

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики / Высшая школа высоковольтной энергетики

Работа допущена к защите

Директор ВШВЭ

_____ В.О. Белько

« ____ » _____ 2021 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА БАКАЛАВРА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ В
МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ**

по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
подготовки

Направленность 13.03.02_07 «Высоковольтные электроэнергетика
(профиль) и электротехника»

Выполнил
студент гр. 3231302/70701

А.Ходжамов

Руководитель
доцент, к.т.н.

И.О. Иванов

Консультант
по нормоконтролю

А.С. Резник

Санкт-Петербург

2021

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт энергетики

УТВЕРЖДАЮ

Директор высшей школы

В.О. Белько

« » _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту **Ходжамову Ахмету**, группа **3231302/70701**

фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: **Исследование процессов самовосстановления в металлопленочных конденсаторах**

2. Срок сдачи студентом законченной работы:

1.06.2021

3. Исходные данные по работе: Научная литература по теме работы, экспериментальное и измерительное оборудование, инструкции к приборам.

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Введение , литературный обзор, методики экспериментальных исследований, экспериментальные результаты, заключение, список используемых источников

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): Нет _____

6. Консультанты по работе: нет _____

7. Дата выдачи задания: 24.02.2021 _____

Руководитель ВКР _____ И.О. Иванов _____
(подпись) инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 25.02.2021 _____
(дата)

Студент _____ А. Ходжамов _____
(подпись) инициалы, фамилия

Реферат

На 43 с., 29 рисунков, 2 таблицы

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫЙ КОНДЕНСАТОР, СЕГМЕНТИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ, СПЛОШНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ, ЭНЕРГИЯ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ.

Тема выпускной квалификационной работы: «Исследование процессов самовосстановления в металлопленочных конденсаторах».

Данная работа посвящена исследованию процессов, происходящих во время самовосстановления. Для изучения данных процессов разработалась методика, позволяющая оценить характеристики самовосстановления. Для получения экспериментальных данных была разработана схема, позволяющая достаточно точно получить необходимые параметры. Исследовались различные зависимости параметров металлопленочных конденсаторов, которые в последствие дали возможность оценить серийно выпускаемые конденсаторы.

Для обработки данных использовались программы Mathcad и Excel.

Задачи, решенные в процессе исследования:

- 1) Разработана методика, позволяющая оценить характеристики СВ.
- 2) Экспериментально определить параметры самовосстановления.
- 3) Применить разработанную методику к серийно выпускаемым МПК.

Объектами исследования являлись серийно выпускаемые металлопленочные конденсаторы.

Результаты выпускной квалификационной работы:

- 1) Разработана методика, позволяющая исследовать процессы самовосстановления в МПК.
- 2) Экспериментально определены необходимые зависимости.
- 3) На основе экспериментальных зависимостей проведено сравнение параметров МПК.
- 4) Было выявлено как тип металлизации влияет на ток самовосстановления и время самовосстановления.

ABSTRACT

43 pages, 29 pictures, 2 table

KEYWORDS: METALLIZED FILM CAPACITORS, SEGMENTED ELECTRODES, ALL-OVER ELECTRODES, SELF-HEALING ENERGY.

The topic of the final qualification work: "Research of self-healing processes in metal-film capacitors".

This work is devoted to the study of the processes that occur during self-healing. To study these processes, a technique was developed that allows us to evaluate the characteristics of self-healing. To obtain experimental data, a scheme was developed that allows us to obtain the necessary parameters fairly accurately. Various dependences of the parameters of metal-film capacitors were investigated, which later made it possible to evaluate mass-produced capacitors.

Mathcad and Excel programs were used for data processing.

Tasks solved in the course of the research:

1) A methodology has been developed that allows us to evaluate the characteristics of SH.

2) Experimentally determine the parameters of self-healing.

3) Apply the developed methodology to mass-produced MFC.

The objects of the study were mass-produced metal-film capacitors.

Results of the final qualification work:

1) A technique is proposed that allows to study self-healing in the MFC.

2) The necessary dependencies are determined experimentally.

3) On the basis of experimental dependences, the parameters of the MFC are compared.

4) It was revealed how the type of metallization affects the self-healing current and self-healing time.

The results of the final qualification work can be used for testing mass-produced metal-film capacitors.

Содержание

Введение	5
1. Литературный обзор	6
1.1. Металлопленочные конденсаторы	6
1.2. Процесс самовосстановления в МПК	12
1.3. Способы ограничения энергии СВ	16
1.4. Выводы по литературному обзору	18
2. Методическая часть	20
2.1. Экспериментальные образцы.....	20
2.2. Методика исследования процессов самовосстановления МПК	20
2.3. Метод расчета энергии самовосстановления МПК	22
2.4. Метод расчета токов и времени самовосстановления	25
2.5. Вывод по методической части.....	27
3. Экспериментальная часть.....	28
3.1. Результаты экспериментального исследования энергии самовосстановления МПК.....	28
3.2. Результаты экспериментального исследования токов СВ и длительности процесса	36
Заключение	39
Список используемой литературы.....	40

Введение

На сегодняшний день нельзя представить электротехнику без использования конденсаторов. Из-за постоянного прогресса в области электроэнергетики к конденсаторам предъявляются новые требования, что неизбежно влечет за собой использования конденсаторов с повышенными удельными характеристиками. Именно данный тип конденсаторов-металлопленочные- был рассмотрен в работе. Металлопленочные конденсаторы все чаще используются в электротехнике за счет своей отличительной особенности к самовосстановлению, то есть сохранение работоспособности после пробоя. Металлопленочные конденсаторы могут быть выполнены в различных конструкциях, в зависимости от формы – цилиндрические и плоскострессованные и в зависимости от выполнения электродов – электроды со сплошной металлизацией и сегментированной.

После процессов самовосстановления в конденсаторе меняются его параметры, в частности: емкость, тангенс диэлектрических потерь и сопротивление. Для более эффективного использования конденсаторов необходимо понимать какие процессы происходят во время самовосстановления и как именно меняются его параметры. На сегодняшний день отсутствует сколько-нибудь внятная методика, позволяющая оценить характеристики, связанные с самовосстановлением.

Таким образом, в данной работе представлена методика, позволяющая оценить характеристики самовосстановления, а именно: зависимости энергии самовосстановления от пробивного напряжения, зависимость тангенса угла диэлектрических потерь и емкости от суммарной энергии самовосстановления и количества актов самовосстановления, токи самовосстановления, также было установлено, как меняется сопротивление изоляции в процессе старения.

1. Литературный обзор

1.1. Металлопленочные конденсаторы

Развитие современной техники не стоит на месте, рынок диктует новые требования к элементам электротехнического оборудования, в том числе и к одному из самых распространённых – конденсатору. Конденсатором называют систему из двух или более проводников (обкладок), разделённую диэлектриком, предназначенную для использования ее емкости [1].

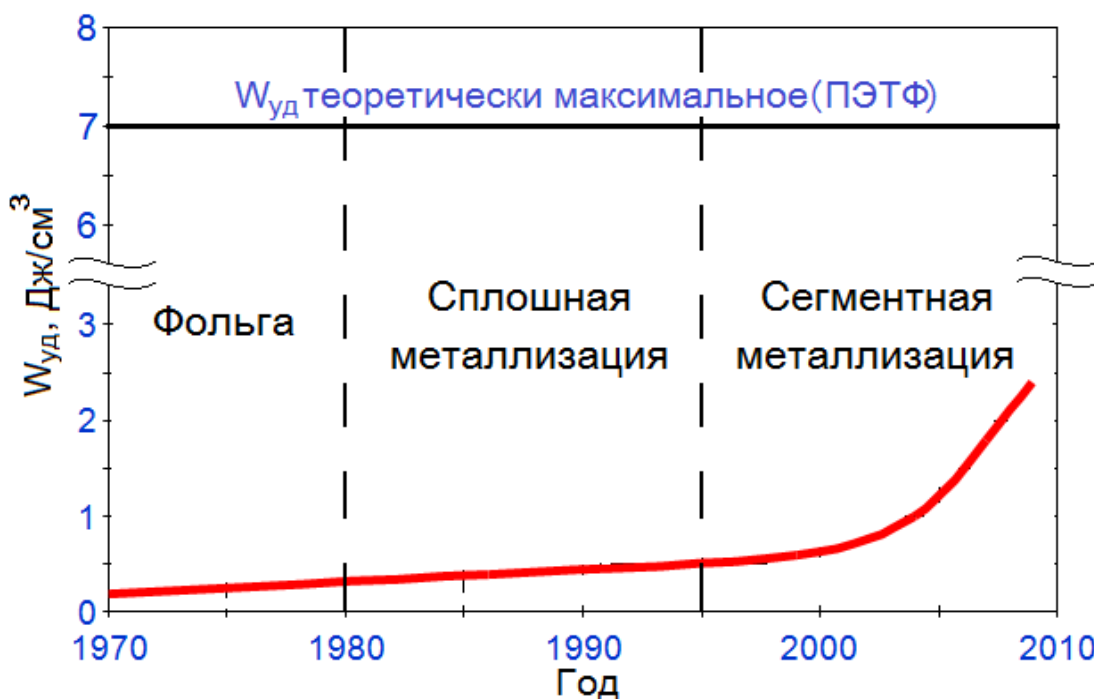


Рис. 1. Рост $W_{уд}$ диэлектрической системы конденсаторов за последние 40 лет [2].

Характеристики конденсатора в большей степени зависят от выбранного диэлектрика, поэтому конденсаторы логичнее всего классифицировать по роду используемого материала. Различают следующие типы конденсаторов:

1. Конденсаторы с газообразным диэлектриком.
2. Конденсаторы с жидким диэлектриком.
3. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком.
4. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком.
5. Электролитические.

Конденсаторы используются в устройствах импульсной техники в качестве накопителей электрической энергии, в технике синусоидальных токов в качестве

реактивных элементов, которые оказывают сопротивление, зависящее от частоты, реактивному току. Одной из важных характеристик конденсатора является – энергоэффективность. Энергоэффективность можно оценить с помощью удельной запасаемой энергии на единицу объема, которая определяется следующей формулой:

$$W_{уд} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{2} k, \quad (1)$$

«где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, E – напряженность электрического поля в диэлектрике конденсатора, k – коэффициент активного объема конденсатора. Для низковольтных конденсаторов k достигает значений 0,8-0,9, для высоковольтных же конденсаторных установок значение k будет лежать в пределах 0,5-0,6» [1,2].

Тенденция развития электрических конденсаторов направлена на увеличение их удельной энергии (рис 1.). Из формулы (1) видно, что удельно запасаемая энергия на единицу объема зависит от напряженности электрического поля в диэлектрике конденсатора. Из всех типов конденсаторов наибольшим значением удельной энергии (до 4 Дж/см³) [3] обладают металлопленочные конденсаторы (МПК). МПК обычно выполнен, как минимум, из двух односторонних металлизированных пленок. Полимерные пленки покрываются цинком или алюминием, (оба материала имеют как свои преимущества, так и недостатки) далее пленка наматывается на оправку.

«Для увеличения рабочего напряжения в некоторых конструкциях МПК металлизацию делают в виде изолированных полос. При наложении второй пленки с подобной структурой металлизации образуются зоны перекрытия электродов.

Такие МПК называются мультисекционными. В итоге получается цилиндрическая секция с последовательно соединенными емкостями» [3,4]. Вид конденсаторной секции такого типа представлен на рис. 3

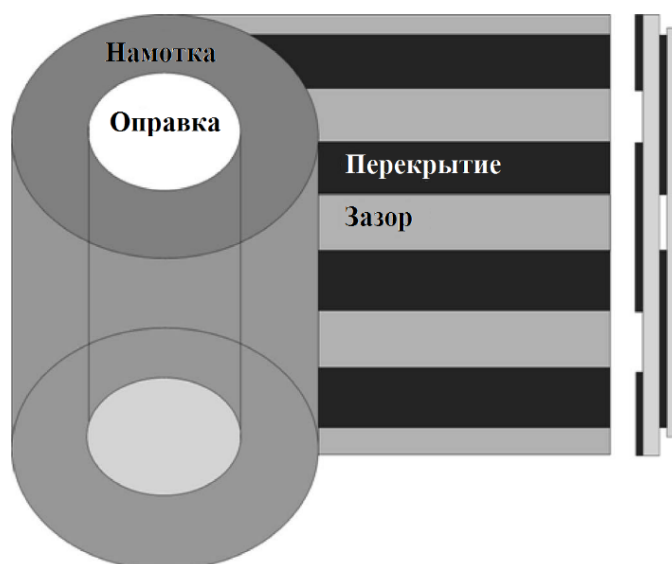


Рис.2. Вид мультисекционной конденсаторной секции [5].

Интерес к конденсаторам с использованием тонкого слоя проводника, напыленного на диэлектрик, появился еще в начале 1950-ых годов, когда производители фольговых конденсаторов столкнулись с проблемой тепловыделения и теплоотвода. Кроме того, при использовании фольговых обкладок, даже при достаточном сжатии секций, образуется воздушный зазор в случае непропитанного диэлектрика или пропитанной массой – в пропитанном. Следствием этого становится значительное увеличение потерь энергии в конденсаторе с фольговыми электродами.

Используется два основных типа пленок: полярные и неполярные. Неполярные пленки имеют относительно полярных меньшую диэлектрическую проницаемость и малый тангенс угла диэлектрических потерь.

«Пленки, используемые в конденсаторостроение, могут быть выполнены из различных полимеров. Материал, из которого изготавливают пленку, зависит от конкретного случая. Чаще всего используют неполярный диэлектрик - полипропилен (ПП). Полипропилен похож на полиэтилен, но имеет более высокую нагревостойкость» [1]. Из полярных диэлектриков – это полиэтилентерефталат(ПЭТФ), также известен как лавсан. Стоит отметить, что у неполярных диэлектриков угол потерь почти не зависит от частоты и температуры, в то время как у полярных диэлектриков в процессе поляризации тангенс диэлектрических потерь имеет ярко выраженный максимум при

определенном значении частоты. Характеристики конденсатора зависят от многих факторов, но в первую очередь – это материал и толщина пленки. Полимерные пленки металлизуются алюминием и цинком. Толщина металлизации – единицы десятки нанометров, а толщина пленки – единицы десятки микрометров. Чтобы обеспечить контакт внешних выводов с электродами на торцы пленки напыляется металл, этот процесс называется шоопированием (рис 1.). Для шоопировки используются олово, алюминий, цинк и сплавы на их основе). Это позволяет обойтись без вкладных выводов и снизить индуктивность конденсатора. [3-5].

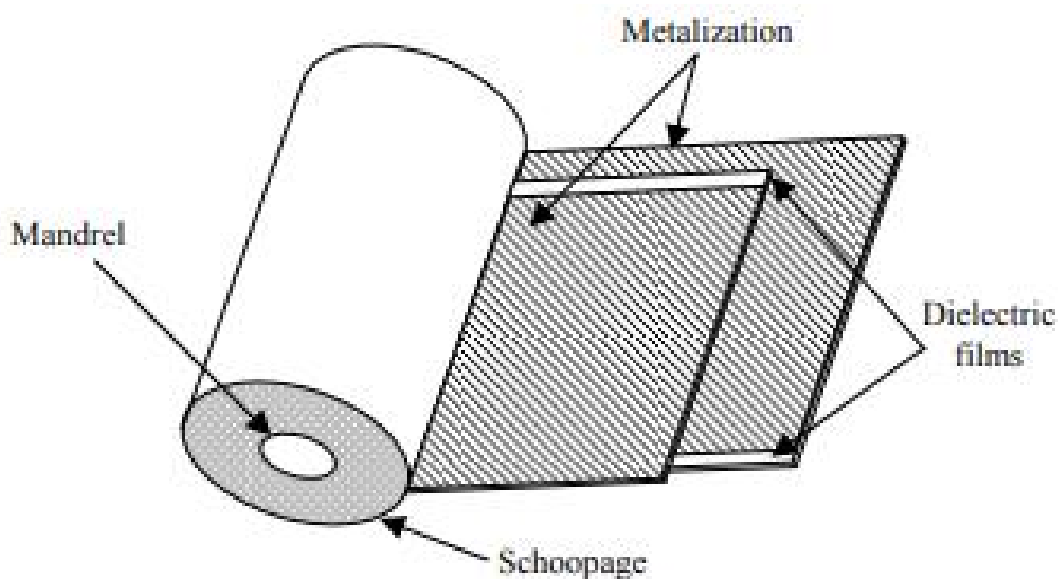


Рис. 3. Общая структура металлопленочных конденсаторов [6].

Для металлизации полимерной пленки используется метод испарения металла в вакууме: определенная порция металла нагревается в вакуумной камере при последующем его испарении на диэлектрик также находящемуся в вакуумной камере. При металлизации диэлектрика в виде длинных лент можно расположить полимерную ленту над испарителем до тех пор, пока с отдающей ленты не испарится весь металл. В результате, получается более тонкий слой электродов, а значит сопротивление металлизированного электрода возрастает. При этом металлизация наносится неоднородно.

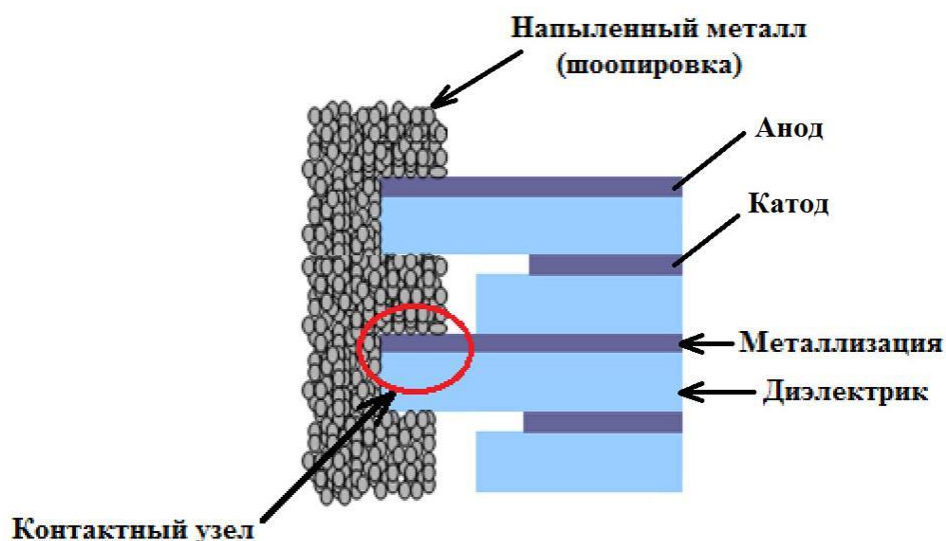


Рис.4 Сечение контактного узла [7].

«Так как контактные узлы более подвержены к импульсному разрушению за счет краевого эффекта, в данную зону напыляют утолщенный слой металла, позволяющий выдержать мощные импульсы (рис.3). С одной из сторон металлизированный диэлектрик имеет закраину, то есть область свободную от металлизации-закраины, чтобы избежать короткого замыкания электродов при шоопировке секции. Ленты укладываются таким образом, чтобы для двух соседних пленок эти закраины находились по разные стороны (рис 2.)» [3,6,7].



Рис. 5. Металлизация на диэлектрике [9].

Как было отмечено выше материалы используемые для металлизации имеют определенные преимущества и недостатки.

Если говорить о цинке, то его недостатком является низкая критическая температура при которой происходит надежное сцепление металла с поверхностью диэлектрика. Для цинка это значение лежит ниже – 60 °С. Эта

проблема решается путем нанесения на ленту диэлектрика тонкого подслоя металла с более высокой критической температурой, например, серебро или олово. Другим недостатком цинка является способность к быстрому окислению, чего нет, например, у алюминия. Также, при покрытием алюминия не нужен дополнительный подслои.

К преимуществам цинка относят низкую температуру кипения, что снижает энергию на его испарение.

К недостаткам алюминия можно отнести: повышенный расход энергии на его испарение и необходимость работать при высоком вакууме. Таким образом металл, используемый при металлизации, выбирается в соответствии с технологическими условиями производства.

Существуют различные конструкции МПК, например, конденсатор может состоять из нескольких секций. Эти секции могут быть соединены последовательно или параллельно. После соединения секций с внешними выводами, они помещаются в герметичный корпус, изготовленный из пластика или металла. Секции могут быть выполнены цилиндрическими или плоскостесованными. С целью увеличения рабочего напряжения было придумана конструкция МПК, в которой металлизация выполняется в виде изолированных полос. Пленки накладываются друг на друга и таким образом образуются зоны перекрытия электродов (рис 3.). Данная конструкция называется – мультисекционные МПК. «Данный тип конденсаторов состоит из большого количества секций. Делается это для того, чтобы при выходе одной секции из строя потенциал более равномерно распределился по оставшимся секция, в противном случае конденсатор может выйти из строя» [3,8,9].

МПК благодаря своей высокой удельной энергии и надежности широко используются в электронике, они могут быть использованы как в бытовых приборах, так и в импульсных системах питания высокого напряжения.

Таблица 1– Область применения МПК [10,11].

Область	Пример	Особые требования	Тип конденсатора
Дозиметрические цепи (медицина, измерительная техника)	Устройства выборки-хранения	Низкий уровень абсорбции, малый саморазряд	Полипропиленовый, полистирольный
	Измерительные схемы датчиков с высоким импедансом	Низкие токи утечки, большое сопротивление изоляции, малый саморазряд	Полипропиленовый, полистирольный
	Времязадающие цепи интеграторов, преобразователей напряжения-частоты, цепи подстройки частоты и др.	Низкий уровень абсорбции, малый саморазряд	Полипропиленовый, полистирольный
Низковольтные цепи (медицина, транспорт, промышленность)	Помехоподавляющие фильтры	Низкая индуктивность, малое значение $tg\delta$	Полипропиленовый, полистирольный, полиэтилентерефталатный
Высоковольтные цепи (промышленность, транспорт)	Высоковольтные фильтры	Большой ток разряда, низкий уровень абсорбции, малое значение $tg\delta$, надежность	Полипропиленовый, полиэтилентерефталатный
Высокочастотные цепи (телекоммуникация, промышленность)	Усилители высокочастотных сигналов, высококачественные активные фильтры	Низкая индуктивность, низкий уровень абсорбции, малое значение $tg\delta$	Полипропиленовый, полистирольный

1.2. Процесс самовосстановления в МПК

Проблема тепловыделения и низких удельных характеристик фольговых конденсаторов решалась с 50-х годов, когда было решено использовать МПК. Отличительной особенностью данных конденсаторов заключается в процессе самовосстановления после пробоя. Если рассматривать процесс самовосстановления более подробно, то он представляет из себя цепочку нескольких процессов. Иницирующая стадия процесса – пробой диэлектрика. Обычно, пробой диэлектрика наступает в месте дефекта пленки под действием высокой напряженности. При этом диаметр канала остается весьма малым, из-за чего плотность тока в канале пробоя достигает критических значений, что ведет

за собой электрический взрыв небольшой примыкающей зоны металла. При этом образуются газообразные продукты взрыва, а именно: газообразные пары металла и полимера, которые обладают высокой проводимостью [10,12-4]. К тому же, между образовавшимися «электродами» создается напряжение ионизации, которое зажигает дугу. Дуга радиально выжигает часть металла, в процессе чего плотность тока и напряжение дуги падают и дуга гаснет, оставляя зону деметаллизации (рис. 6). «Эта деметаллизированная область защищает данное место от вторичного замыкания электродов. Электрическая прочность конденсатора восстанавливается» [2]. Суммарное время всего процесса единицы – десятки микросекунд. Кроме того, в работе [4] было выявлено, что длительность процесса самовосстановления не зависит от энергии, а зависит только от конструкции конденсатора. Механизм протекания процесса может слегка отличаться в зависимости от вида металлизации электродов, но общий подход остается неизменным.

В процессе самовосстановления некоторая часть свободного углерода осаждается в деметаллизированной области и в канале пробоя, что снижает сопротивление диэлектрика и возрастает шанс повторному перекрытию электродов в образовавшейся зоне пробоя. При этом теряется некоторая емкость конденсатора. Единичный акт не существенно влияет на потерю общей емкости, но при сотнях – тысячах актах емкость меняется значительно, но конденсатор остается работоспособным. Благодаря процессу самовосстановления металлопленочные конденсаторы могут подвергаться большому количеству пробоев и при этом оставаться работоспособным. На рисунке 7 представлено схематическое представление самовосстановления [4-6].

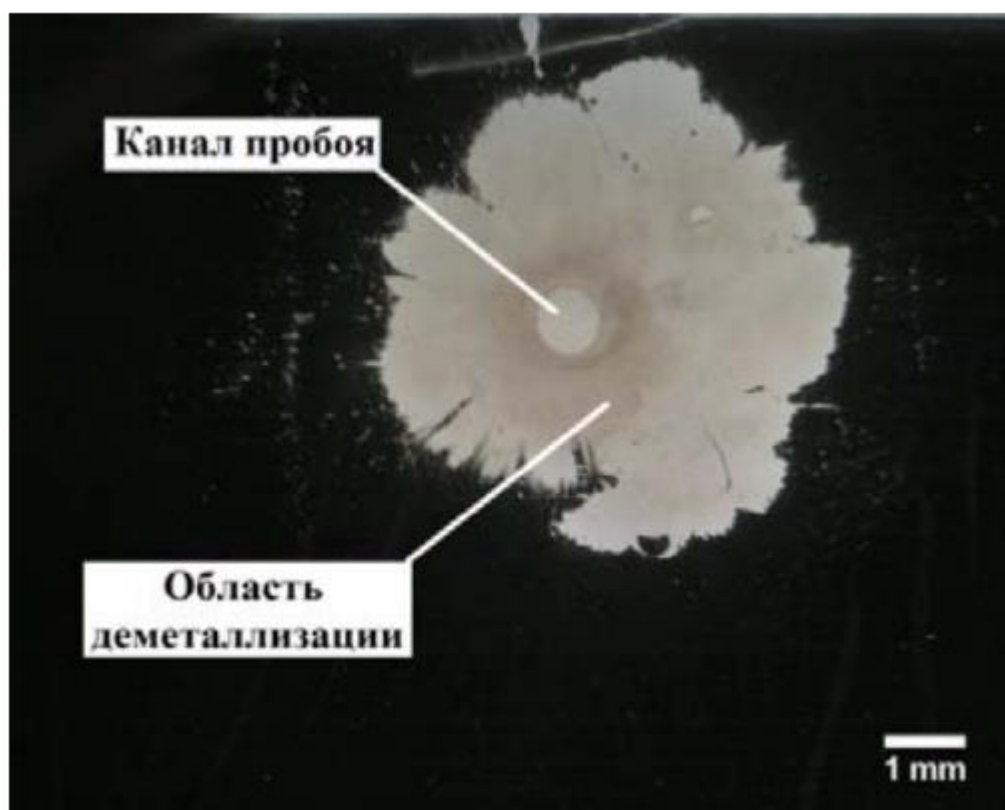


Рис. 6. Фотография испаренной металлизации после процесса самовосстановления [13].

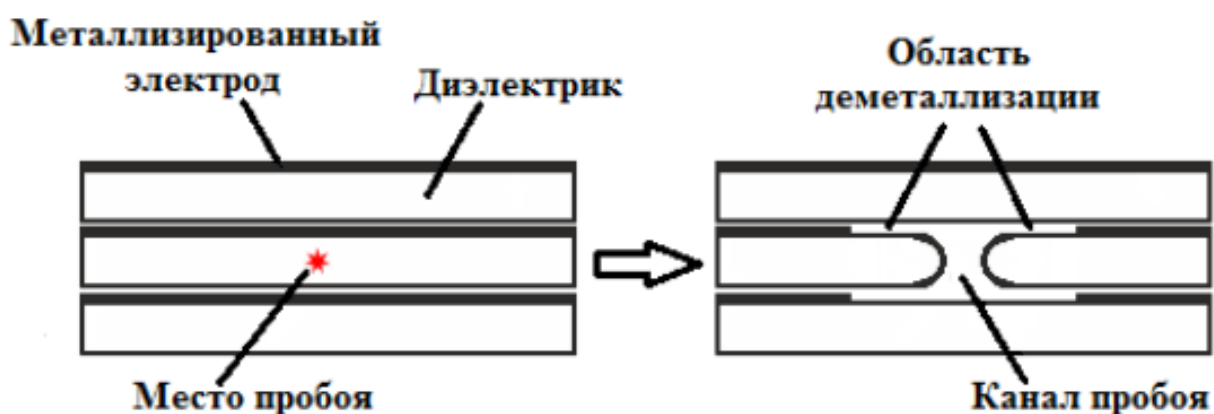


Рис. 7. Схематическое представление самовосстановления [4]

Критерием выхода конденсатора из строя традиционно считается изменение его емкости на 5-10 %, но МПК способны продолжать свою работу, хоть и с измененными электрическими параметрами. Стоит отметить, что после каждого акта самовосстановления осаждаются углерод, что снижает сопротивление

диэлектрика. В работах [15-17] была получена эмпирическая формула (2) для углеродного слоя:

$$d_{gr} = K \sqrt[3]{\frac{P^2 d_{me}^2 U^4}{T^2}}, \quad (2)$$

где P – межслоевое давление пленки, T – исходная температура, d_{me} – толщина металлизации, U – напряжение, K – константа, определяемая экспериментально и зависящая от химического состава полимера.

«Рассматривая процессы самовосстановления в МПК, появилась возможность дать количественную оценку. Было выявлено, как процессы СВ влияют на работоспособность конденсатора. Углерод, осевший на область свободную от металла (количество углерода прямо пропорционально энергии СВ), уменьшает эквивалентное параллельное сопротивление диэлектрика. Тангенс диэлектрических потерь – один из параметров, описывающий работоспособность диэлектрика – обратно пропорционально зависит от эквивалентного сопротивления R_p . Таким образом:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C}, \quad (3)$$

где ω – угловая частота, C – емкость конденсатора» [1,9,12].

Исследования по определению энергии самовосстановления занимались С.W. Reed и S.W. Cichanowski. Ими была выдвинута экспериментальная формула для нахождения энергии самовосстановления:

$$W_{св} = \frac{kU^{4.7}C}{R_S^c \alpha(P)}, \quad (4)$$

где U – напряжение, C – емкость, RS – поверхностное сопротивление металлизации, $\alpha(P)$ – функция, связанная с распределением внутреннего давления, k – постоянная. [10,12]. Но более точно было записать как:

$$W_{св} = aU^b, \quad (5)$$

где a , b – экспериментальные коэффициенты, так как показатель степени при напряжении может меняться в зависимости от условий проведения эксперимента.

Как вывод, можно представить общие закономерности процесса самовосстановления:

- «площадь зоны ДМ линейно зависит от энергии СВ $S_{\text{ДМ}} \sim W_{\text{СВ}}$;
- время самовосстановления пропорционально напряжению пробоя диэлектрика $\tau_{\text{СВ}} \sim U_{\text{пр}}$ или $\tau_{\text{СВ}} \sim \ln(U_{\text{пр}})$;
- площадь зоны ДМ и энергия СВ пропорциональны толщине металлизации $S_{\text{ДМ}}$ и $W_{\text{СВ}} \sim \delta_{\text{ме}}$.
- Энергия СВ имеет степенную зависимость от напряжения $W_{\text{СВ}}$ и $\tau_{\text{СВ}} \sim U_{\text{н}}$ » [2]

1.3. Способы ограничения энергии СВ

Опираясь на зависимость $S_{\text{ДМ}} \sim W_{\text{СВ}}$, становится понятным, что нужно прибегнуть к мерам, ограничивающим энергию самовосстановления. При выделении слишком большой энергии самовосстановления увеличивается вероятность отказа конденсатора, в том числе и теплового. Существует несколько способов ограничения энергии.

Один из них - это использовать электроды с существенно меньшей толщиной металлизации (2-5 нм), что неизбежно ведет к увеличению их поверхностного сопротивления, что, в конечном итоге, приводит к увеличению тангенса диэлектрических потерь, поэтому данный тип конденсаторов не нашли себя в широком применении [14].

«Другой способ ограничить энергию $W_{\text{СВ}}$ – использование сегментированных электродов. Сегментированные электроды представляют из себя отдельные зоны- сегменты, соединенные узкими полосами металла - «мостиками». Во время протекания пробоя по мостикам проходит ток большой плотности. Данный ток разрушает «мостики», тем самым изолируя поврежденный сегмент от остальной части электрода» [19].

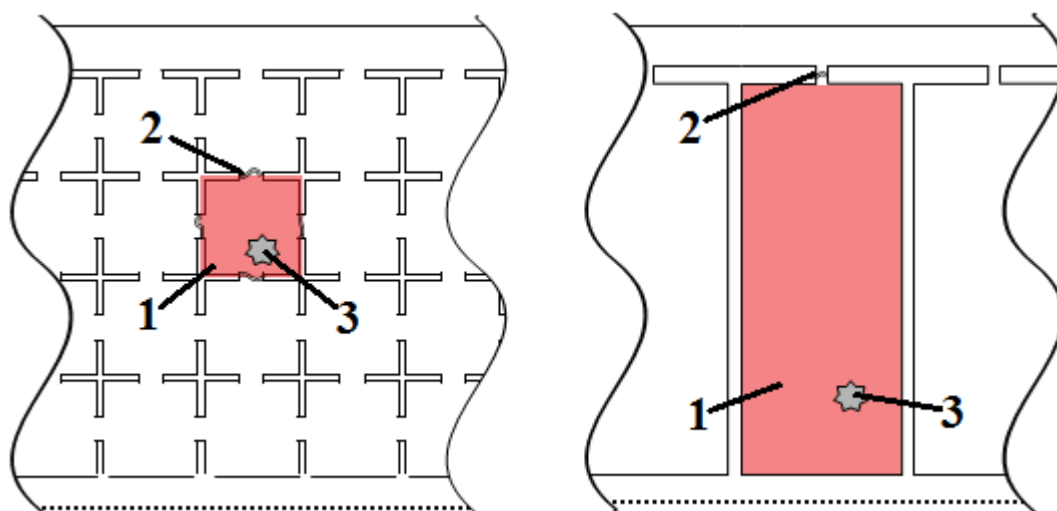


Рис.8. Схематический вид изолированных сегментов.

1 – изолированный сегмент; 2 – перегоревший мостик; 3 – место пробоя [24].

Таким образом, удастся ограничить ток самовосстановления и время протекания процесса. Это в свою очередь позволяет снизить удельную мощность тепловыделения за счет его пространственного распределения вблизи места пробоя. В результате, получилось ограничить энергию самовосстановления, сделав ее управляемым параметром, ограничить время протекания процесса и увеличить удельную энергию (до уровня 3 Дж/см^3) [14].

Тем не менее, у сегментированных электродов есть и свои минусы. один из таких – это более быстрое уменьшение емкости конденсатора в результате СВ (по сравнению со сплошной металлизацией), ведь в случае пробоя изолируется весь сегмент, а не только деметаллизированная область. Также необходимо подобрать нужную геометрию для конкретного режима работы: например, слишком широкие мостики не обеспечат нужного перегорания (а как следствия и изолирования поврежденной области), за счет того, что не хватит величины тока, протекающего по мостикам. В этом случае процесс самовосстановления пойдет по «сценарию» сплошных электродов. В обратном случае, при слишком узких мостиках перегорание произойдет слишком быстро, что повлечет за собой стремительное уменьшение емкости.

Кроме того, важную роль играет способ нанесения металлизации на пленку. В процессе нанесения металла на диэлектрик могут возникнуть зоны неоднородности. В результате чего в этих зонах возникает локальное повышение напряженности, что в свою очередь повышает вероятность электрического пробоя.

Сегментированные электроды выполняют с разными рисунками металлизации, например, мозаичная и т-образная (рис 9). Использование МПК с сегментированными электродами дает ряд преимуществ и недостатков. Тем не менее, данная конструкция дает возможность добиться высоких значений удельной энергии и тем самым расширяет область своего применения. Выходом из строя МПК может произойти из-за краевых эффектов, поэтому важно выбрать оптимальный рисунок сегментации. [5,14].

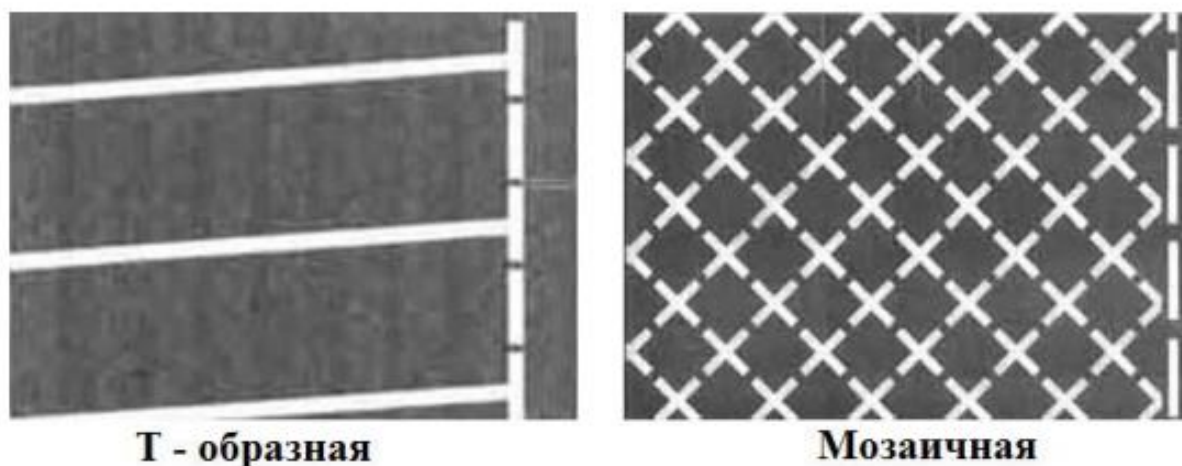


Рис 9. Виды сегментированной металлизации [4]

1.4. Выводы по литературному обзору

Широкая популярность металлопленочных конденсаторов объясняется наличием высоких удельных характеристик и способностью к сохранению электрической прочности после пробоя, что несомненно повышает их надежность. На сегодняшний день ведутся исследования в области применения металлопленочных конденсаторов разной конфигурации, в том числе с использованием электродов с сегментированной металлизацией, что позволяет

снизить энергию самовосстановления, что в свою очередь ведет к снижению повреждений диэлектрика и, как следствие, к увеличению ресурса диэлектрика.

Ввиду того, что площадь деме­таллизации линейно зависит от энергии самовосстановления, часто металлопленочные конденсаторы выполняются с сегментированными электродами, благодаря этому удается ограничить энергию самовосстановления, а значит и уменьшить зону деме­таллизации, помимо этого, благодаря сегментированию электродов удалось сделать процесс самовосстановления управляемым, за счет снижения вероятности развития электротеплового пробоя конденсатора. Однако, для каждой конкретной модели МПК и режима эксплуатации необходимо персонально подбирать геометрию сегментации.

Однако на сегодняшний день, существует не много работ, посвященных исследованию процессов самовосстановления в МПК. Без четкого представления о процессах самовосстановления становится невозможно эффективно использовать данный тип конденсаторов.

В данной работе конденсаторы исследовались до катастрофического отказа, то есть необратимые изменения в диэлектрике вследствие многократных актов самовосстановления, что дало возможность учесть все факторы, влияющие на процесс самовосстановления.

Исходя из вышесказанного, целью работы является – исследование процессов самовосстановления в металлопленочных конденсаторах. Для достижения данной цели были сформулированы и выдвинуты следующие задачи:

- 1) разработать экспериментальную методику исследования характеристик самовосстановления;
- 2) экспериментально получить характеристики СВ;
- 3) провести численную обработку данных;
- 4) сравнить, как влияет конструкция конденсатора на характеристики самовосстановления.

2. Методическая часть

2.1.4 Экспериментальные образцы

Для экспериментального определения характеристик самовосстановления были выбраны серийно выпускаемые конденсаторы. Образцы различались по конструкциям: были отобраны конденсаторы, выполненные из одного материала пленки и одинаковой емкостью, первая пара – с различной форменной конфигурацией (плоскопрессованные и цилиндрические), вторая пара – с различными способами нанесения металла на диэлектрик (сплошная металлизация электродов и сегментированная) для последующего сравнения. Материал пленки – полярный диэлектрик полиэтилентерефталат (PET) со следующими характеристиками: диэлектрическая проницаемость $\epsilon=3,2-3,3$, $\text{tg}\delta=0.005$ (при 1 кГц), кратковременная электрическая прочность $E_{\text{пр}}=530-620$ кВ/мм [4]. Характеристики испытуемых конденсаторов занесены в таблицу 2.

Таблица 2. – Параметры используемых конденсаторов

№	Марка конденсатора	U_n , В	C_n , мкФ	$d_{\text{пл}}$, мкм	геометрия	тип металлизации
1	K73-17	63	1	3	плоскопрессованный	сплошная
2	K73-11	63	1	3	цилиндрический	сплошная
3	K73-11	400	0,1	8	цилиндрический	сплошная
4	K73-76	630	0,1	8	цилиндрический	сегментированная
5	K73-11	400	1	8	цилиндрический	сплошная
6	K73-76	630	1	8	цилиндрический	сегментированная

2.2. Методика исследования процессов самовосстановления МПК

Для исследования процессов самовосстановления в металлопленочных конденсаторах была разработана схема, позволяющая измерять изменения напряжения на исследуемом конденсаторе в широком временном диапазоне. Измерения проводились в диапазоне до 3кВ. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 8.

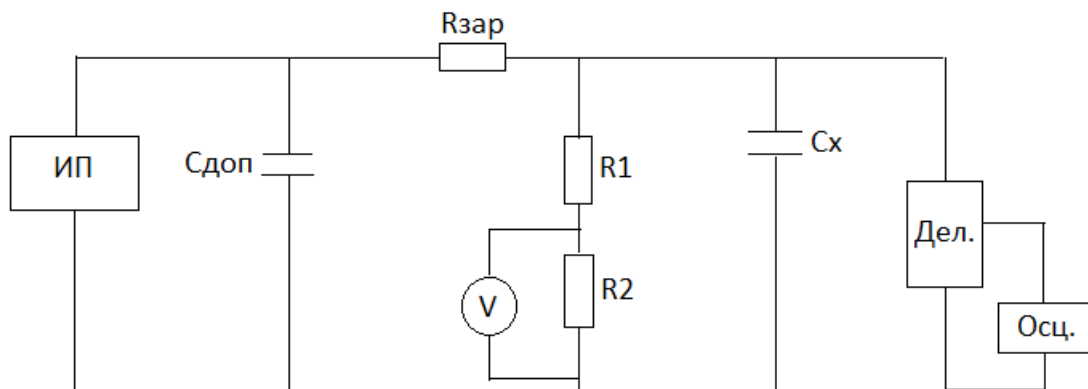
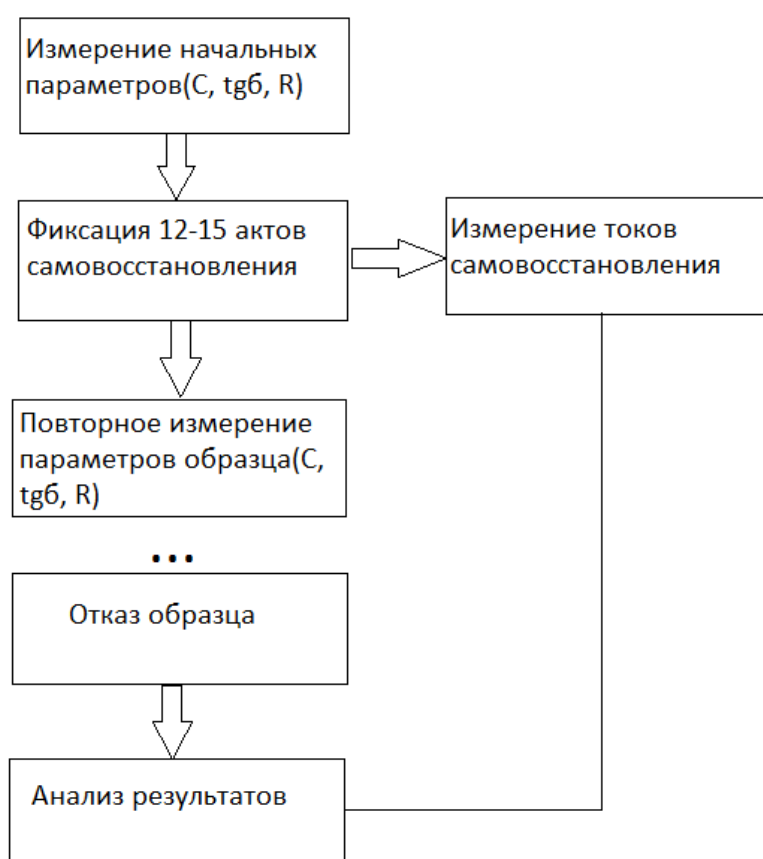


Рис. 11. Схема экспериментальной установки для исследования СВ в МПК.

Напряжение на образец подавалось с источника питания через дополнительную емкость $C_{\text{доп}} = 1$ мкФ для сглаживания сигнала. Сопротивление $R_{\text{зар}} = 2$ МОм необходимо для плавной зарядки исследуемого конденсатора C_x . Напряжение снималось с помощью измерительного щупа непосредственно с объекта исследования. В схему также был установлен делитель напряжения с предварительно рассчитанным коэффициентом деления 1:103, который впоследствии был учтен при обработке данных. Делитель напряжения использовался в тех случаях, когда напряжение превышало предел измерительного щупа (2,5 кВ). Контроль напряжения на конденсаторе осуществлялся с помощью вольтметра V. Сигналы регистрировались с помощью четырехканального осциллографа. Благодаря сегментированной памяти осциллографа появилась возможность непрерывно сохранять все осциллограммы напряжений (предварительно отсортировав удовлетворительные). Далее эти осциллограммы использовались для расчета энергии самовосстановления, длительность процесса СВ и тока СВ.

Методика снятия характеристик заключалась в следующем: плавно увеличивая напряжение на исследуемом образце, регистрировалось изменение напряжения в момент самовосстановления и в последующей дозарядки конденсатора. Напряжение увеличивалось ступенчато, примерно, 20-30 В. После каждого акта самовосстановления выжидалось время, когда конденсатор зарядится и напряжение на обкладках восстановится, после этого напряжение увеличивалось. Ожидается, что потеря емкости от одного акта

самовосстановления –незначительна, но при достаточном количестве актов емкость снижается. Поэтому после каждых 12-15 актов самовосстановления проводилось измерение емкости и тангенса диэлектрических потерь с помощью измерителя импеданса Hioki IM3570, что позволяет судить о состоянии изоляции. Стоит отметить, что конденсаторы испытывались до катастрофического отказа, как в случае с сегментированной металлизацией и параметрического отказа, как в случае с сегментированной металлизацией. Также с помощью тераомметра Е6-13М исследовалось как изменяется значение сопротивления после каждого цикла самовосстановлений. Схематично методику можно изобразить с помощью блок-схемы 1.



Блок-схема 1. Методика исследования процессов самовосстановления в МПК.

2.3. Метод расчета энергии самовосстановления МПК

Для измерения энергии самовосстановления была использована методика, описанная в п.2.2.Целью данного метода являлось получение зависимости

энергии СВ $W_{СВ}$ от напряжения пробоя $U_{пр}$. Благодаря наличию сегментированной памяти цифрового осциллографа данные изменения напряжения были сохранены на USB-носитель и далее импортировались в Mathcad, где впоследствии были обработаны. Полученные осциллограммы исследовались на изменение напряжения. При расчете энергии самовосстановления учитывались как единичные, так и многократные акты самовосстановления. На рисунке 10-11 приведены примеры единичных и многократных актов самовосстановления.

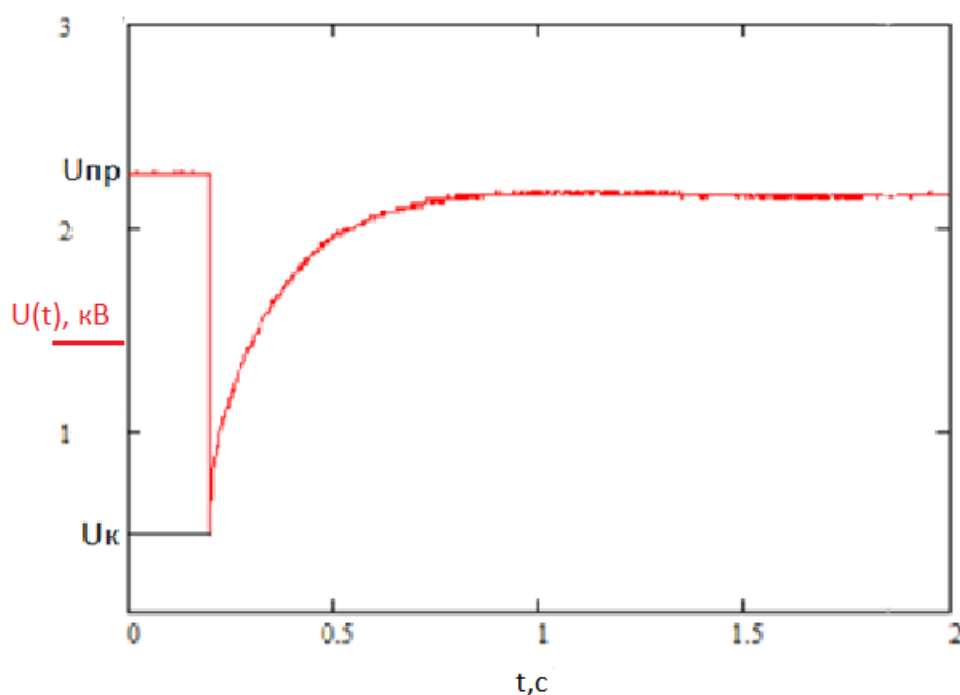


Рис.10. Пример единичного акта самовосстановления

Энергия самовосстановления рассчитывалась по формуле:

$$W_{СВ} = \frac{C_x(U_{пр}^2 - U_{к}^2)}{2}, \quad (6)$$

где $U_{пр}$ – напряжение пробоя диэлектрика, $U_{к}$ – напряжение завершения процесса самовосстановления, C_x – емкость исследуемого образца. Также, в процессе исследования проводилась корректировка емкости образца после каждых 10-15 актов самовосстановления. Емкость измерялась в широком

частотном диапазоне от 100 Гц до 100 кГц для исключения частотных особенностей, для расчета энергии СВ использовалась оптимальная частота 1 кГц (рис. 12).

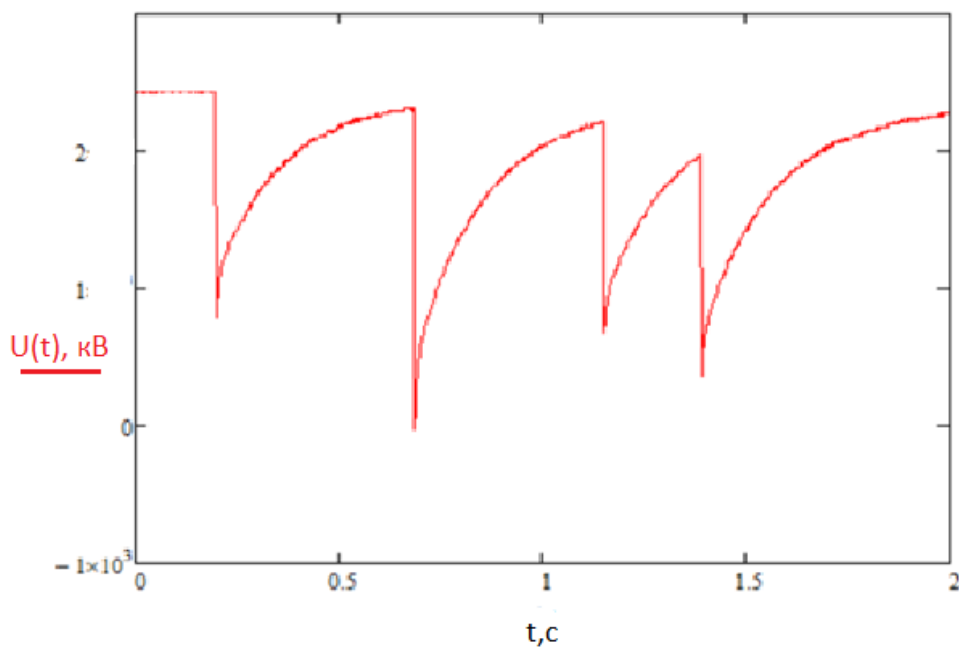


Рис.11. Пример многократных актов самовосстановления.

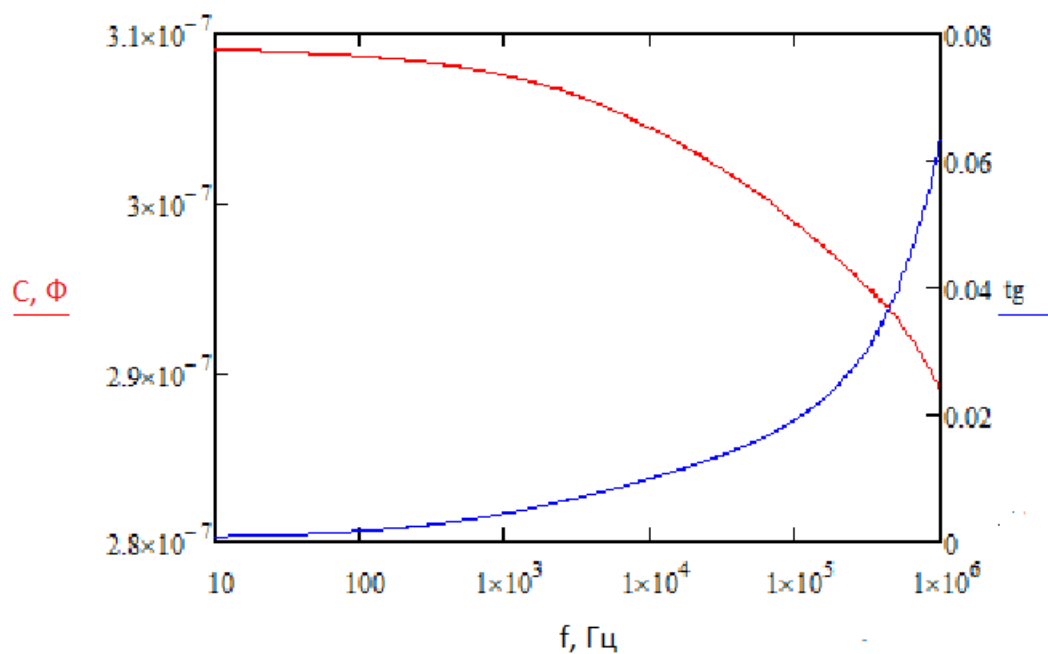


Рис.12. Пример измерения зависимости C_x , $\text{tg} \delta$ от частоты.

2.4. Метод расчета токов и времени самовосстановления

Для получения времени и токов самовосстановления так же использовалась методика, описанная в п.2.2. Суть метода осталась неизменной, лишь за небольшой деталью: было изменено время развертки осциллографа, так как предстоит изучать быстрые процессы разрядки конденсатора. Как и в случае с измерением энергии СВ, перед испытанием проводился замер начальных параметров образца. Целью метода ставилось определение тока и времени самовосстановления.

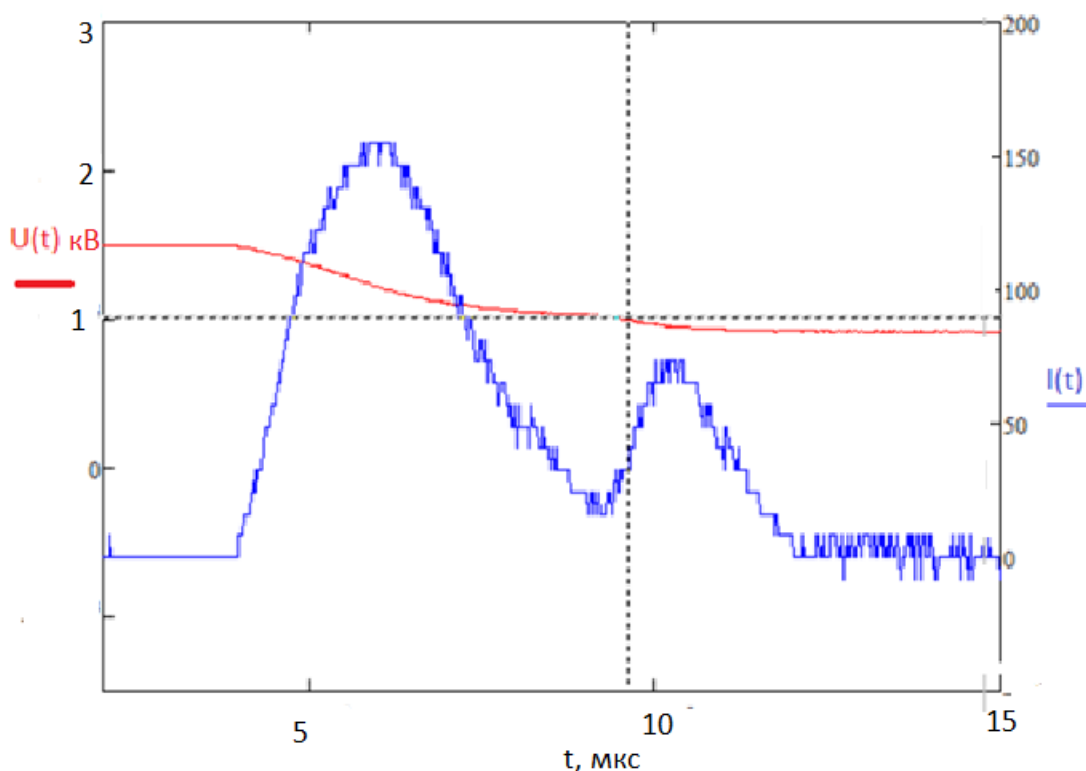


Рис.13. Пример получения кривой тока

Исследуемый образец доводился до пробоя. С помощью цифрового осциллографа фиксировалась разница напряжений. Цифровой файл с осциллограммами напряжения импортировался в программу Mathcad, где проводилась дальнейшая обработка. Ток самовосстановления был получен из формулы:

$$I_{\text{СВ}}(t) = -C_x \frac{dU(t)}{dt}, \quad (7)$$

где $U(t)$ – полученная зависимость напряжения от времени

Длительность процесса самовосстановления $\tau_{св}$ вычислялось из полученной кривой напряжения, путем вычитания времени начала процесса из времени окончания процесса (или нулевые граничные точки кривой тока). После проведения эксперимента образцы разматывались и в качестве демонстративного материала приводятся предварительно обработанные фотографии зон самовосстановления (рис. 14-15).

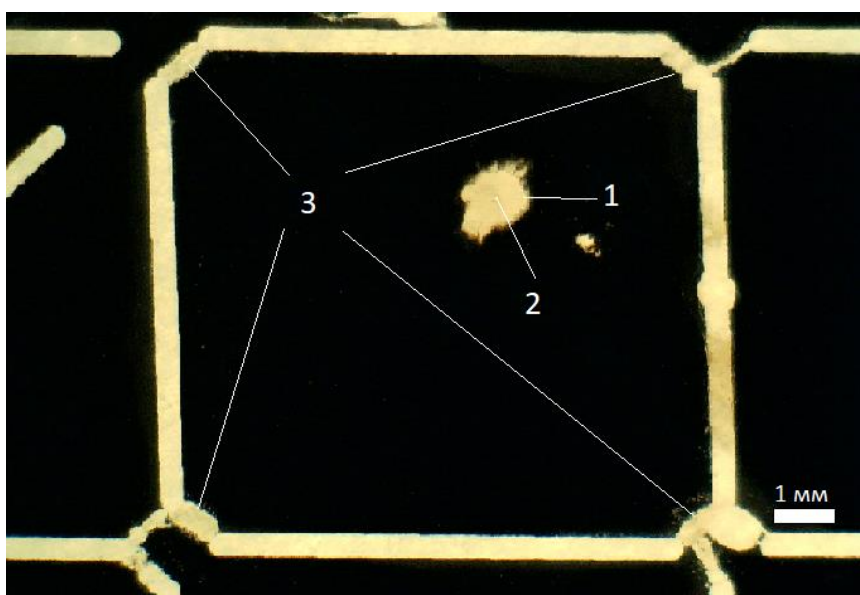


Рис.14.Изолированный сегмент МПК со сегментированной металлизацией.
1-зона деметаллизации, 2-канал пробоя, 3-перегоревшие мостики.

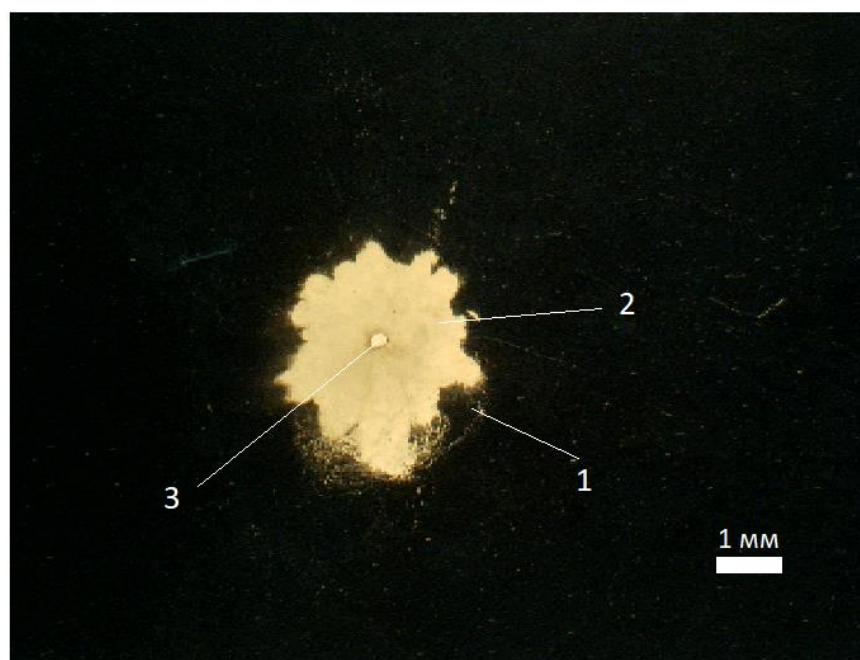


Рис.15 Изолированная область МПК со сплошной металлизацией.

1- место пробоя, 2- зона деме­тал­ли­за­ции, 3-канал пробоя.

2.5. Вывод по методической части.

На сегодняшний день отсутствует сколько-нибудь точная методика, позволяющая оценить параметры самовосстановления в МПК. С помощью предложенной методики можно достаточно справедливо оценить процессы СВ, так как она учитывает изменение основных параметров: емкости, тангенса угла диэлектрических потерь и сопротивления, а также дает возможность получить одну из основных характеристик СВ – энергию самовосстановления. Особенность данной методики заключается в том, что она нацелена на исследования серийно выпускаемых конденсаторов.

Таким образом с помощью данной методики можно исследовать следующие параметры: энергию, ток, длительность самовосстановления, а также изменение емкости, тангенса угла диэлектрических потерь и сопротивления конденсатора.

3. Экспериментальная часть

3.1. Результаты экспериментального исследования энергии самовосстановления МПК.

Расчёт энергии самовосстановления проводился исходя из полученной осциллограммы напряжения. Пример такой осциллограммы можно увидеть на рис. 10-11. Из работ [5, 11, 25] ожидалось получить степенную зависимость $W_{св} \sim U_{пр}^n$.

Главным образом испытываемые конденсаторы дифференцировались по форме изготовления (плоскопрессованные и цилиндрические) и типу металлизации диэлектрика (сплошная и сегментированная). Ниже представлены результаты плоскопрессованного конденсатора К73-17 и К73-11 (табл.2). На основе испытания трех конденсаторов была получена экспериментальная зависимость $W_{св} \sim U_{пр}^n$ (рис.18).

Для каждого из трех конденсаторов рассчитывалась энергия самовосстановления, а результатом послужила линия тренда, наложенная на экспериментальные точки. Как видно из рис.18 была получена ярко выраженная степенная зависимость.

Также, были получены результаты зависимости изменения емкости и тангенса угла диэлектрических от суммарной энергии самовосстановления и количества точек. Для решения одной из основных задач предлагается рассмотреть, как меняются характеристики СВ в зависимости от формы конденсатора.

На рис.16 видно, что несмотря на близкие показатели степени наблюдаются некоторые расхождения. Например, конденсатор, выполненный в цилиндрической форме (МПК № 2) имеет более высокое значение напряжения пробоя и более низкую $W_{св}$ при одинаковых напряжениях, нежели плоскопрессованный. Разница между энергиями в максимальной точке составляет 0,05 Дж.

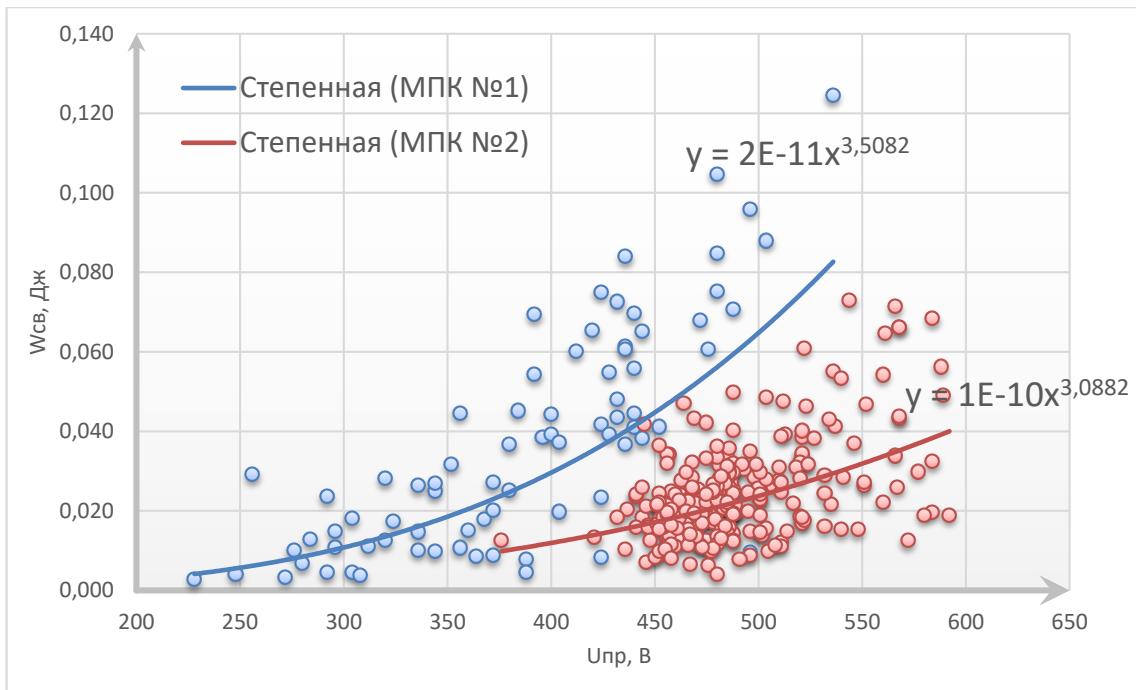


Рис.16. Сравнение $W_{св}$ для различной формы конденсатора МПК №1-2.

Если учитывать, что данный тип конденсаторов испытывался до катастрофического отказа, то можно из рисунков 17-18 можно сделать вывод, что цилиндрический конденсатор оказался более стойким (90 актов СВ против 30). Показатели степени лежат в пределах от 3-3,5, что сопоставимо с литературными источниками.

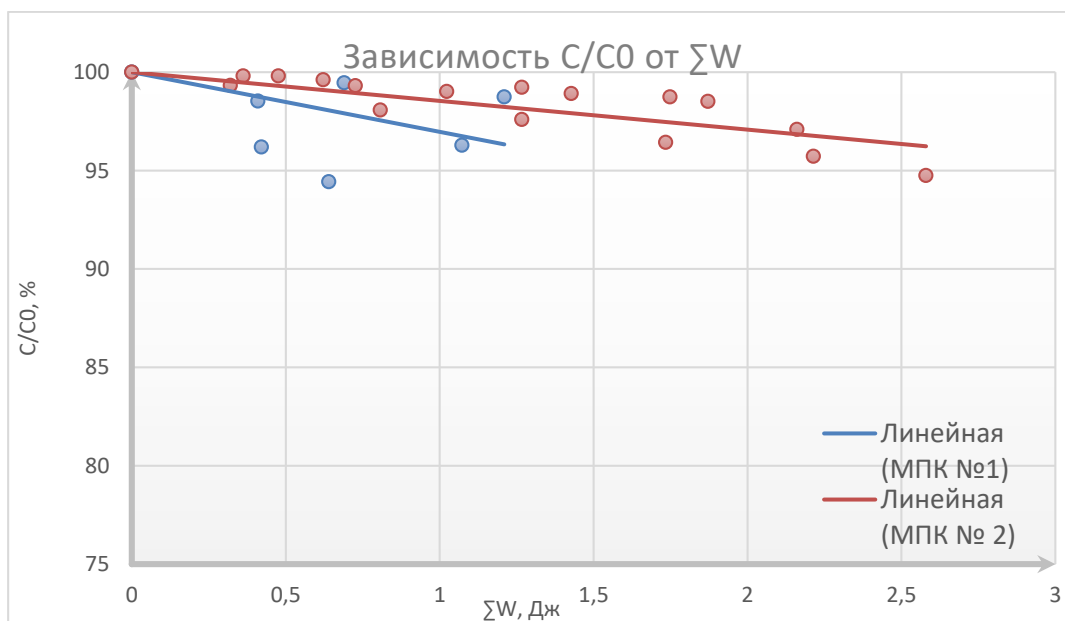


Рис.17. Сравнение изменения емкостей для различной формы конденсатора.

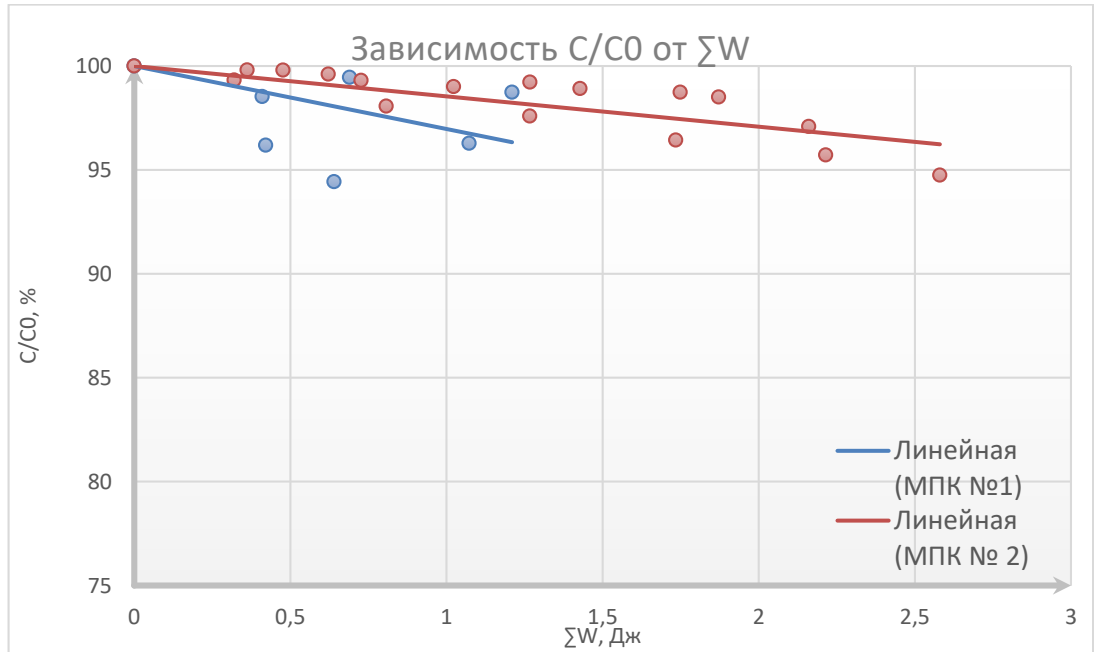


Рис.18. Сравнение изменения емкостей для различной формы конденсатора.

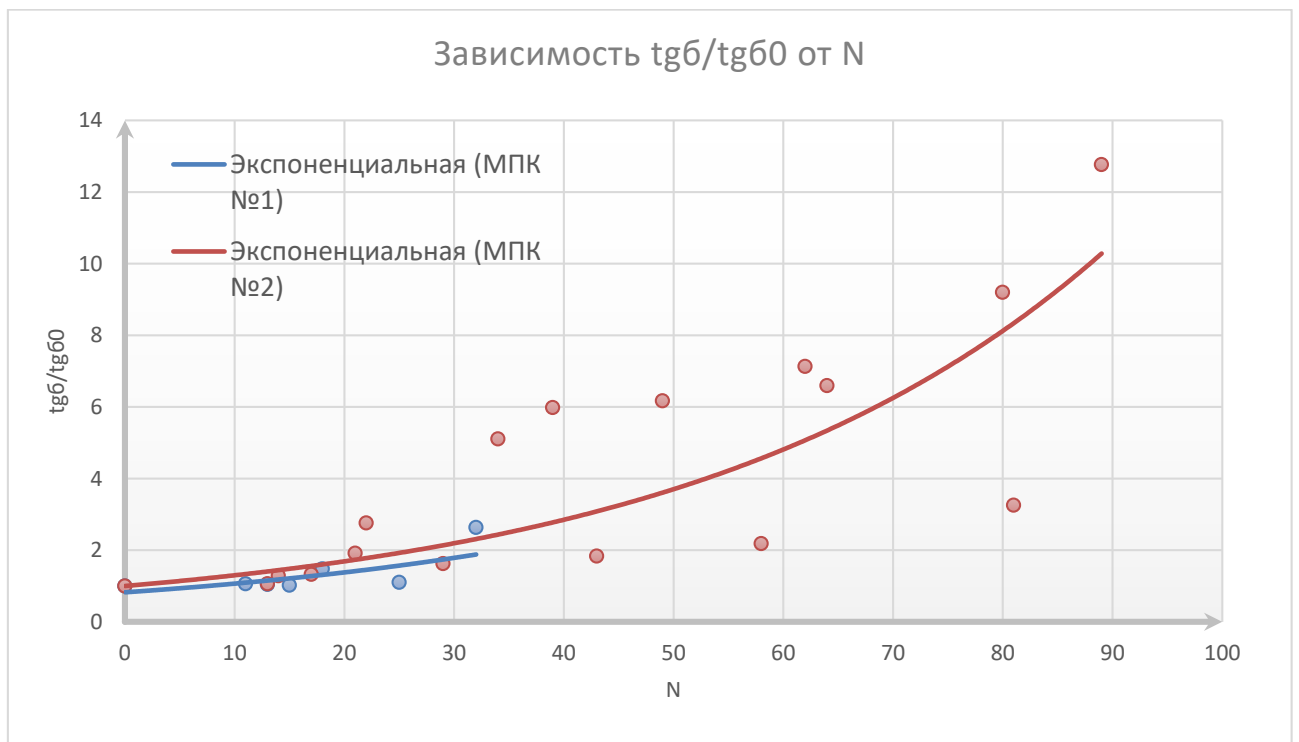


Рис. 19. Сравнение изменения тангенса для различной формы конденсаторов.

Изменения значений тангенсов практически совпадают для обоих конденсаторов, но для цилиндрического конденсатора диапазон точек оказался значительно шире. Как видно из рисунка 19, зависимости описываются экспоненциальной функцией. Изменения тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и емкости C были получены относительно номинальных значений $\text{tg}\delta_0$ и C_0 .

Для ответа на вопрос об эффективности использования сегментированных электродов имеет смысл сравнить конденсаторы с одинаковыми параметрами, но с разным типом электродов. В нашем случае – это МПК №3-4 и МПК №5-6.

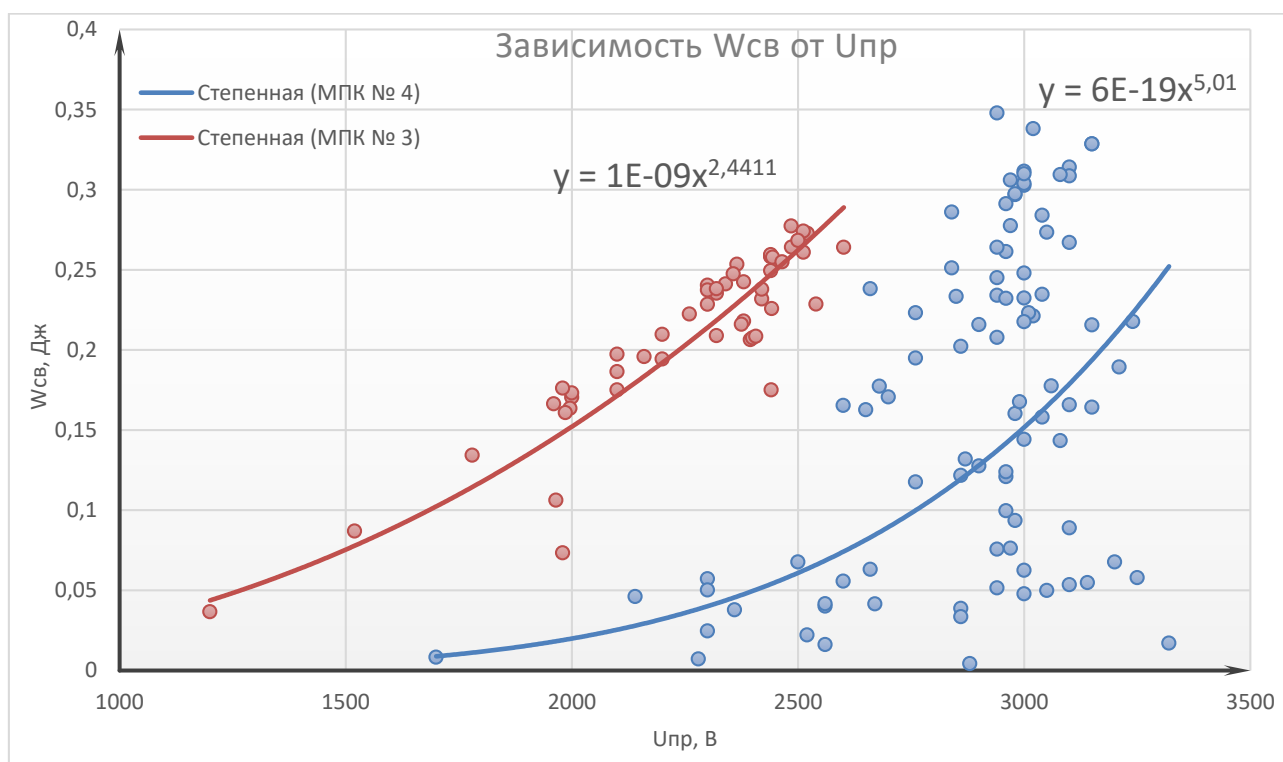


Рис.20. Сравнение $W_{св}$ для различных типов электродов (МПК №3-4).

Для МПК №3-4 видны существенные различия в показателях степени. Для сегментированной металлизации – это $n=5$, а для сплошной $n= 2,44$. Заметны значительные различия в энергиях СВ. В целом подтверждается способность МПК с сегментированными электродами ограничивать энергию самовосстановления. Если рассмотреть энергии в точке 2000 В, то можно наблюдать разницу 0,125 Дж, в пользу конденсатора с сегментированными электродами. Начальные пробивные напряжения примерно находятся на одном

уровне – 1700 В. Но для более точной оценки энергии СВ лучше рассмотреть зависимости от суммарной энергии.

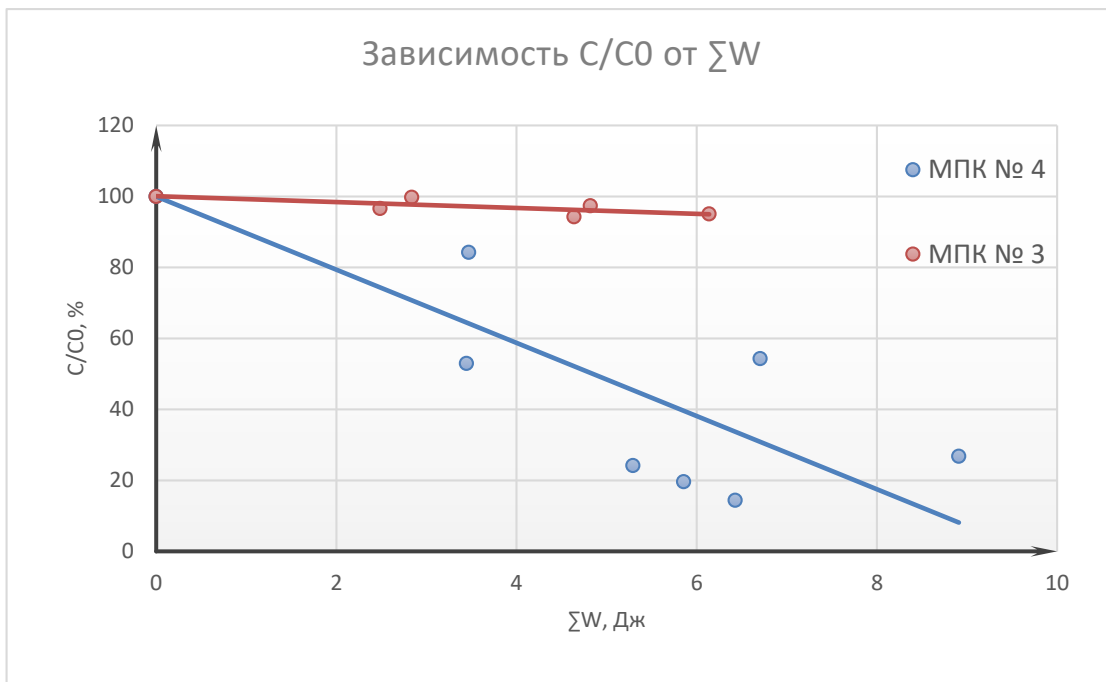


Рис.21. Сравнение изменения емкостей для различных типов электродов.

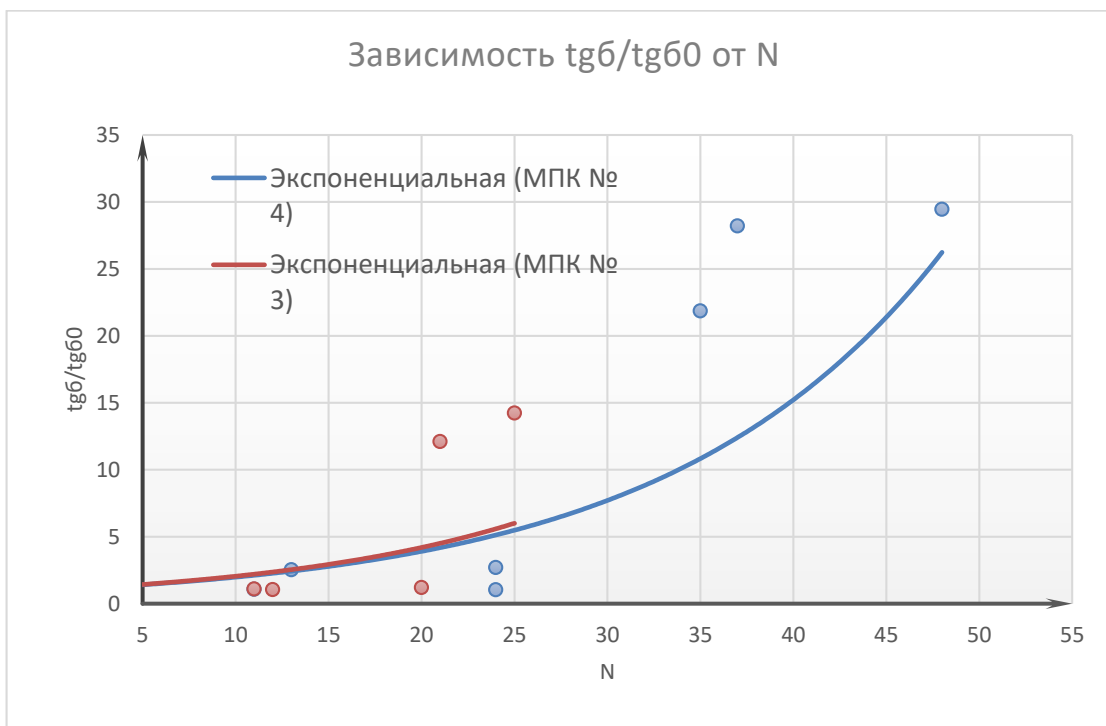


Рис.22. Сравнение отношений тангенсов диэлектрических потерь для различных типов электродов.

На рисунке 21 можно увидеть, что значение суммарной энергии МПК с сегментированными электродами превосходит энергию со сплошными электродами. Это можно объяснить тем фактом, что МПК с сегментированными электродами может выдержать больше актов СВ при прочих равных параметрах. Стоит заметить, что МПК со сплошной металлизацией выходит из строя после потери 5-10% емкости, то МПК с сегментированными электродами продолжил работу (пусть и в измененном режиме) при потере больше половины емкости.

Достаточно большой разброс максимальных значений тангенсов (рис.22), объясняется той же причиной, что и для емкостей. Это подтверждается тем, что в пункте 3.2 было выяснено, что длительность процесса для исследуемых конденсаторов примерно одинакова. Тем не менее, значения тангенсов практически совпадают для обоих типов металлизации.

В завершение экспериментальной части рассмотрим МПК №5-6. Данные конденсаторы отличаются от №3-4 увеличенной в 10 раз емкостью. Поэтому ожидается увеличение $W_{св}$ по сравнению с №3-4.

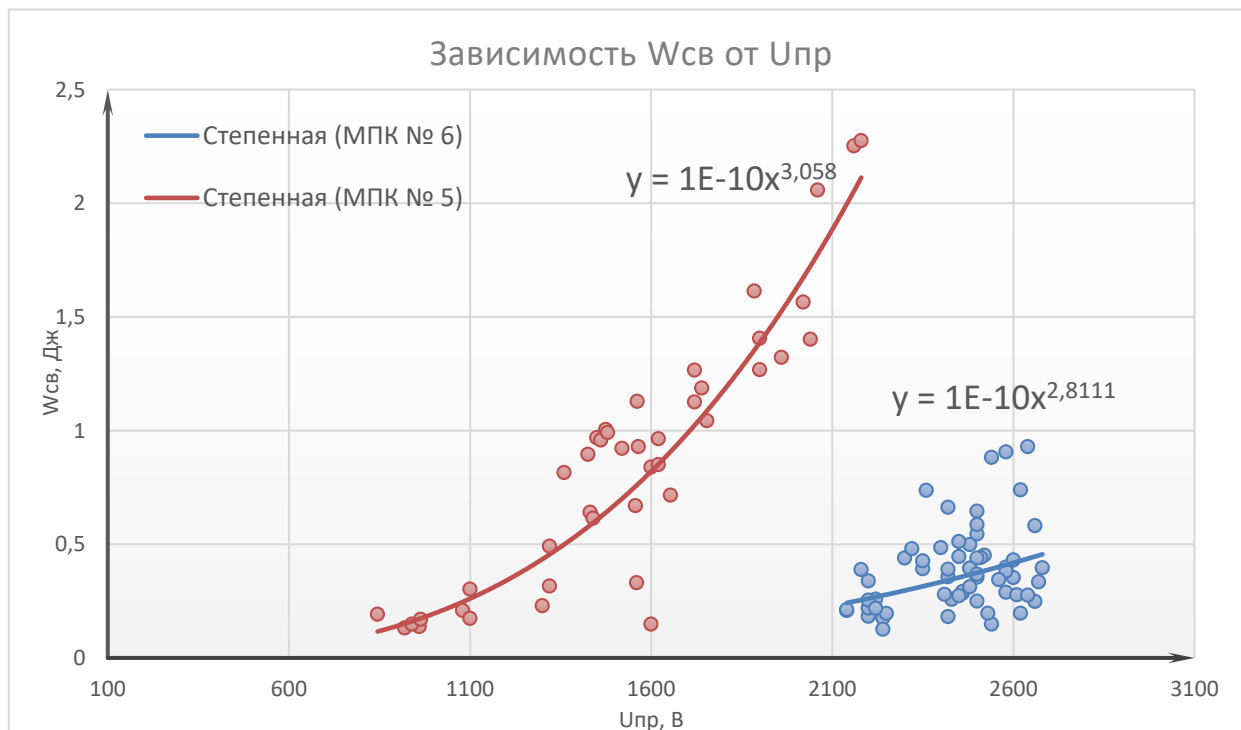


Рис.23. Сравнение $W_{св}$ для различных типов электродов (МПК №5-6).

Если сравнить значение энергии (рис.23), то заметно явное превышение $W_{св}$ МПК со сплошными электродами по сравнению с сегментированными, что еще

раз доказывает их эффективность вне зависимости от емкости. Разница между максимальными энергиями весьма существенна: максимальная энергия СВ МПК со сплошными электродами превосходит в 4 раза энергию МПК с сегментированными электродами. При этом показатель степени n лежит в диапазоне от 2,8 до 3. Тогда суммарная энергия СВ в случае сегментированных электродов представлена ниже(рис.24).

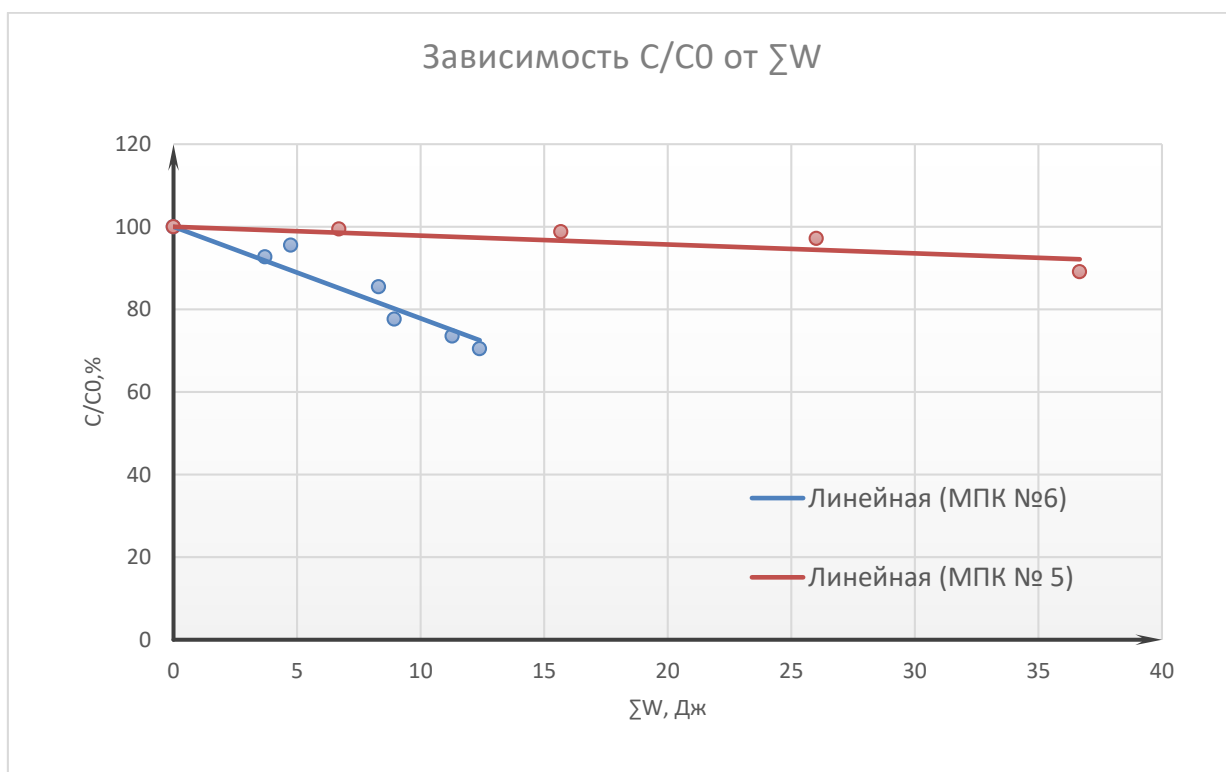


Рис.24. Сравнение отношений емкостей в зависимости от типа электродов
По результатам рис.24 можно сделать вывод, что при большей потере емкости МПК с сегментированными электродами в конечном итоге теряет меньшую энергию по сравнению с конденсатором со сплошной металлизацией. Суммарная энергия СВ МПК со сплошной изоляцией в 3,5 раза превосходит энергию МПК с сегментированными электродами.

По зависимости, представленной на рисунке 25 можно сделать вывод, что тангенс угла диэлектрических потерь практически не меняется в случае с МПК с сегментированными электродами.

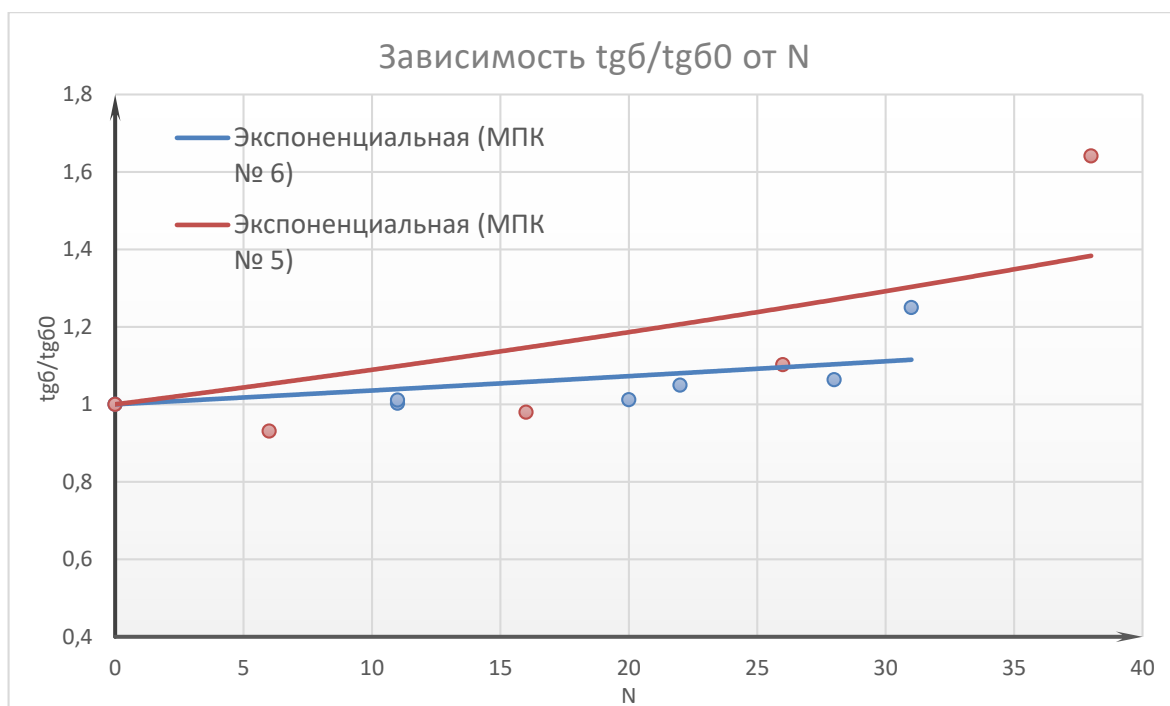


Рис.25. Влияние типа электрода на изменение тангенса диэлектрических потерь

Таким образом для каждого типа конденсаторов были представлены следующие результаты: зависимость энергии самовосстановления от пробивного напряжения, зависимость изменения емкости от суммарной энергии СВ, зависимость изменения емкости от количества экспериментальных точек, зависимость изменения тангенса диэлектрических потерь от количества экспериментальных точек.

$$R = \frac{l \cdot \rho}{S} \quad (8)$$

Следует отметить такой факт, что в случае с сегментированными электродами наблюдалось локальное увеличение сопротивления R после нескольких актов СВ. Это объясняется тем, что в какой-то момент за счет отсечки сегментов значение площади электродов S уменьшается быстрее нарастания удельного сопротивления материала ρ за счет оседания свободного углерода (8). Для МПК со сплошными электродами наблюдалось линейное увеличение сопротивления, обычно, на 2-3 порядка, относительно исходного.

3.2. Результаты экспериментального исследования токов СВ и длительности процесса

Токи СВ были получены из кривых напряжения путем дифференцирования. Испытывались 4 конденсатора: МПК №3-6. Время интегрирования t выбиралось по заданному периоду. Для каждого конденсатора было получено значения тока и времени самовосстановления, также рассчитывались средние значения максимального тока и времени СВ.

Для конденсаторов были получены следующие значения токов.

- К73-11 №3: $I_{\max} = 60,4$ А (рис.26).
- К73-76 №4: $I_{\max} = 21,1$ А (рис.27).
- К73-11 №5: $I_{\max} = 94,4$ А (рис.28).
- К73-76 №6: $I_{\max} = 86,2$ А (рис.29).

Время длительности процесса для всех образцов одинаково $\tau \approx 4$ мкс.

Графики кривых для каждого типа конденсаторов представлены ниже.

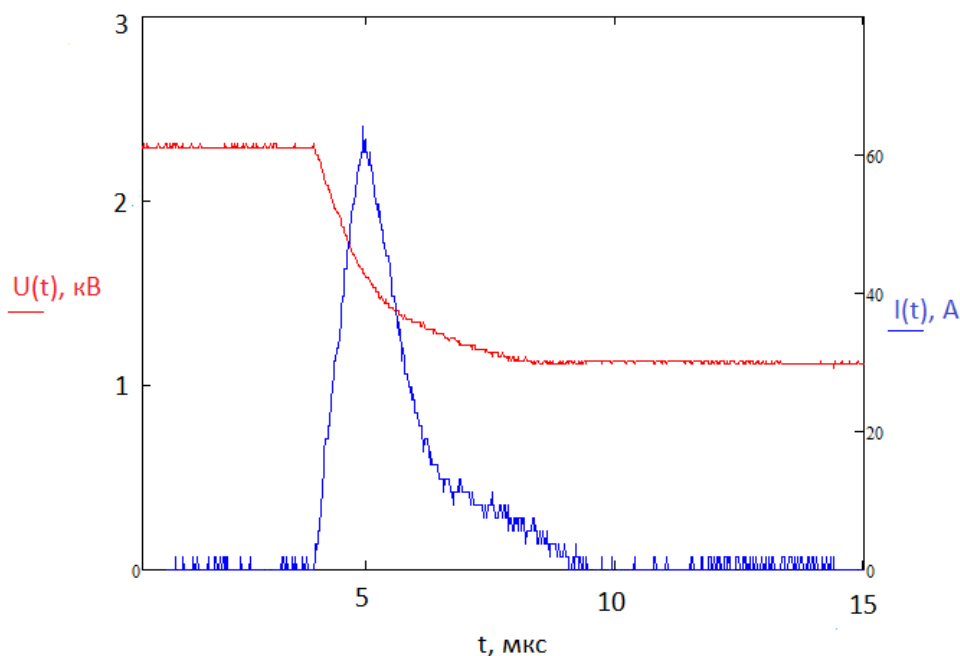


Рис.26. Зависимость кривых тока и напряжения от времени МПК №3.

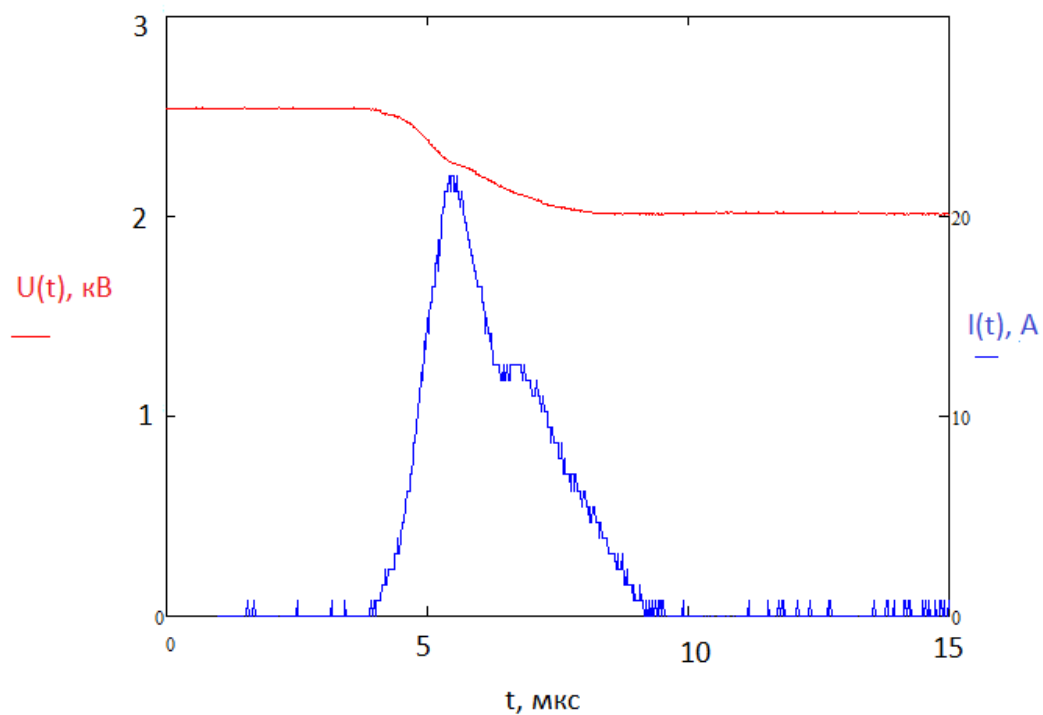


Рис.27. Зависимость кривых тока и напряжения от времени №4.

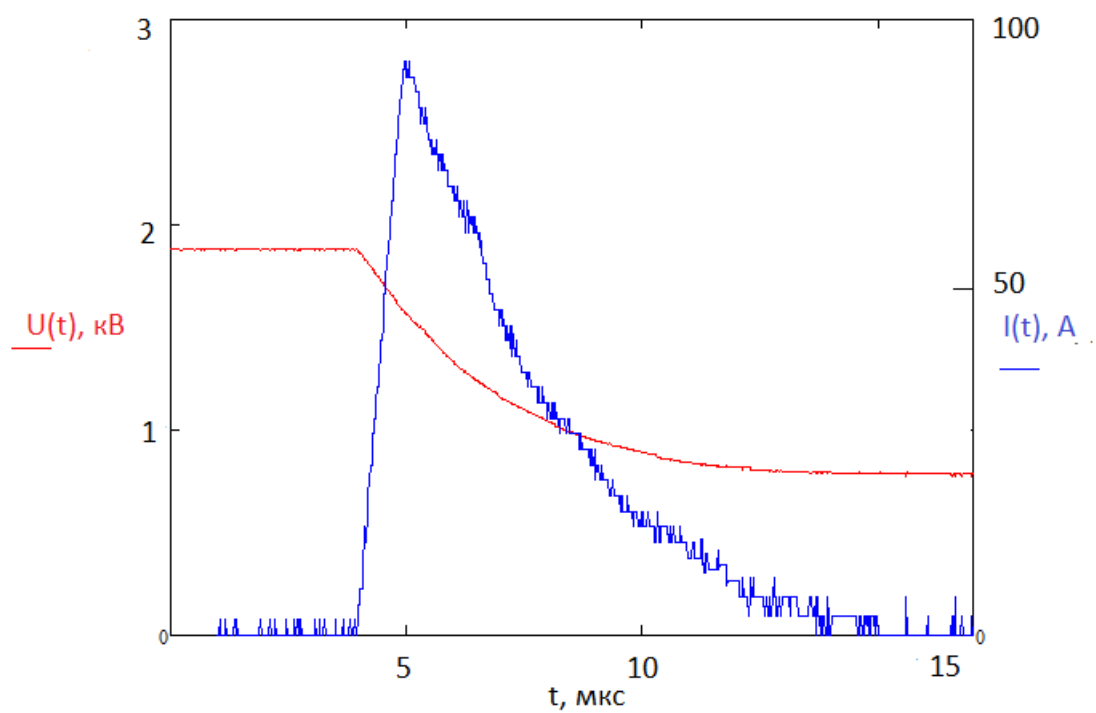


Рис. 28. Зависимость кривых тока и напряжения от времени №5

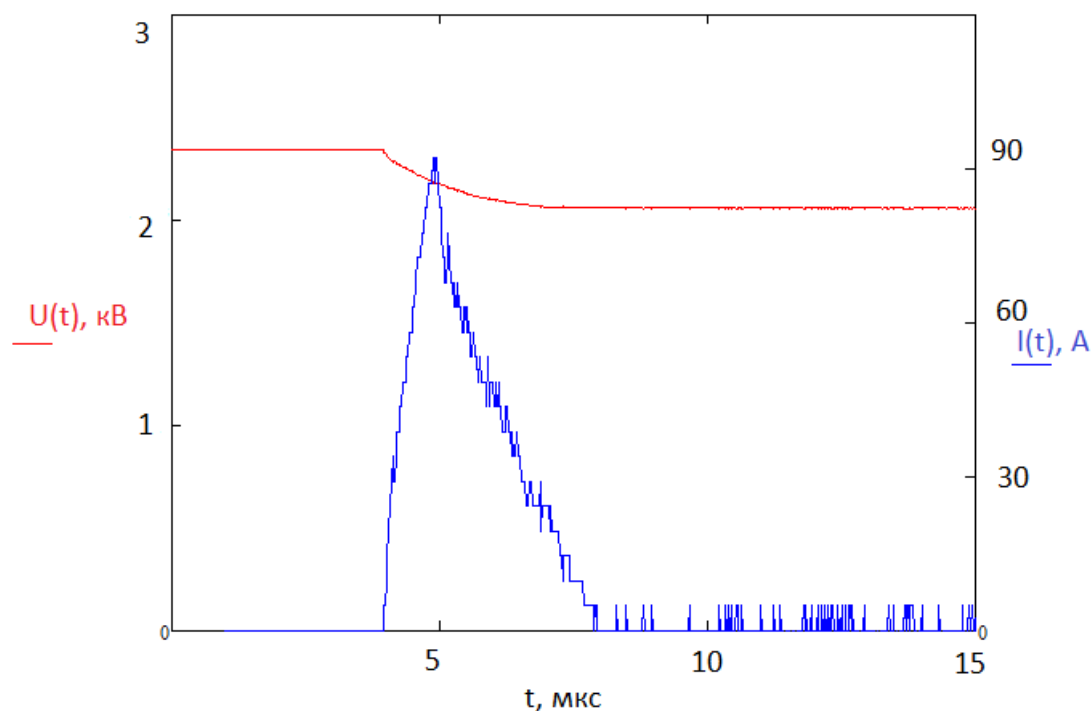


Рис.29. Зависимость кривых тока и напряжения от времени №6

Таким образом, с помощью дифференцирования кривой напряжения и известной величиной емкости была получена кривая тока СВ. Можно заметить существенную разницу между значениями токов в зависимости от параметров конденсаторов и их конструктивными особенностями, в то время как длительность процесса лежит в примерно одинаковом диапазоне значений. По данным эксперимента можно сделать вывод, что сегментация более эффективно проявляется в конденсаторе №4, нежели № 6. Если в паре конденсаторов №3-4 отношение токов равняется примерно 3, то для МПК №5-6 токи находятся примерно в одном диапазоне. Отсюда следует, что способность к ограничиванию токов может зависеть от различных факторов, поэтому нельзя однозначно ответить на вопрос об эффективности использования сегментированных электродов для ограничения токов СВ.

Заключение

1) В ходе проведения данной работы была разработана методика, позволяющая определить основные характеристики СВ: энергия, ток СВ, время СВ. Для проведения данных исследований была специально разработана экспериментальная установка.

2) Экспериментально определены зависимости: $W_{св}(U_{пр})$, $C/C_0(\Sigma W)$, $C/C_0(N)$, $tg\delta/tg\delta_0(N)$.

3) На основании полученных зависимостей было определено как конструктивные особенности МПК влияют на характеристики СВ: для плоскопрессованных и цилиндрических образцов было определено, что цилиндрический конденсатор имеет более высокое пробивное напряжение (400 В против 250) и энергию СВ ниже, чем у плоскопрессованного образца. При сравнении МПК с различно выполненными электродами выявлено, что сегментированная металлизация выполняет одну из основных функций – ограничение энергии самовосстановления.

4) В ходе исследования тока СВ было выявлено, что нельзя дать однозначный ответ о влиянии сегментации на ограничения тока СВ. Но было выявлено, что длительность процесса СВ не зависит не от емкости образца не от типа электродов. Для всех образцов $\tau_{св} \approx 4 \cdot 10^{-6}$ с.

5) Была подтверждена степенная зависимость $W_{св}(U^n)$, кроме того было выявлено что показатель степени n , полученный в ходе эксперимента сопоставим принятым моделям (2-5,5).

Список используемой литературы

1. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. – Л.: Энергия, 1969. – 592 с.
2. Белько В.О. Исследование закономерностей электродинамического разрушения электродов металлопленочных конденсаторов: дис. канд. техн. наук: 05.09.02/; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; науч. рук. Емельянов О. А. — СПб., 2010.
3. J.R. MacDonald, M.A. Schneider, J.B. Ennis et al. High Energy Density Capacitors // 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, Canada.- 2009.- 5 p.
4. Иванов И.О. Исследование деградации металлопленочных конденсаторов при форсированных нагрузках: дис. канд. техн. наук: 05.09.02 / Иван Олегович Иванов – Санкт-Петербург, 2017. – 165 с.
5. Boggs S.A., Ho J., Jow T.R. Overview of Laminar Dielectric Capacitors // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2010. – Vol. 26, №2. – P. 7-13.
6. Makdessi M., Sari A., Venet P. Improved model of metalized film capacitors // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2014. – Vol. 21, pp. 582-593.
7. Емельянов, О.А. Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники: лабораторный практикум. Часть 1. / О.А. Емельянов, В.О. Белько, П.Н. Бондаренко, М.В. Шемет. – СПб.: изд. Политехнического университета, 2010. – 72
8. Ханин С.Д., Адер А.И., Воронцов В.Н., Денисова О.В., Холкин В.Ю. Пассивные радиокомпоненты. Часть 1. Электрические конденсаторы: Учеб. пособие. – СПб., СЗПИ, 1998. – 86 с.
9. Cletus J. Kaiser. The capacitor handbook. 1st ed. Olathe, KS: CJ Pub., – 1990. –pp. 121.
10. Christen, T. Recent progress in the physics of capacitors / T. Christen, M. Carlen // Recent Research Developments in Applied Physics. – 2003. – Vol. 6. – P.517-546.
11. Ермуратский, В. В. Где и как применяются конденсаторы / В. В. Ермуратский. — 2. — Кишинев : Штиинца, 1981. — 151 с.
12. Sarjeant W.J., Zirnheld J., MacDougall F. W. Capacitors // IEEE Transactions on plasma science, – 1998. – Vol. 26, № 5. – pp. 1368-1392.

13. Белько В.О., Емельянов О.А., Иванов И.О. Процессы самовосстановления пленочных конденсаторов в форсированных режимах // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – Т. 34, №2. – С. 13-22.
14. Исследование эффективности сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов / И. О. Иванов, В. О. Белько, Д. Ю. Гливенко [и др.]. // Проблемы региональной энергетики. — 2020. — № 3(47)2020. — С. 10.
15. Li, H. The Capacitance Loss Mechanism of Metallized Film Capacitor under Pulsed Discharge Condition / H. Li, Y. Chen, F. Lin, et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2011. – Vol. 18, №6. – P. 2089-2094.
16. Kammermaier, J. Chemical processes during electrical breakdown in an organic dielectric with evaporated thin electrodes / J. Kammermaier // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1987. – Vol. 22, №2. – P.145-149.
17. Kammermaier, J. Physical and Chemical Conditions for Self-healing in Metalized Capacitors / J. Kammermaier // Symposium on High-energy-density Capacitors and Dielectric Materials, NRC. – 1981. – P.78-85.
18. Belko V., Emelyanov O., Ivanov I. Critical Parameters of Metallized Film Capacitor's Failure // IEEE 2nd International Conference on Dielectrics. – 2018. – P. 1-3.
19. Belko V.O., Emelyanov O.A., Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design // Journal of Applied Physics. – 2016. – Vol. 119 – P. 1-7.
20. Феттер, Х. Силовые компактные конденсаторы для мощных преобразователей // Силовая электроника. – 2007. – №1. – 4 с.
21. Qin, S. Limits to the Performance and Design of High Voltage Metalized Film Capacitors / S. Qin, S. Boggs // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2010. – Vol. 17, №4. – P. 1298-1306.
22. Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Glivenko D.Y. Metallized Film Capacitors Degradation under High Electrodynamic Load // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2017. – P. 1120-1122.

23. Belko V., Glivenko D., Emelyanov O., Ivanov I., Plotnikov A. Current pulse polarity effect on metalized film capacitors failure // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – Vol. 45, №6. – P. 1020-1025.

24. Schneider, M.A. Electrical Breakdown in Capacitor Dielectric Films: Scaling Laws and the Role of Self-Healing / M.A. Schneider, J.R. MacDonald, M.C. Schalnatz, et al. // IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. – 2012. – P. 284-287.