metallized Film Capacitors Degradation under High Electrodynamical Load. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. P. 1–3.
14. **Brown R.W.** Linking corrosion and catastrophic failure in low-power metallized polypropylene capacitors. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2006. Vol. 6. № 2. P. 326–333.
16. **Brown R.W.** Modeling of Capacitor Parameters Related to the Metal Film Layer with Partial Edge Disconnection. *IEEE Transactions on Components And Packaging Technologies*. 2007. Vol. 30, No. 4. P. 774–780.

AUTHORS

BELKO Viktor O. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: vobelko@gmail.com

GLIVENKO Dmitrii Yu. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: dmitry141094@gmail.com

EMELYANOV Oleg A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: oaemel2@gmail.com

IVANOV Ivan O. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 27.03.2017.