

DOI: 10.18721/JEST.240105  
УДК 621.319.4; 537.226.7

*А.П. Плотников<sup>1</sup>, О.А. Емельянов<sup>1</sup>, В.О. Белько<sup>1</sup>, Р.А. Курьяков<sup>2</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – АО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЧИП-КОНДЕНСАТОРОВ: I. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Разработаны установки для определения импульсной электрической прочности чип-конденсаторов и напряжения их пробоя под воздействием грозовых импульсов. Экспериментально получены функции распределения указанных характеристик, обнаружено что они соответствуют нормальному закону. Получены осциллограммы тока и напряжения на конденсаторах, а также зависимость емкости и тангенса угла потерь от амплитудного напряжения испытательного импульса. Выполнен анализ отказов испытанных конденсаторов. Выделены основные возможные причины отказа чип-конденсаторов, представлены предварительные оценки по каждой из потенциальных причин отказа. Полученные результаты лягут в основу разработки методики предварительной оценки ИЭП чип-конденсаторов.

ЧИП-КОНДЕНСАТОР; ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ; ГРОЗОВОЙ ИМПУЛЬС; ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ; АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ.

*Ссылка при цитировании:*

А.П. Плотников, О.А. Емельянов, В.О. Белько, Р.А. Курьяков. Исследование импульсной электрической прочности современных чип-конденсаторов: I. Основные экспериментальные результаты // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 50–59. DOI: 10.18721/JEST.240105.

*A.P. Plotnikov<sup>1</sup>, O.A. Emelyanov<sup>1</sup>, V.O. Belko<sup>1</sup>, R.A. Kuryakov<sup>2</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – «NII «GIRICOND» JS Co, St. Petersburg, Russia

## **STUDY OF SHORT-PULSE DIELECTRIC STRENGTH OF CHIP CAPACITORS. PART I: THE MAIN EXPERIMENTAL RESULTS**

The goal of the paper is testing the short-pulse dielectric strength of chip capacitors and lightning impulse testing with subsequent failure analysis. The experimental setups are developed in order to determine the short-pulse dielectric strength and lightning impulse withstand voltage. The distribution functions of these characteristics have been found to follow the normal distribution. The oscillograms of current and voltage across the capacitors are presented, as well as the dependence of the capacitance and dissipation factor on the testing impulse voltage magnitude. A brief failure analysis is carried out. The main failure mechanisms are highlighted. The obtained results will be the basis for the method of preliminary estimation of short-pulse dielectric strength in chip capacitors.

CHIP CAPACITOR; SHORT PULSE DIELECTRIC STRENGTH; LIGHTNING IMPULSE; ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY; FAILURE ANALYSIS.

*Citation:*

A.P. Plotnikov, O.A. Emelyanov, V.O. Belko, R.A. Kuryakov. Study of short-pulse dielectric strength of chip capacitors. Part I: The main experimental results, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 50–59, DOI: 10.18721/JEST.240105.

## Введение

Электрические конденсаторы для поверхностного монтажа, называемые чип-конденсаторами (или SMD-конденсаторами), широко применяются в современной электронной и радиоэлектронной аппаратуре. Преимуществами чип-конденсаторов являются компактные размеры, высокие удельные емкости, низкие паразитные характеристики, быстрый монтаж на плату. Основные диэлектрики, используемые в современных чип-конденсаторах, — керамика и полимерные пленки [1]. Такие конденсаторы производятся по многослойной технологии и известны как «MLCC (*Multilayer ceramic capacitors*)» в случае керамического и «SMD chip film capacitor» в случае полимерного диэлектрика. К преимуществам керамических конденсаторов относятся высокая удельная емкость и высокая рабочая температура; пленочным конденсаторам свойственны высокая электрическая прочность, а также способность к самовосстановлению, существенно увеличивающая надежность конструкции.

Функционирование электронных компонентов силовых устройств нередко сопряжено с коммутационными перенапряжениями, для которых характерны многократное увеличение амплитуды напряжения и субмикросекундная длительность процесса. Такие импульсы могут также приводить к появлению электромагнитных помех [2]. Одним из вариантов контроля электронных компонентов (в нашем случае — чип-конденсаторов) на электромагнитную совместимость (ЭМС) являются имитационные испытания на импульсную электрическую прочность (ИЭП). Под ИЭП понимается способность изделия выполнять свои функции в процессе и (или) после воздействия на его выводы одиночного импульса напряжения (ОИН) заданной формы. Так, длительность импульса на уровне  $0,5U_{исп}$ , где  $U_{исп}$  — амплитуда ОИН, не должна превышать единиц мкс, а передний фронт — 5 % от длительности

импульса, т. е. время нарастания импульса напряжения не превышает единиц — десятков наносекунд. Следовательно, в связи с высоким значением отношения  $dU_{исп}/dt$  такой режим испытаний предполагает существенную электродинамическую (токовую) нагрузку на конденсатор. Последнее обстоятельство и отличает испытания конденсатора на ИЭП от испытаний повышенным напряжением, равным  $\sim (2-3)U_{ном}$  (где  $U_{ном}$  — номинальное напряжение конденсатора), когда время подъема напряжения составляет секунды и более. Таким образом, при испытаниях на ИЭП конденсатор подвергается воздействию как повышенного электрического поля, так и значительных электродинамических нагрузок.

Широко используемый аналог испытаний на ИЭП — испытания грозowymi импульсами. Испытаниям грозowymi импульсам подвергается все электрооборудование, для которого существует опасность поражения разрядом молнии. В этом случае параметры импульса в соответствии с ГОСТ и МЭК [3] представляют собой  $1,2/50$  мкс, что, с одной стороны, является облегченным режимом по отношению к испытаниям на ИЭП, а с другой — остается серьезным испытанием с точки зрения как электрических, так и электродинамических нагрузок.

Сведений об ИЭП чип-конденсаторов (как пленочных, так и керамических) в литературе имеется крайне мало. Найденные работы посвящены исследованию ИЭП электролитических (то есть полярных) конденсаторов [4]. Встречаются публикации на тему исследования ИЭП микросхем [5, 6], а также отдельно взятых полимерных пленок [7, 8].

Ограниченность сведений по исследуемой теме, с одной стороны, может быть объяснена весьма узкой нишей, которую занимают испытания на ИЭП среди других типов испытаний электротехнических изделий, с другой — существенной зависимостью ИЭП от таких факторов, как тип диэлектрика и конструкции кон-

денсатора, технологии изготовления и т.п. Результаты испытаний одних конденсаторов обычно неприменимы для аналогичных конденсаторов другого производителя, не говоря уже о других номиналах и конструкциях.

Тем не менее в связи с требованиями основных потребителей конденсаторной продукции отечественных предприятий необходимо включать результаты испытаний на ИЭП производимых изделий в сопроводительную документацию, а впоследствии ввести параметр ИЭП в ТУ на производимые конденсаторы.

Поскольку временные ресурсы как отделов технического контроля на предприятиях, так и служб входного контроля потребителя ограничены, имеет смысл разработать методику предварительной оценки ИЭП чип-конденсаторов на основе данных об основном диэлектрике, конструкции, номинальных параметрах. Такая методика позволит сократить длительность цикла испытаний и проводить только «прицельные» испытания вблизи значений, предсказываемых методикой. Предлагаемая работа является начальным этапом проекта, направленного на разработку методики предварительной оценки ИЭП чип-конденсаторов. Цель – разработать испытательные установки для определения импульсной электрической прочности чип-конденсаторов и напряжения их пробоя под воздействием грозových импульсов, а также выявить возможные причины отказа конденсаторов в ходе соответствующих испытаний.

### Методическая часть

**Объекты исследования.** В работе были испытаны на импульсную прочность пленочные конденсаторы К73-31\* ( $U_{ном} = 630$  В,  $C_{ном} = 6,8$  нФ). Тип диэлектрика – полиэтилентерефталат (ПЭТФ). Толщина полимерной пленки – 6 мкм.

\* Конденсаторы с органическим диэлектриком. Каталог продукции ЗАО «ЭЛКОД». 2015. 225 с.

**Испытательное оборудование.** При испытаниях изделий на ИЭП электрические импульсы, наводимые на электродах (выводах) конденсаторов в результате воздействия электромагнитных импульсов, моделируются эквивалентными одиночными импульсами напряжения, подаваемыми на внешние электроды образцов от генератора с нормированными параметрами. Схема разработанного генератора представлена на рис. 1.

Разработанный генератор импульсов позволяет регулировать длительность импульса напряжения в интервале 0,25–15 мкс, при этом длительность фронта не превышает 0,2 мкс, максимальная амплитуда напряжения – 5 кВ, ток – до 1 кА. Для испытаний конденсаторов на ИЭП были выбраны следующие параметры: длительность импульса – 10 мкс, длительность фронта – 150 нс.

Для испытания грозowymi импульсами напряжения используется установка, схема которой изображена на рис. 2.

Как известно, требования к параметрам одиночного импульса напряжения при испытаниях грозowymi импульсами следующие: длительность переднего фронта должна составлять 1,2 мкс; время снижения напряжения до 0,5 амплитудного – 50 мкс.

Для обеспечения необходимых длительностей переднего и заднего фронтов, а также полной длительности одиночного грозового импульса были выбраны следующие параметры элементов схемы:  $R_3 = 100$  кОм,  $R1 = 129$  Ом,  $R2 = 1640$  Ом,  $C = 0,047$  мкФ. В качестве быстродействующего ключа (время нарастания меньше 10 нс) использовались искровые разрядники фирмы EPCOS соответствующего номинала напряжения.

Напряжение на испытуемом конденсаторе измерялось емкостным делителем с коэффициентом деления  $k = 1:140$  и временем отклика ~0,5 нс. Ток измерялся с помощью низкоиндуктивного шунта специальной конструкции,  $R_{ш} = 0,8$  Ом.

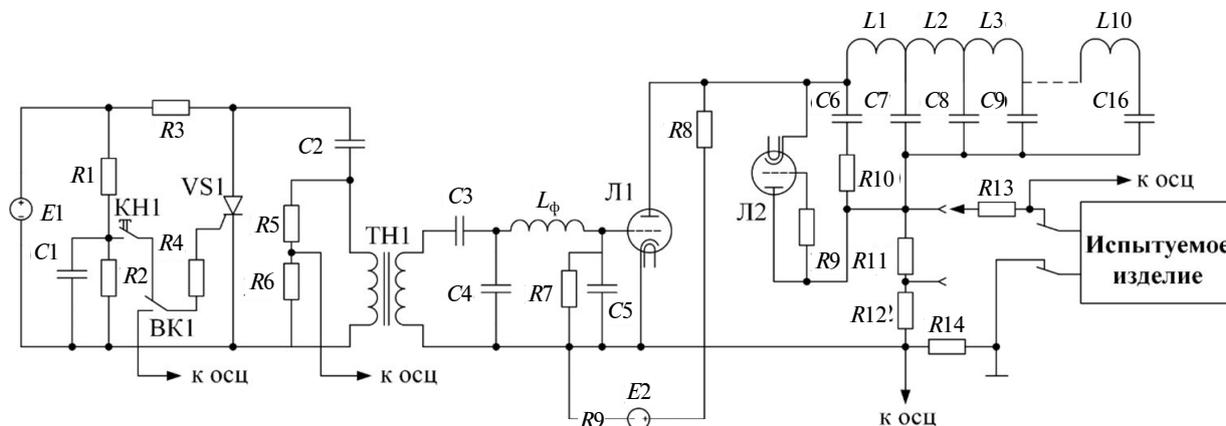


Рис. 1. Схема генератора коротких импульсов:  $E1$  – источник питания 500 В, 5 мА;  $E2$  – регулируемый источник питания 10 кВ, 5 мА  
 Fig. 1. Short pulses generator circuit diagram:  $E1$  – power supply 500 V, 5 mA;  $E2$  – regulated power supply 10 kV, 5 mA

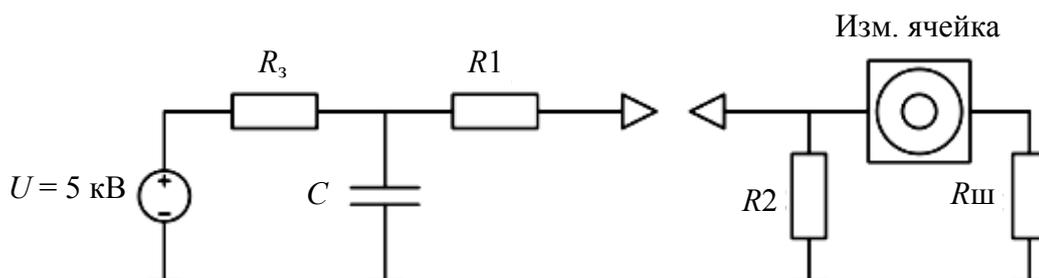


Рис. 2. Упрощенная схема установки для испытания чип-конденсаторов грозовыми импульсами напряжения  
 Fig. 2. Simplified circuit diagram for chip capacitors lightning impulse test

**Методика проведения испытаний**

Целью испытаний на ИЭП / испытаний грозовыми импульсами является контроль показателей электрической прочности образцов при заданных длительностях одиночных импульсов напряжений с учетом доминирующих механизмов деградации.

Этапы проведения испытаний:

1. Последовательное воздействие одиночных импульсов напряжения с выбранными параметрами на выводы испытательного образца и измерение его реакции на внешнее воздействие (изменения параметров  $C$  и  $tg \delta$ ).

2. Определение максимального значения амплитуды импульса, во время и (или) после воздействия которого параметры-критерии электрической прочности испытываемого образца соответствуют установленным нормам, а также соответствующих максимальных значений параметров реак-

ции конденсатора (амплитуды тока и напряжения на выводах).

В процессе испытаний амплитуду одиночных импульсов постепенно повышают до значения, при котором происходит обратимый и (или) необратимый выход контролируемых параметров конденсатора за пределы установленных норм. Значения показателей электрической прочности определяются по результатам измерения реакции образца при значениях параметров импульса напряжения на шаге, предшествующем отказу образца.

При исследовании электрической прочности конденсаторов рассматриваются два вида отказов образцов: параметрический и катастрофический.

Параметрический отказ конденсатора происходит, когда значения характеристик конденсатора ( $C$  и  $tg \delta$ ) изменяются на 20 % относительно начальных: электрическая емкость уменьшается, а тангенс угла

диэлектрических потерь растет. Параметрический отказ конденсатора фиксируется также в том случае, если наблюдается замыкание выводов конденсатора по его поверхности (поверхностное перекрытие).

К катастрофическим отказам образцов можно отнести нарушение целостности корпуса конденсатора, обугливание его составных частей, приводящее к невозможности его дальнейшей эксплуатации.

### Результаты экспериментов и обсуждение

Осциллограммы тока и напряжения на испытуемых конденсаторах, полученные при исследовании пленочных чип-конденсаторов на ИЭП и при воздействии на них грозowymi импульсами напряжения, представлены на рис. 3.

На рис. 3, *а, в* показаны случаи, когда конденсатор выдерживает испытательный импульс без каких-либо последствий – катастрофический отказ не происходит и измеренные после приложения импульса параметры конденсаторов не изменяются. На рис. 3, *б, г* представлены осциллограммы для случаев, когда в результате приложения импульса происходил катастрофический отказ конденсатора, а именно разрушение корпуса (см. рис. 5). Причем характер разрушения был идентичен для обоих типов импульсов. Интересная особенность такого отказа: даже будучи разрушенным, конденсатор сохранял существенную часть своей изначальной емкости, однако при этом резко (на порядок и более) увеличивался его тангенс угла диэлектрических потерь.

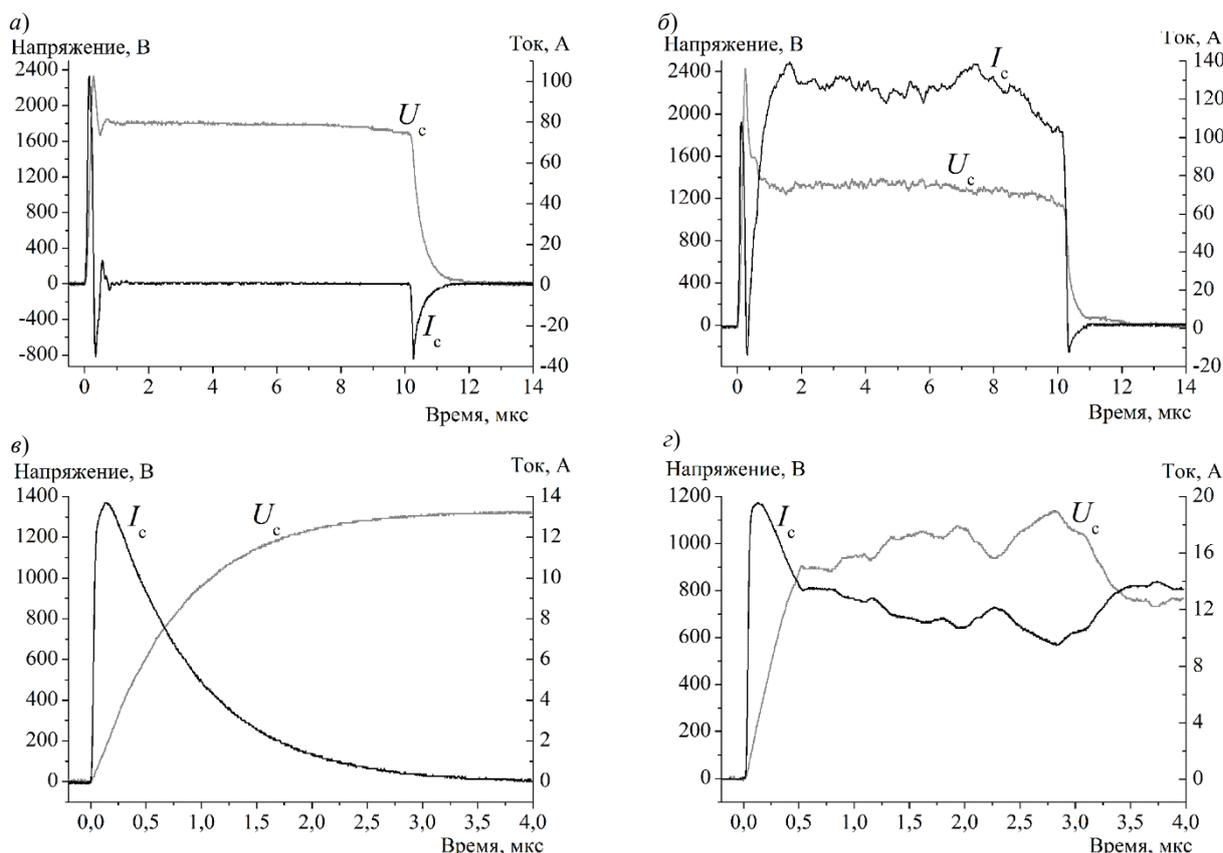


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на конденсаторе:  
*а* – испытание на ИЭП, отказа нет; *б* – испытание на ИЭП, отказ; *в* – испытание грозowym импульсом, отказа нет; *г* – испытание грозowym импульсом, отказ

Fig. 3. The oscillograms of current and voltage across the capacitor:  
*a* – short pulse dielectric strength test, no failure; *б* – short pulse dielectric strength test, failure;  
*в* – lightning impulse test, no failure; *г* – lightning impulse test, failure

Для наглядности были построены типичные зависимости емкости  $C$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  от амплитудного значения импульса напряжения при испытании на ИЭП. Испытание грозовыми импульсами дает качественно аналогичную картину.

Типичные фотографии разрушенных в ходе испытаний конденсаторов представлены на рис. 5. На левой фотографии можно заметить некоторые потемнения на торце секции.

При сравнении амплитудных значений импульсов напряжения (коротких и грозовых), при которых происходил отказ чип-конденсаторов, было установлено, что ИЭП составляет  $(1670 \pm 75)$  В, напряжение пробоя при испытании грозовыми импульсами –  $(2350 \pm 110)$  В (см. рис. 4). Напряжения пробоя удовлетворительно описы-

ваются нормальным законом распределения [9].

На основании экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что ИЭП исследованных пленочных чип-конденсаторов оказалась в  $\sim 1,4$  ниже, чем электрическая прочность при испытании грозовыми импульсами.

Наиболее вероятные причины разрушения корпуса чип-конденсаторов К73-31 в ходе испытаний:

*термомеханические напряжения*, возникающие в результате неравномерного разогрева конденсатора при подаче на него испытательного импульса;

*неэффективное самовосстановление*, приводящее к разрушению корпуса конденсатора вследствие чрезмерного выделения газообразных продуктов, сопровождающего процесс [10, 11].

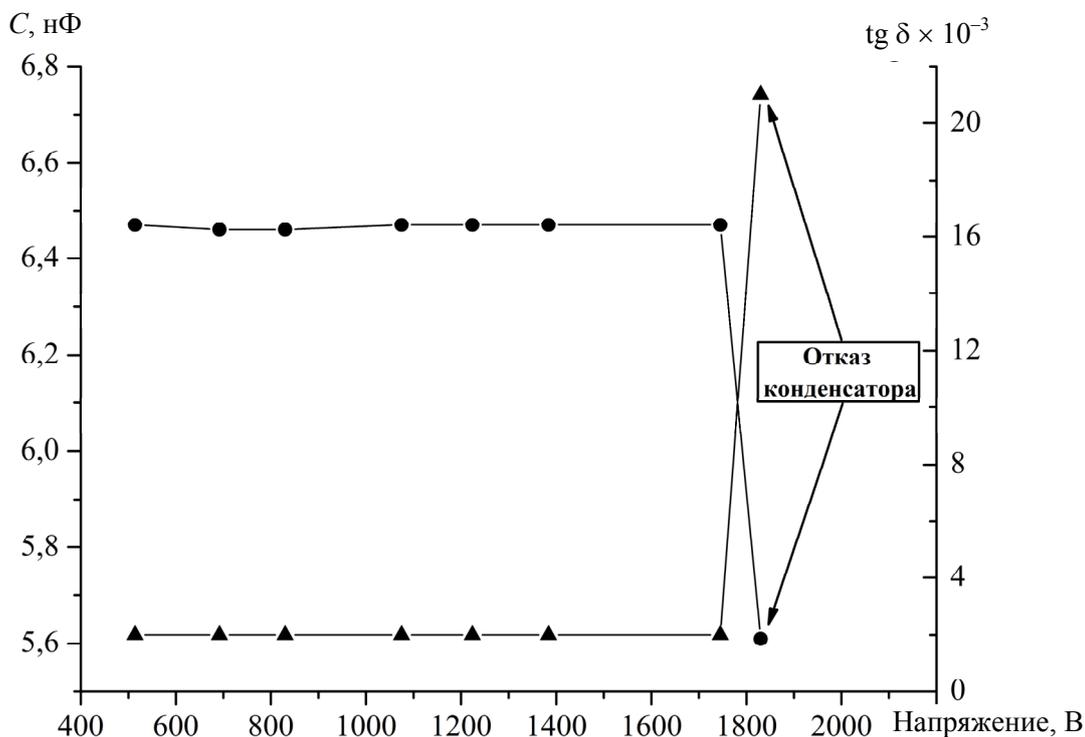


Рис. 4. Изменение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора в ходе испытаний

(—●—) –  $C$ ; (—▲—) –  $\operatorname{tg} \delta$

Fig. 4. Capacitance and dissipation factor changes during the short pulse dielectric strength test

(—●—) –  $C$ ; (—▲—) –  $\operatorname{tg} \delta$

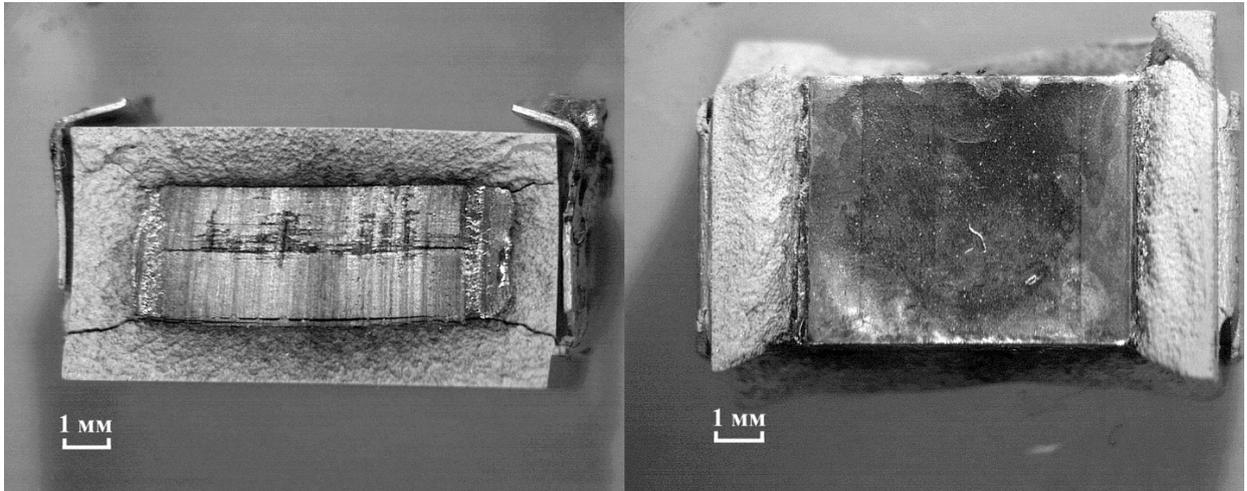


Рис. 5. Типичные фото разрушения конденсаторов К73-31  
 Fig. 5. The photographs of capacitors type K73-31 destruction

Вероятность, %

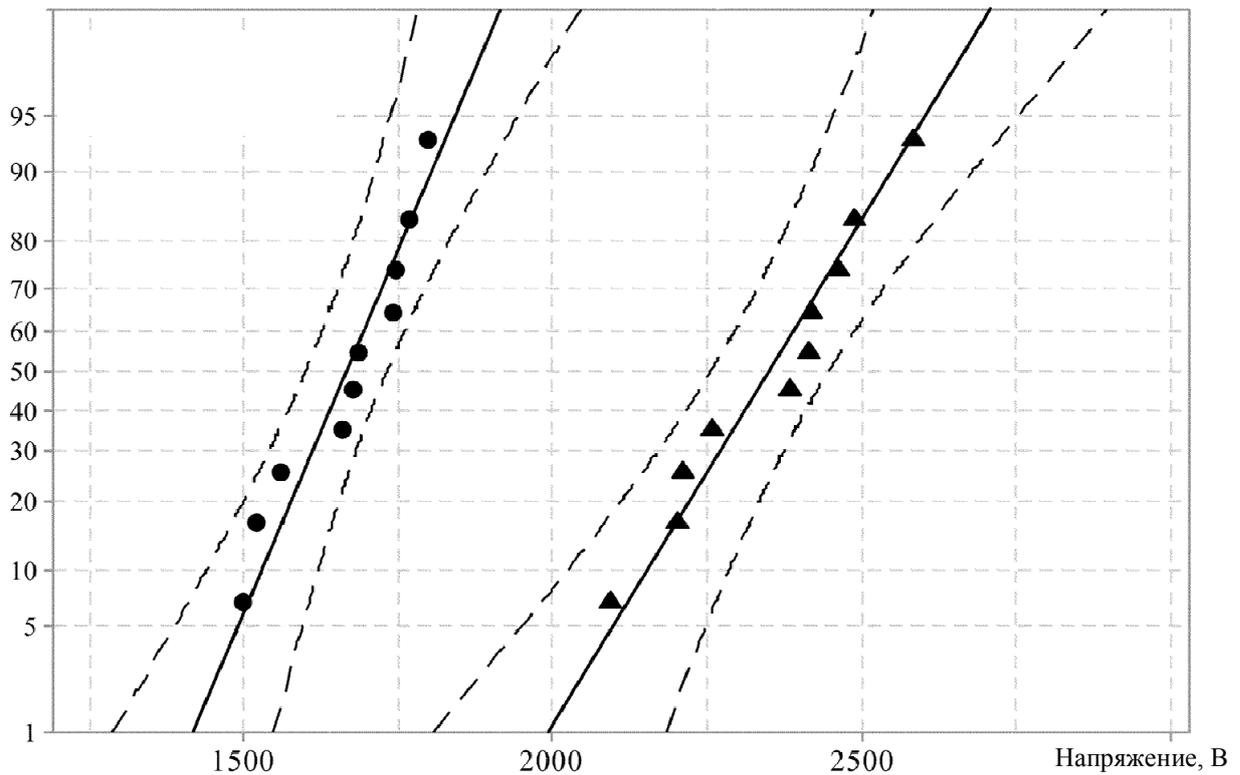


Рис. 6. Функции распределения напряжения пробоя при испытаниях на ИЭП (—●—) и грозовыми импульсами (—▲—)  
 Fig. 6. Withstand voltage distribution functions for short pulse dielectric strength (—●—) and lightning impulse tests (—▲—)

*межслоевое перекрытие* в месте разреза заготовки при изготовлении пленочных чип-конденсаторов.

Предварительные оценки по каждому из этих вариантов представлены далее.

**1. Термомеханические напряжения.** Геометрическая модель чип-конденсатора К73-31 с  $U_{\text{ном}} = 630$  В,  $C = 6,5$  нФ представляет собой параллелепипед размерами  $10 \times 8 \times 5$  мм. Источником тепла является активная часть конденсатора. Так как испытание происходит в импульсном режиме, то и тепловыделение — импульсное. В первом приближении можно предположить, что напряжение представляет собой гармоническую функцию с эквивалентной частотой  $f = (2\pi\tau_{\text{front}})^{-1} \approx 1$  МГц, где  $\tau_{\text{front}} \sim 120\text{--}180$  нс — время нарастания «короткого» импульса напряжения.\*\* Тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  конденсатора К73-31 на указанной частоте был определен при помощи измерительного моста Hioki IM3570 и составляет  $\sim 10^{-2}$ . Тогда в соответствии с выражением для оценки потерь  $P$  в конденсаторе получаем:

$$P = 2\pi f C U^2 \text{tg } \delta \approx 2000 \text{ Вт.}$$

По результатам предварительного расчета через 180 нс после начала подачи импульса напряжения отсутствует какой-либо градиент температуры по объему конденсатора, т. е. конденсатор даже не успевает прогреться за время приложения импульса. А поскольку отсутствует перепад температуры, то и появление термомеханических напряжений невозможно.

**2. Неэффективное самовосстановление.** Так как напряжение пробоя конденсатора в среднем составляет  $\sim 2000$  В, толщина пленки ПЭТФ равна 6 мкм, а конденсатор представляет собой секционированную структуру (две последовательные секции), то средняя напряженность поля в слое ди-

электрика составляет  $\sim 160$  В/мкм. А поскольку электрическая прочность пленок ПЭТФ лежит в диапазоне 500–700 В/мкм, представляется маловероятным электрический пробой пленки с последующей инициацией процесса самовосстановления, в результате которого образующиеся газообразные продукты разрушат корпус конденсатора изнутри.

**3. Межслоевое перекрытие.** При разрезе изначальной заготовки на блоки граница разреза (ввиду отсутствия закраин в этом месте) изолируется парафиносодержащим составом. Расстояние между слоями металлизации противоположной полярности равно толщине полимерной пленки (в нашем случае 6 мкм). Таким образом, напряжение пробоя шестимикронного слоя парафина ограничивается его электрической прочностью в таких коротких промежутках. Предварительные эксперименты показали, что электрическая прочность коротких изоляционных промежутков, покрытых парафином, в резко неоднородном поле в 3–4 раза выше, чем на воздухе. Основываясь на результатах, полученных в [12, 13], можно ожидать, что напряжение пробоя парафина между соседними слоями металлизации составит 750–1000 В, что соответствует испытательному напряжению (2000 В на две последовательные секции). В то же время, как показывают экспериментальные данные, электрическая прочность зависит также от длительности фронта импульса напряжения, причем чем короче фронт, тем меньше электрическая прочность. По всей видимости, данное обстоятельство связано с особенностями импульсной электрической прочности парафиносодержащего состава. Данный вопрос выходит за рамки данного исследования и требует дополнительного изучения.

## Выводы

В ходе исследований были разработаны испытательные установки для определения импульсной электрической прочности чип-

\*\* Емельянов О.А. Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники. Расчет систем конденсаторной изоляции и электрических конденсаторов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 41 с.

конденсаторов и их напряжения пробоя под воздействием грозových импульсов. Апробация установок проведена на полимерных чип-конденсаторах. В ходе испытаний было установлено, что ИЭП составляет  $(1670 \pm 75)$  В, а напряжение пробоя при испытании грозowymi импульсами –  $(2350 \pm 110)$  В. По результатам предвари-

тельного анализа причин отказа было установлено, что наиболее вероятно межслоевое перекрытие в зоне торца секции. Следующим этапом работы будет теоретическое исследование и численное моделирование процессов деградации чип-конденсаторов при испытании на импульсную электрическую прочность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ho J., Jow T.R., Boggs S. Historical introduction to capacitor technology // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2010. Vol. 26. No 1. P. 20–25.
2. Lampe L., Tonello A.M., Swart T.G. Electromagnetic Compatibility // Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid. 1, Wiley Telecom. 2014.
3. Ramarao G., Chandrasekaran K. Evaluation of circuit and its analytical function parameters for lightning and switching impulse // 2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT), Coimbatore, 2017. P. 302–305.
4. Курганов А.В., Романенко Л.В., Селезнев В.К. Экспериментальные исследования импульсной электрической прочности полярных конденсаторов // Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». 2011. Вып. 2. С. 41–42.
5. Ерощкин А.Л., Попов Р.А. Оценка надёжности полупроводниковых приборов и микросхем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-2. С. 221–225.
6. Epifantsev K.A., Skorobogatov P.K., Gerasimchuk O.A. An Analysis of the Temperature Effect on the Impulse Electric Strength of CMOS Chips // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. Issue 1. P. 40–43.
7. Закревский В.А., Пахотин В.А., Сударь Н.Т. Импульсная электрическая прочность пленки полипропилена // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 2. С. 249–253.
8. Zhao L., Liu G.Z., Su J.C., Pan Y.F., Zhang X.B. Investigation of Thickness Effect on Electric Breakdown Strength of Polymers Under Nanosecond Pulses // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. Vol. 39. No 7. P. 1613–1618.
9. Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении в технике высоких напряжений. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 312 с.
10. Shanshan Qin, Shilei Ma, Boggs S.A. The mechanism of clearing in metalized film capacitors // Electrical Insulation (ISEI) Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium. 10–13 June 2012. P. 592–595.
11. Belko V.O., Emelyanov O.A. Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 119. No 2. P. 024509.
12. Belko V., Emelyanov O., Shemet M. A study of nanosecond arc surface flashover in metalized polymer films // 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen. 2013. P. 476–477.
13. Grafton M.A., Fothergill J.C., Dissado L.A., Shirley-Elgood J.R.R., Stevens G.C., Thomas J.L. Controlling flashover between electrode segments in DC power capacitors // Solid Dielectrics, 2001. ICSD '01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference, Eindhoven. 2001. P. 279–282.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЛОТНИКОВ Андрей Павлович** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: andreyplochnikov@gmail.com

**ЕМЕЛЬЯНОВ Олег Анатольевич** — кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: oaemel2@gmail.com

**БЕЛЬКО Виктор Олегович** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: vobelko@gmail.com

**КУРЬЯКОВ Роман Андреевич** — аспирант АО «НИИ «Гириконд»

E-mail: kuryakov\_roman@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 31.01.2018



## REFERENCES

- [1] **Ho J., Jow T.R., Boggs S.** Historical introduction to capacitor technology. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2010. Vol. 26. No 1. P. 20–25.
- [2] **Lampe L., Tonello A.M., Swart T.G.** Electromagnetic Compatibility. *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid*. 1, Wiley Telecom. 2014. 624 p.
- [3] **Ramarao G., Chandrasekaran K.** Evaluation of circuit and its analytical function parameters for lightning and switching impulse. *2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT), Coimbatore*, 2017. P. 302–305.
- [4] **Kurganov A.V., Romanenko L.V., Seleznev V.K.** Eksperimental'nye issledovaniia impul'snoi elektricheskoi prochnosti poliarnykh kondensatorov. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Voprosy atomnoi nauki i tekhniki»*. 2011. Vyp. 2. S. 41–42. (rus.)
- [5] **Eroshkin A.L., Popov R.A.** Otsenka nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i mikroskhem. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2015. № 12-2. S. 221–225. (rus.)
- [6] **Epifantsev K.A., Skorobogatov P.K., Gerasimchuk O.A.** An Analysis of the Temperature Effect on the Impulse Electric Strength of CMOS Chips. *Russian Microelectronics*. 2015. Vol. 44. Issue 1. P. 40–43.
- [7] **Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A., Sudar' N.T.** Impul'snaia elektricheskaiia prochnost' plenki polipropilena. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2017. T. 87. Vyp. 2. C. 249–253. (rus.)
- [8] **Zhao L., Liu G.Z., Su J.C., Pan Y.F., Zhang X.B.** Investigation of Thickness Effect on Electric Breakdown Strength of Polymers Under Nanosecond Pulses. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011. Vol. 39. No 7. P. 1613–1618.
- [9] **Khaushil'd V., Mosh V.** Statistika dlia elektrotekhnikov v prilozhenii v tekhnike vysokikh napriazhenii. L.: Energoatomizdat, 1989. 312 s. (rus.)
- [10] **Shanshan Qin, Shilei Ma, Boggs S.A.** The mechanism of clearing in metallized film capacitors. *Electrical Insulation (ISEI) Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium*. 10–13 June 2012. P. 592–595.
- [11] **Belko V.O., Emelyanov O.A.** Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design. *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 119. No 2. P. 024509.
- [12] **Belko V., Emelyanov O., Shemet M.** A study of nanosecond arc surface flashover in metallized polymer films. *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen*. 2013. P. 476–477.
- [13] **Grafton M.A., Fothergill J.C., Dissado L.A., Shirley-Elgood J.R.R., Stevens G.C., Thomas J.L.** Controlling flashover between electrode segments in DC power capacitors. *Solid Dielectrics, 2001. ICSD '01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference, Eindhoven*. 2001. P. 279–282.

## AUTHORS

**PLOTNIKOV Andrei P.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university  
E-mail: andreplotnikow@gmail.com

**EMELYANOV Oleg A.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university  
E-mail: oaemel2@gmail.com

**BELKO Viktor O.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university  
E-mail: vobelko@gmail.com

**KURYAKOV Roman A.** – «NII «GIRICOND» JS Co.  
E-mail: kuryakov\_roman@mail.ru

Received: 31.01.2018