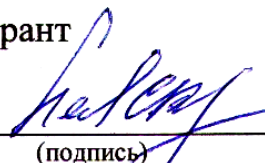


Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:
«Разработка и исследование мощных субмикросекундных емкостных
накопителей для сильноточных импульсных индукционных ускорителей»

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия
Профиль подготовки (специальность): электрофизика,
электрофизические установки

Аспирант



(подпись)

Ленский Александр Данилович

Научный руководитель:
Ратахин Николай Александрович,
академик РАН,
доктор физико-математических наук

Актуальность темы научного исследования

Развитие современной импульсной энергетики требует создания сильноточных устройств, способных генерировать мощные электрические импульсы. Такие устройства - источники больших импульсных токов находят применение в различных физических исследованиях, таких как эксперименты с сильноточным электрическим разрядом в плотных средах, получение сильных импульсных магнитных полей, генерация мощных электронных пучков, задачи, связанные с разработкой схем питания и защиты обмоток токамаков и других.

В качестве источника больших импульсных токов наибольшее распространение получили накопители энергии следующих типов: емкостные накопители энергии (ЕНЭ), индуктивные накопители энергии и электромашинные накопители энергии. Среди перечисленных видов накопителей емкостные накопители энергии обладают наименьшей плотностью запасаемой энергии. В то же время, они характеризуются рядом преимуществ перед другими типами накопителей энергии. Они удобны и просты в эксплуатации, обеспечивают возможность изменения в широких пределах параметров импульса разрядного тока, способны работать на разные типы нагрузок с высокой эффективностью передачи накопленной энергии, способны генерировать импульсы тока амплитудой до десятков мегампер длительностью от долей микросекунды до нескольких миллисекунд, не требуют большой мощности на стадии накопления энергии (заряда), способны длительное время находиться в заряженном состоянии. Генерация импульса тока в емкостном накопителе энергии может быть относительно просто синхронизирована с работой других электрофизических установок.

Если же речь идет не о получении рекордных мощностей, а, например, о проведении лабораторных исследований, то весомое значение приобретают не только электрические параметры генератора, но и его габаритные размеры. Последние, в свою очередь, во многом определяются используемой элементной базой.

Цель научного исследования

Исследование направлено на разработку высоковольтного малоиндуктивного конденсатора для дальнейшего создания на его основе конденсаторно-коммутаторных сборок, используемых в компактных высоковольтных импульсных генераторах.

Основные задачи научного исследования

1. Расчет электрических полей внутри конденсатора;
2. Разработка схемы намотки конденсатора такой, которая позволит получить необходимую плотность запасаемой энергии в конденсаторе при высокой надежности и заданных габаритах;
3. Проведение высоковольтных испытаний изготовленных секций конденсаторов с различными схемами намотки, составом бумажно-плёночной изоляции и вариантами изготовления закраин.
4. Определение оптимального варианта схемы намотки, закраин, изоляции;
5. В ходе работы планировалось изготовить цилиндрический малоиндуктивный высоковольтный конденсатор с заданными характеристиками и в установленных габаритах и его высоковольтные испытания.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

1. Наличие подгиба фольги увеличивает ресурс срабатывания секций в режиме короткого замыкания более чем на порядок за счет снижения краевых эффектов на электродах. В тоже время, ориентация подгибов закраин не оказывает существенного влияния на ресурс секций.

2. Схема намотки секций конденсатора должна обеспечивать максимальный ресурс наработки на отказ. Данное требование выполняется при схеме, обеспечивающей покрытие фольгового электрода конденсаторной бумагой с обеих сторон. Это происходит за счет симметрирования поля вблизи

электрода, в отличие от одностороннего покрытия, где поле распределено несимметрично.

3. Использование полипропиленовой пленки увеличивает ресурс секции при работе на согласованную резистивную нагрузку, примерно, на порядок, по сравнению с лавсаном. Это связано с большей электрической прочностью ПП. Однако, при работе такой секции в режиме короткого замыкания, ресурс уменьшается, в среднем, более чем в два раза по сравнению с лавсановой изоляцией. Возможно, это связано с диэлектрической проницаемостью ПП, которая меньше, чем у лавсана.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием поверенного оборудования, надёжных методик измерения, воспроизводимостью результатов проводимых испытаний. Результаты приведённых исследований находятся в согласии с результатами, полученными в более ранних работах.

Публикации результатов исследования

Основные материалы работы опубликованы в следующих изданиях:

1. I. Lavrinovich, D. Rybka, A. Lenskiy, S. Vagaytsev and D. Molchanov, "Architecture of a 100-ns LTD Generator Based on a New Type of Capacitor-Switch Assemblies," 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 2020, pp. 297-301, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241939. (Scopus, РИНЦ)

2. Lavrinovich I., Vagaytsev S., Erfort A., Rybka D., Molchanov D., Artemov A., Zhigalin A., Lensky A. «Concept designs of a compact ltd generator with a pulse rise time of 100 ns» В сборнике: IEEE International Pulsed Power Conference. Ser. "2019 IEEE Pulsed Power and Plasma Science, PPS 2019" 2019. С. 9009657. DOI: 10.1109/PPPS34859.2019.9009657 (Scopus, РИНЦ)

3. I. Lavrinovich et al., "Triggered Gas Switches for Use in Capacitor-Switch Assemblies for Ltd Technology," 2019 IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/PPPS34859.2019.9009894. (Scopus, РИНЦ)

4. I. Lavrinovich et al., "New Type Capacitor-Switch Assembly for LTD Technology," 2019 IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/PPPS34859.2019.9009957. (Scopus, РИНЦ)

Личный вклад аспиранта

Разработка и подготовка испытательного стенда; сборка, сушка, пропитка опытных образцов. Проведение экспериментальных испытаний. Анализ полученных экспериментальных данных. Изготовление цилиндрического конденсатора. Участие в интерпретации, обсуждении полученных результатов и формулирование выводов.

Основное содержание работы

Сокращения и терминология

LTD - Linear Transformer Driver;

Закраина – край электрода секции n , выступающий над краем электрода $n+1$;

ККС – конденсаторно-коммутаторная сборка;

Образец – две секции, соединенные параллельно;

ПП – полипропилен;

ПЭТ – полиэтилентерефталат;

Режим КЗ – режим короткого замыкания;

Секция – неделимая часть конденсатора, состоящая из токопроводящих обкладок (электродов) и диэлектрика между ними, рассчитанная на рабочее напряжение 10 кВ;

Согласованная резистивная нагрузка – нагрузка, при которой реверс напряжения на ней составляет не более 15%;

Согласованный режим – режим разряда, при которой реверс напряжения на нагрузке составляет не более 15%.

1. Постановка задачи

В отделе высоких плотностей энергии ИСЭ СО РАН, группой под руководством И. В. Лавриновича велась работа над проектом компактного LTD-генератора с выходным током около 1 МА и длительностью фронта 100 нс, который может быть использован для лабораторных исследований, в том числе исследований X- и Z-пинчей («Concept designs of a compact ltd generator with a pulse Rise time of 100 ns», 2018). Современные сильноточные генераторы, основанные на LTD-технологии, используют элементную базу на основе конденсаторно-коммутаторных сборок (в англоязычной литературе “brick”), представляющих собой один или несколько конденсаторов и коммутирующего их газонаполненного разрядника. В одном из наиболее распространенных вариантов конденсаторно-коммутаторная сборка состоит из двух конденсаторов и одного разрядника (рисунок 1). Наиболее часто используются аналоги конденсаторов, разработанных компанией General Atomics Electronic Systems (США), с номинальной емкостью $20 \div 100$ нФ. Конденсаторы заряжаются до напряжения ± 100 кВ в разной полярности. Однако, данный вариант обладает несколькими недостатками. Во-первых, такая компоновка конденсаторов и разрядника обладает высокой индуктивностью разрядного контура, которая составляет $130 \div 300$ нГн, вследствие чего бывает сложно обеспечить необходимую длительность фронта импульса напряжения. Во-вторых, данные конденсаторы обладают высокой стоимостью и, в-третьих, в современной геополитической ситуации возможны сложности с их приобретением. Имеются аналоги производства, но с их поставками также могут возникнуть проблемы. В России производители подобных конденсаторов нам не известны.



Рисунок 1. Внешний вид «брика», используемого в проектах Sandia National Laboratories, США. Начальный энергозапас до 800 Дж с максимальной пиковой мощностью до 5 ГВт [11].

Поэтому была поставлена задача: используя имеющийся опыт, разработать полностью удовлетворяющий техническим требованиям, конденсатор для конденсаторно-коммутаторной сборки коаксиальной геометрии (Рисунок 2). За основу была взята уже существующая сборка «НСЕИ 160-0.1». Данная ККС состоит из двух цилиндрических конденсаторов, в центре которых располагается трехэлектродный газовый разрядник. Ее испытания показали, что индуктивность разрядного контура образца такой сборки, когда выводы 4 закорочены, составила 67 нГн, что примерно в $2.4 \div 4.5$ раза ниже показателей зарубежных аналогов. Сравнительные параметры первичных накопителей ЛТД, приведены в таблице 1.

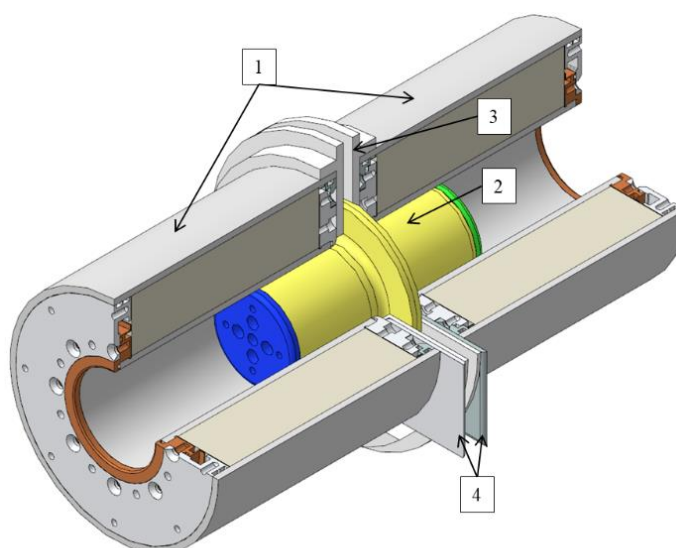


Рисунок 2. 3D-вид конденсаторно-коммутаторной сборки «НСЕИ 160-0.1»: 1 – Конденсатор «НСЕИ-80-0.22»; 2 – газовый разрядник; 3 – изолятор; 4 – вывод ККС на нагрузку. Диаметр ККС = 180 мм, длина ККС = 430 мм.

Таблица 1. Сравнительная таблица выходных параметров первичных накопителей LTD драйверов

Разработка	Зарядное напряжение, кВ	Емкость, нФ	Индуктивность контура, нГн	Энергозапас, кДж	Длительность фронта по уровню 10–90%, нс	Длительность фронта по уровню 100%, нс	Пиковая мощность, ГВт
САЕР (Китай)	±100 кВ	50	300	1.0	120		3
SNL (США)	±100 кВ	40	160 – 240	0.8		100	5
ИСЭ СО РАН (Россия)	±80 кВ	110	67 – 80	1.4	100	145	7.2

Поставленная задача осложнялась необходимостью сохранить плотность запасаемой энергии в конденсаторе при высокой надежности. Для достижения этой цели, планировалось нахождение оптимального изолирующего диэлектрика, определение оптимальной схемы его намотки и минимизация краевых эффектов на электродах, вызывающих локальное усиление электрического поля.

2. Определение параметров конденсаторов ККС для построения LTD-генератора с уровнем тока ~50 МА и длительностью ~100 нс

Основными требованиями при разработке емкостных накопителей LTD-генератора являются компактность и минимальное количество базовых элементов (ККС) в структуре генератора. Дополнительные требования к полученным техническим решениям определяются технологическими возможностями изготовления как самих LTD-ступеней, так и конденсаторно-коммутаторных сборок. При дальнейшем рассмотрении приемлемый уровень рабочего зарядного напряжения ограничен 100 кВ, а габаритный диаметр ступени – тремя метрами.

Отметим, что основной технологической трудностью при изготовлении LTD-ступеней такого диаметра является создание магнитопровода. Ферромагнитный сердечник ступеней генератора Mykonos, спроектированного на ток с амплитудой 1 МА, построенный в ИСЭ СО РАН и переданный в Sandia National Laboratories (г. Альбукерке, США) в 2008 году,

изготавливался из электротехнической стали, в то время как максимальный диаметр магнитопровода из более эффективных аморфных сплавов железа, который может быть изготовлен, составляет до 2.2 м.

Из совокупности решений, удовлетворяющих требованиям, было выделено два варианта, на основании которых были сформулированы требования к элементной базе высоковольтного LTD-генератора. Целевые параметры для разрабатываемых ККС представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Целевые параметры ККС, на основе которых возможно создание компактного LTD-генератора с уровнем электрической мощности в нагрузке ~250 ТВт при импедансе нагрузки 0.165 Ом

№	Зарядное напряжение, кВ	Емкость, нФ	Индуктивность контура, нГн	Энергозапас, кДж	Диаметр ККС, м	Длина ККС, м	Пиковый ток, кА
1	±100 кВ	≈ 45	≈ 100	≈ 0.85	≈ 0.25	≈ 0.25	≈ 65
2	±120 кВ	40-45	90 – 100	≈ 1.2	≈ 0.25	≈ 0.35	≈ 50-75

Теоретически реализуемы оба варианта исполнения ККС. Расчеты показывают возможность обеспечения как необходимой емкости конденсаторов, так и индуктивности токового контура всей сборки при указанных зарядных напряжениях и габаритах ККС. Было принято решение ограничить зарядное напряжение величиной 100 кВ, ведь увеличение напряжения даже на четверть и сорокапроцентное увеличение диаметра конденсатора относительно имеющегося образца делают более тяжелыми условия работы электрической изоляции. Поэтому требуется экспериментальная проверка всего конструктива, создаваемых ККС.

3. Экспериментальная проверка работоспособности образцов

Для испытаний образцов был разработан и собран испытательный стенд, который состоял из источника высокого напряжения Spellman (SL1200), тиратрона (ТДИ1-200к/25П), блока управления тиратроном (ПБ-3Д), жидкостного резистора и испытуемого образца (рисунок 3).

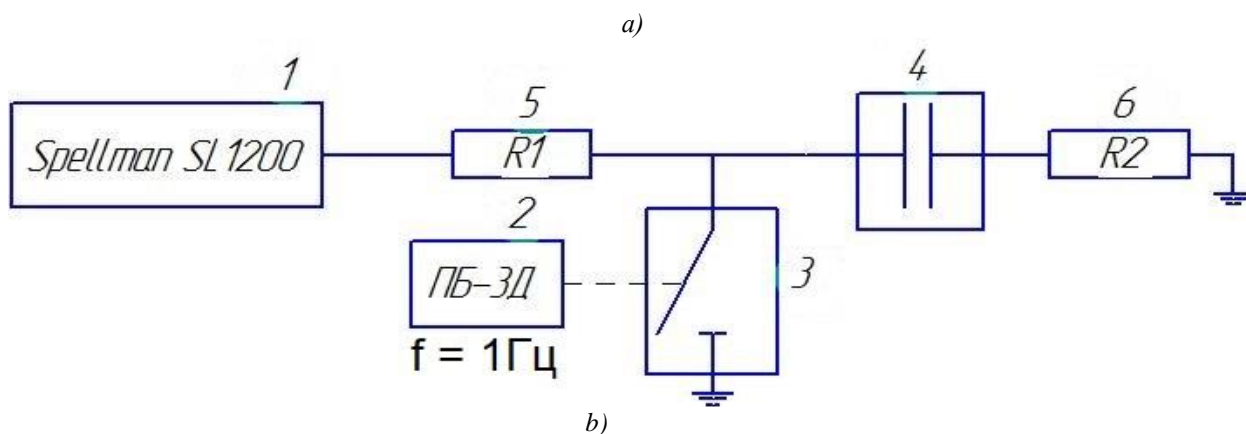


Рисунок 3. Фотография испытательного стенда а) и его функциональная схема б): 1 – источник питания, 2 – блок управления тиратроном, 3 – тиратрон, 4 - конденсатор, 5 – зарядный резистор, 6 – жидкостной резистор.

С высоковольтного источника через зарядный резистор $R1$ на испытуемый образец и тиратрон подавалось постоянное напряжение величиной 20 кВ, блок управления выдавал запускающий импульс на клемму поджига тиратрона с частотой 1 Гц. При срабатывании тиратрона происходил разряд конденсатора через жидкостный резистор. Форма импульса напряжения на резисторе регистрировалась с помощью резистивного делителя, конструктивно встроенного в саму нагрузку. При испытаниях в режиме короткого замыкания резистор $R2$ закорачивался на землю шиной.

3.1. Модификация закраин

За несколько лет набора статистики отказов конденсаторов было выяснено, что в большинстве случаев слабым местом являются закраины смежных обкладок (рисунок 4а). В этом месте реализуется наибольшая электрическая напряженность поля. Для решения данной проблемы, с помощью программ ELCUT и COMSOL Multiphysics, были проведены

электростатические расчеты полей. Для увеличения ресурса было предложено конструктивное решение, позволяющее уменьшить напряженность за счет экранирования закраины самой же обкладкой (рисунок 4б). Экранирование производится путем отворота острия, получаемого при подгибе обкладки, от края соседней обкладки с высокой напряженностью поля.

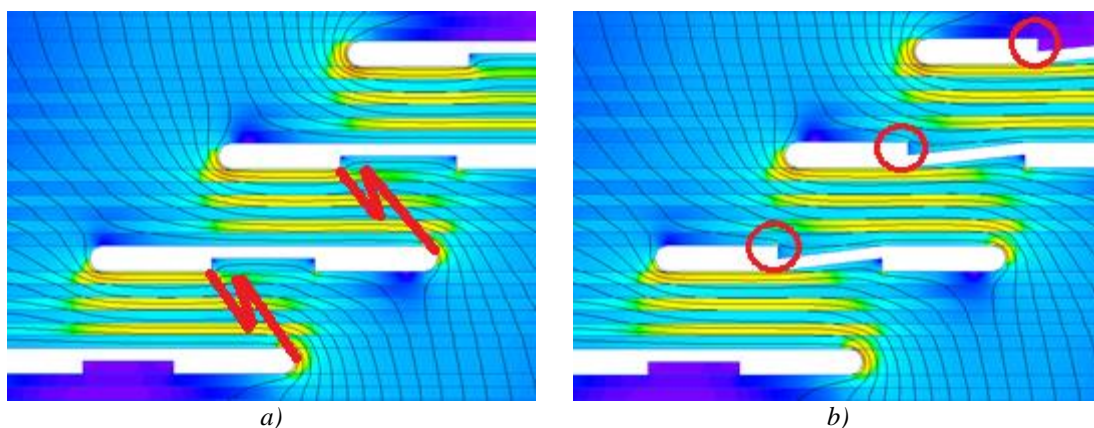


Рисунок 4. Распределение напряженности электрического поля на закраине конденсатора: а) вариант, используемый в «НСЕИ 160-0.1» и место пробоя б) модифицированное исполнение. Расчет с помощью программы ELCUT.

Для проверки этого предположенного решения были изготовлены четыре образца с бумажно-пленочной изоляцией. Секции изготавливались из конденсаторной бумаги толщиной 10 мкм и пленки ПЭТ толщиной также 10 мкм. Каждый образец состоит из двух секций, соединенных последовательно и рассчитанных на суммарное напряжение 20 кВ, что эквивалентно напряжению 100 кВ на полноразмерном конденсаторе. Конфигурации подгибов обкладок были двух видов: два образца имели подгиб, ранее применявшийся в «НСЕИ 160-0.1» и два – с модифицированным исполнением подгиба. Габаритные размеры данных образцов идентичны (рисунок 5а, б), что также важно при дальнейшей разработке конденсатора. Так же на рисунке 5в показана схема подключения секций. Изготовленные образцы просушивались и пропитывались касторовым маслом в специальной пропиточной вакуумной камере.

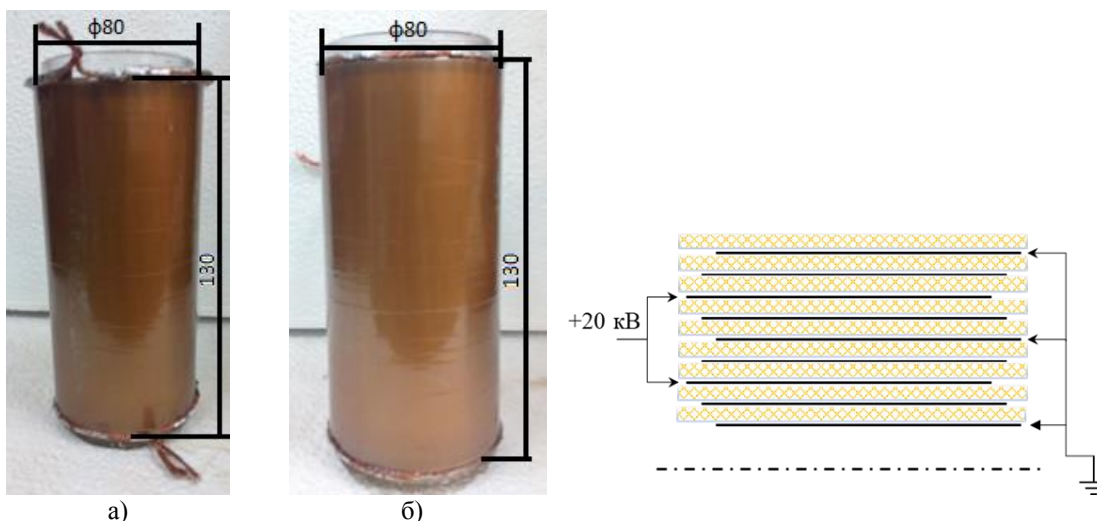


Рисунок 5. Фотографии образцов с конфигурацией подгиба «HCEI 160-0.1» (а) и модифицированной (б), в) схема подключения секций в образце.

Испытания проводились в режиме короткого замыкания, когда изоляция образцов находилась под воздействием затухающих колебательных импульсов напряжения (рисунок 6).

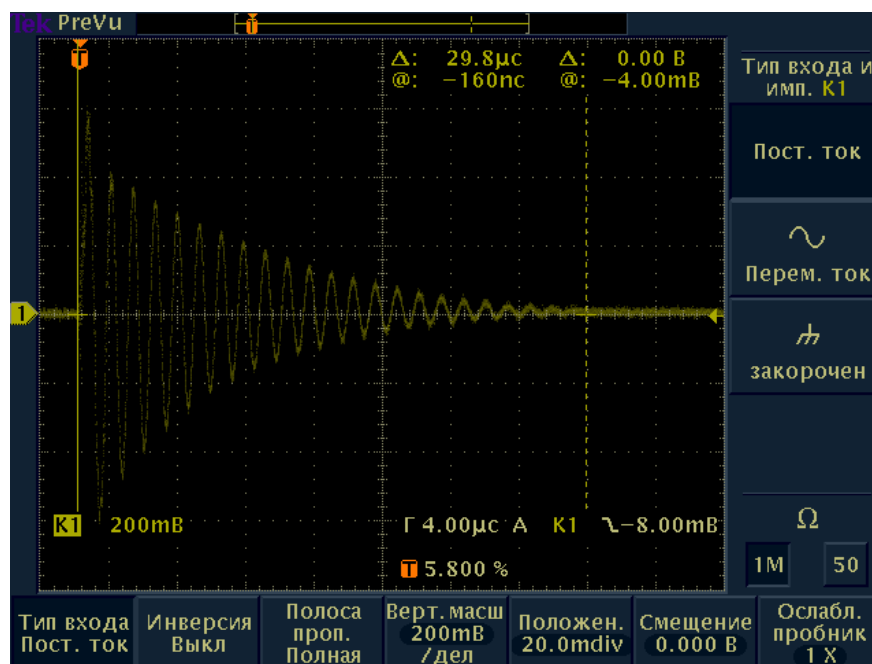


Рисунок 6. Форма импульса тока через тиратрон в режиме короткого замыкания

Ресурс образцов составил в этом режиме порядка 400 включений и был сопоставимым для обоих образцов. В согласованном режиме при реверсе напряжения ~15% наработка до пробоя составила $\sim 2 \cdot 10^5$ импульсов и также была сопоставима для обоих образцов.

3.2. Варианты бумажно-пленочной изоляции

В предыдущих версиях конденсаторов, для изоляции вместе с конденсаторной бумагой нами использовалась полиэтилентерефталатная пленка ПЭТ (лавсан). Лавсан является полярным диэлектриком, и его предельная напряженность поля составляет 160 кВ/мм. неполярные диэлектрики, такие как полистирол, полиэтилен или полипропилен, обладают большей электрической прочностью: для тонких пленок она составляет 200 – 250 кВ/мм. Вместе с тем большим преимуществом электротехнической пленки ПЭТ является то, что она производится в России, в то время как остальные названные пленки в России производятся только как упаковочный материал, который имеет очень низкие электротехнические показатели. Пленки с высокими изоляционными показателями изготавливаются в США, Европе и Китае, что затрудняет их приобретение. Однако, для проверки новой концепции изготовления изоляции конденсатора, нами была приобретена электротехническая пленка ПП.

На рисунке 7 представлены зависимости напряженности поля на поверхности фольги и на поверхности пленки в случае использования ПЭТ и ПП.

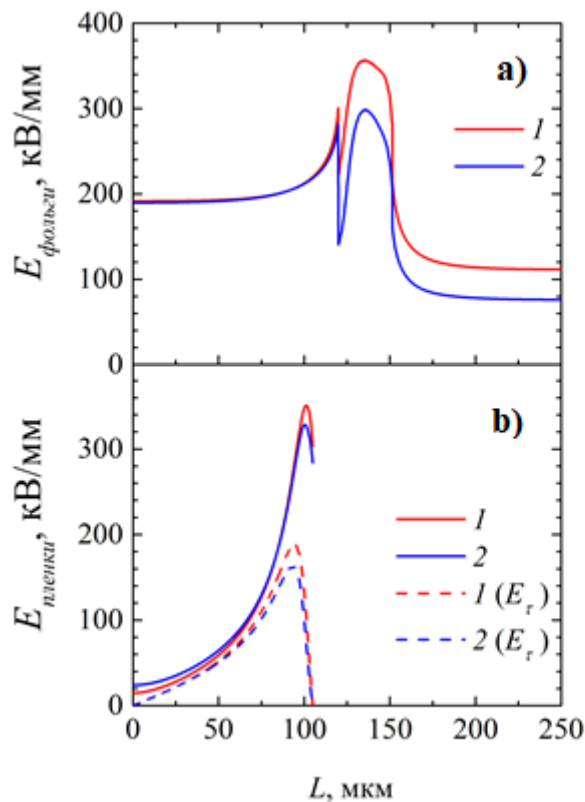


Рисунок 7. Напряженность поля на поверхности фольги (а) и на поверхности пленки (б) для ПЭТ (1) и ПП (2).

Расчеты показывают, что напряженность поля при использовании ПП ниже, чем при использовании ПЭТ. Данные результаты связаны с диэлектрической проницаемостью материалов, так как все остальные условия расчетов идентичны. Следовательно, использование ПП более предпочтительно. Для проверки этого предположения были изготовлены шесть образцов с бумажно-полипропиленовой изоляцией, просушены и пропитаны касторовым маслом. Поскольку предполагалось, что разрабатываемые конденсаторы будут работать на большем напряжении по сравнению с «НСЕІ 160-0.1» (до 100 кВ), величина закраин была увеличена вдвое (с 5 мм до 10 мм).

При работе в режиме короткого замыкания, зарядное напряжение макета секций составило 20 кВ. Средний результат испытания четырех образцов составил 150 циклов «заряд-разряд» (один из четырех выдержал лишь 45 циклов, этот результат связан с некачественной пропиткой образца), что меньше аналогичных данных для секций с бумажно-лавсановой изоляцией в

среднем в 6 раз. Проверка образцов показала, что пробой, как и ранее, происходил в области закраин (рисунок 8), но, в отличие от бумажно-лавсановой изоляции, вдоль поверхности, а не перпендикулярно ей.

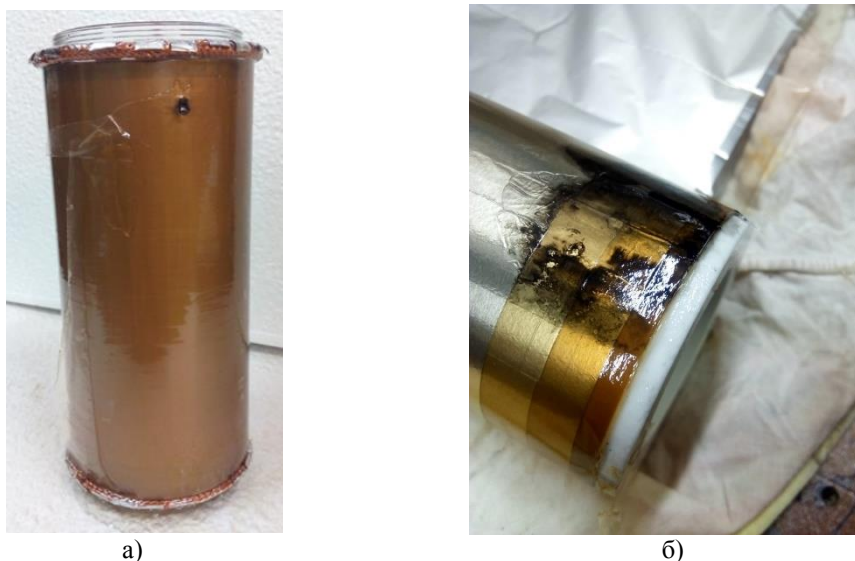


Рисунок 8. Фотографии пробоев образцов а) с бумажно-лавсановой и б) с бумажно-полипропиленовой изоляцией.

Причины таких результатов до конца не понятны, можно лишь предположить, что при приложении к слоистой изоляции переменного напряжения напряженность поля распределяется обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям. Поскольку диэлектрическая проницаемость ПП наименьшая из используемых диэлектриков (ϵ полипропилена = 2,2, ϵ лавсана = 3,2, ϵ касторового масла = 4,5, ϵ конденсаторной бумаги пропитанной касторовым маслом = 5,5) то в нем при высокочастотных колебаниях в режиме короткозамкнутой нагрузки начинают активно образовываться частичные разряды и, происходит науглероживание поверхности, приводящее к раннему перекрытию закраины.

Поскольку режим КЗ является «тяжелым» режимом работы для конденсатора, было решено провести испытания оставшихся двух образцов в согласованном режиме. При работе на согласованную резистивную нагрузку ресурс образцов составил $\sim 2.2 \cdot 10^6$ циклов «заряд-разряд».

3.3. Высоковольтные испытания модификаций образцов

С целью выбора лучшей рабочей конфигурации для практических задач, были проработаны различные комбинации геометрии обкладок и изоляции. Поскольку для образцов традиционно использовалась комбинированная бумажно-лавсановая изоляция, суммарной толщиной 60 мкм, состоящая из последовательно расположенных слоев бумаги КОН-2 толщиной 10 мкм и лавсановой пленки толщиной 10 мкм (рисунок 9а), то результаты именно этих испытаний можно считать начальной точкой.

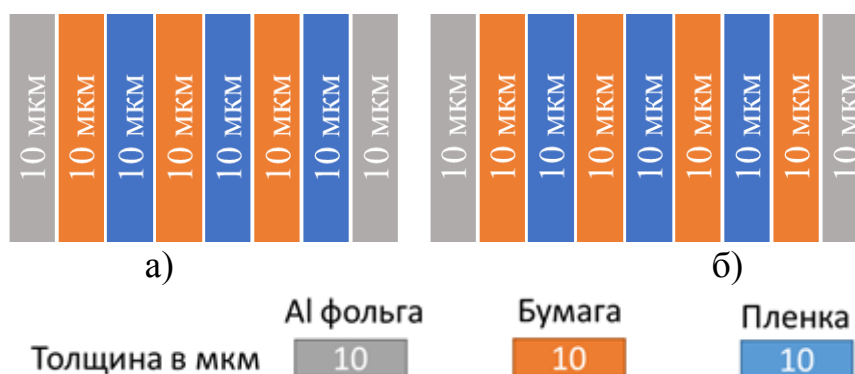


Рисунок 9. Схема сечения а) – толщиной 60 мкм, б) – толщиной 70 мкм.

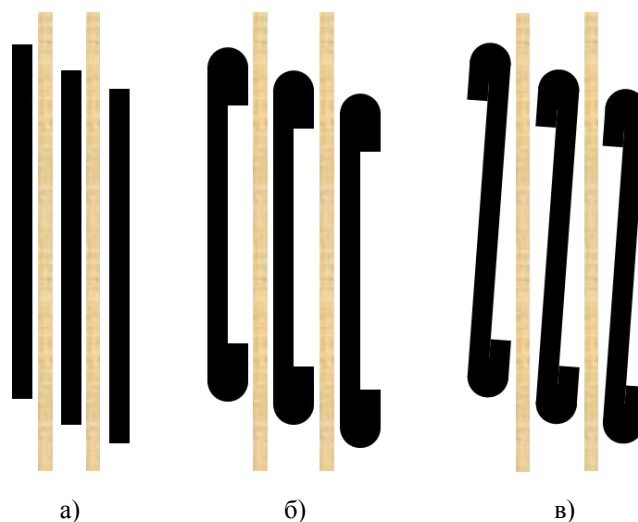


Рисунок 11. Схемы выполнения подгибов фольги: а) – без подгиба, б) – «НСЕI 160-0.1», в) – модификация для экранирования закраины самой обкладкой.

Поскольку типичный ресурс образца при разряде на согласованную резистивную нагрузку составляет сотни тысяч импульсов, испытания образцов проводились следующим образом: после процедур сушки и пропитки образцов касторовым маслом, для исключения технологического

брака (например дефекты в пленочной изоляции) производилось 1000 циклов «заряд-разряд» с частотой 40 импульсов в минуту на согласованную резистивную нагрузку. Далее ресурсные испытания проводились в режиме короткого замыкания со снижением частоты срабатывания до 18 импульсов в минуту для исключения перегрева испытываемых образцов.

Испытания показали, что при согласованном режиме ресурс образцов с ПЭТ изоляцией составил $2,4 \cdot 10^5$ циклов, в то время как ресурс образцов с ПП изоляцией $2,15 \cdot 10^6$ (Таблица 3).

Таблица 3. Результаты высоковольтных испытаний секций с подгибами закраин в согласованном режиме

№, п\п	Образец	Толщина изоляции (рис. 9)	Подгиб обкладки (рис. 10)	Количество импульсов, режим
1	ПЭТ	60 мкм (а)	стандарт (б)	240 000 согл.
2	ПП	60 мкм (б)	стандарт (б)	2 150 000 согл.

Далее были проведены испытания образцов, обкладки которых были выполнены без каких-либо подгибов, данные образцы имеют крайне малый рабочий ресурс (Таблица 4, образцы № 1, 2). Данный показатель не увеличивается даже с увеличением толщины изоляции (Таблица 3, образец № 4).

Таблица 4. Результаты высоковольтных ресурсных испытаний секций без подгибов закраин

№, п\п	Образец	Толщина изоляции (рис. 9)	Подгиб обкладки (рис. 10)	Количество импульсов, режим
1	ПП	60 мкм (а)	нет (а)	1000 согл. + 123 КЗ
2	ПЭТ	60 мкм (а)	нет (а)	1000 согл. + 376 КЗ
3	ПЭТ	70 мкм (б)	нет (а)	1000 согл. + 402 КЗ

Изготовление подгиба закраин, при той же толщине изоляции, дает существенный прирост ресурсу (Таблица 4, образец № 1 в сравнении с Таблица 5, образцы № 1-4 и Таблица 6, образцы № 1-2). При этом форма подгиба никак не влияет на ресурс образца (Таблица 5, образцы № 1-4). В свою очередь, увеличение толщины изоляции почти вдвое увеличивает ресурс

образцов, как для ПЭТ изоляции (Таблица 5, образцы № 5-7), так и для ПП изоляции (Таблица 6, образцы № 3, 4).

Таблица 5. Результаты высоковольтных испытаний секций с ПЭТ изоляцией и разными модификациями подгибов

1	ПЭТ*	60 мкм (а)	стандарт (б)	1000 согл. + 989 КЗ
2	ПЭТ*	60 мкм (а)	стандарт (б)	1000 согл. + 1065 КЗ
3	ПЭТ	60 мкм (а)	модиф. (в)	1000 согл. + 1218 КЗ
4	ПЭТ	60 мкм (а)	модиф. (в)	1000 согл. + 1118 КЗ
5	ПЭТ	70 мкм (б)	стандарт (б)	1000 согл. + 2042 КЗ
6	ПЭТ	70 мкм (б)	стандарт (б)	1000 согл. + 1873 КЗ
7	ПЭТ	70 мкм (б)	стандарт (б)	1000 согл. + 2720 КЗ

* Образцы со стандартным загибом, обращенным в сторону:



Рисунок 12. Ориентация загибов фольги: а) к бумаге (образец №7) и б) к пленке (образец №8).

Таблица 6. Результаты высоковольтных испытаний секций с ПП изоляцией и подгибом обкладки.

1	ПП	60 мкм (б)	стандарт (б)	1000 согл. + 325 КЗ
2	ПП	60 мкм (б)	стандарт (б)	1000 согл. + 432 КЗ
3	ПП	70 мкм	стандарт (б)	1000 согл. + 734 КЗ
4	ПП	70 мкм	стандарт (б)	1000 согл. + 697 КЗ

Изготовление и испытания цилиндрического конденсатора

Схема намотки секций конденсатора и его общие размеры намотки представлены на рисунке 13. Бумажно-пленочная изоляция имела общую толщину 70 мкм и состояла из четырех слоев бумаги КОН-2 и трех слоев лавсановой пленки. Сам конденсатор состоял из 910 секций, электрически объединенных по 10 секций последовательно и 91 параллельно.

Фотографии конденсатора на этапе намотки, сборки и перед пропиткой представлены на рисунке 14.

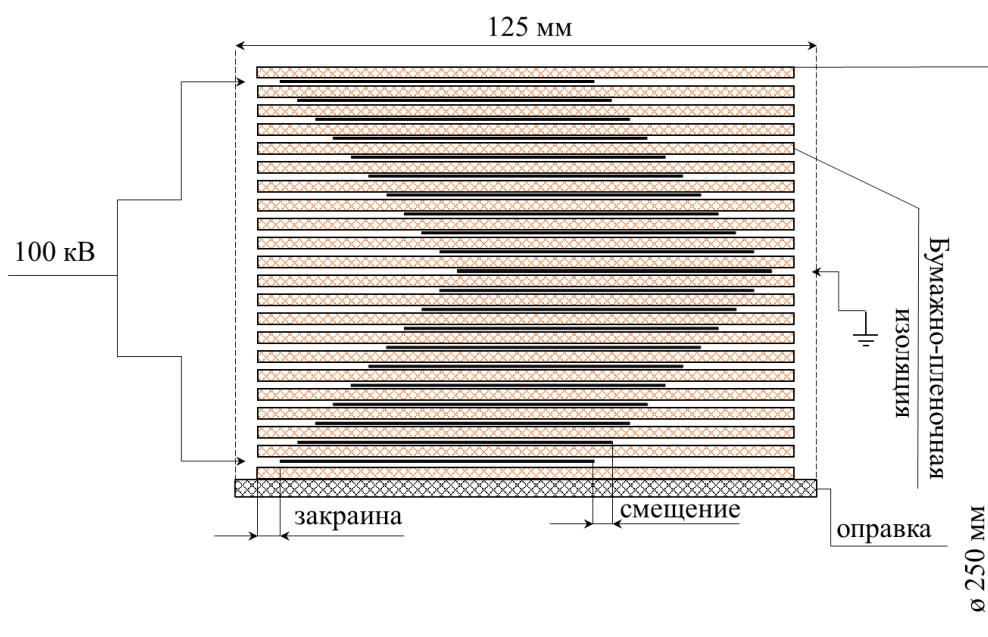


Рисунок 13. Схема намотки первых секций конденсатора и его общие размеры намотки



Рисунок 14. Фотографии цилиндрического конденсатора на этапе намотки, сборки и перед пропиткой

После пропитки касторовым маслом емкость конденсатора составила $C = 125 \text{ нФ}$, $\text{tg}\delta = 40.7 \cdot 10^{-4}$. Индуктивность и собственное сопротивление контура определялись по осциллограмме тока, полученной с пояса Роговского, при зарядном напряжении 3 кВ при разряде в режиме короткого замыкания (Рисунок 15) по формулам:

$$L = \frac{T^2}{C \left(4\pi^2 + \ln^2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \right)} \quad (1)$$

$$R = \frac{2L}{T} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

и составили 40 нГн и 0.145 Ом, соответственно. При этом фронт импульса тока по уровню от нуля до максимума составил 112 нс.

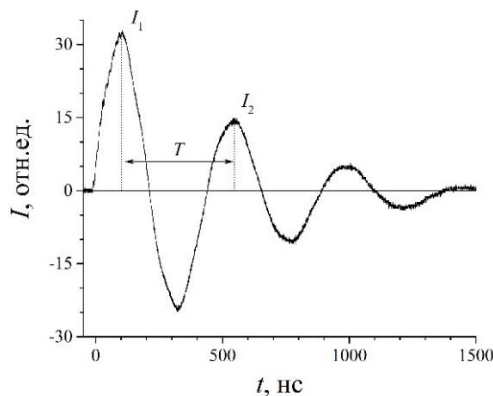


Рисунок 15. Фотография стенда для измерения собственной индуктивности и сопротивления разрядного контура конденсатора, и осциллограмма тока контура в режиме короткого замыкания.

Поскольку для разряда в режиме короткого замыкания фронт импульса примерно равен четверти периода, а для режима разряда на согласованную нагрузку оценивается по формуле:

$$t_{\text{фр}} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sqrt{L \cdot C}, \quad (2)$$

Длительность фронта импульса при разряде в согласованном режиме будет составлять величину 86 нс. При этом сопротивление нагрузки должно иметь величину 0.57 Ом:

$$R_n = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3)$$

Теоретически максимально достижимая амплитуда тока, оцениваемая как:

$$I_{\text{м}} = 0.55 \frac{U_0}{R_n}, \quad (4)$$

где U_0 – зарядное напряжение, равное 100 кВ, составит 96.5 кА.

Для проведения высоковольтных испытаний конденсатора был подготовлен стенд, состоящий из высоковольтного источника, системы подачи сухого воздуха, маслонеполненного бака, в который помещался

конденсатор с разрядником, водносолевая нагрузка и датчики регистрации напряжения и тока разряда (рисунок 16).

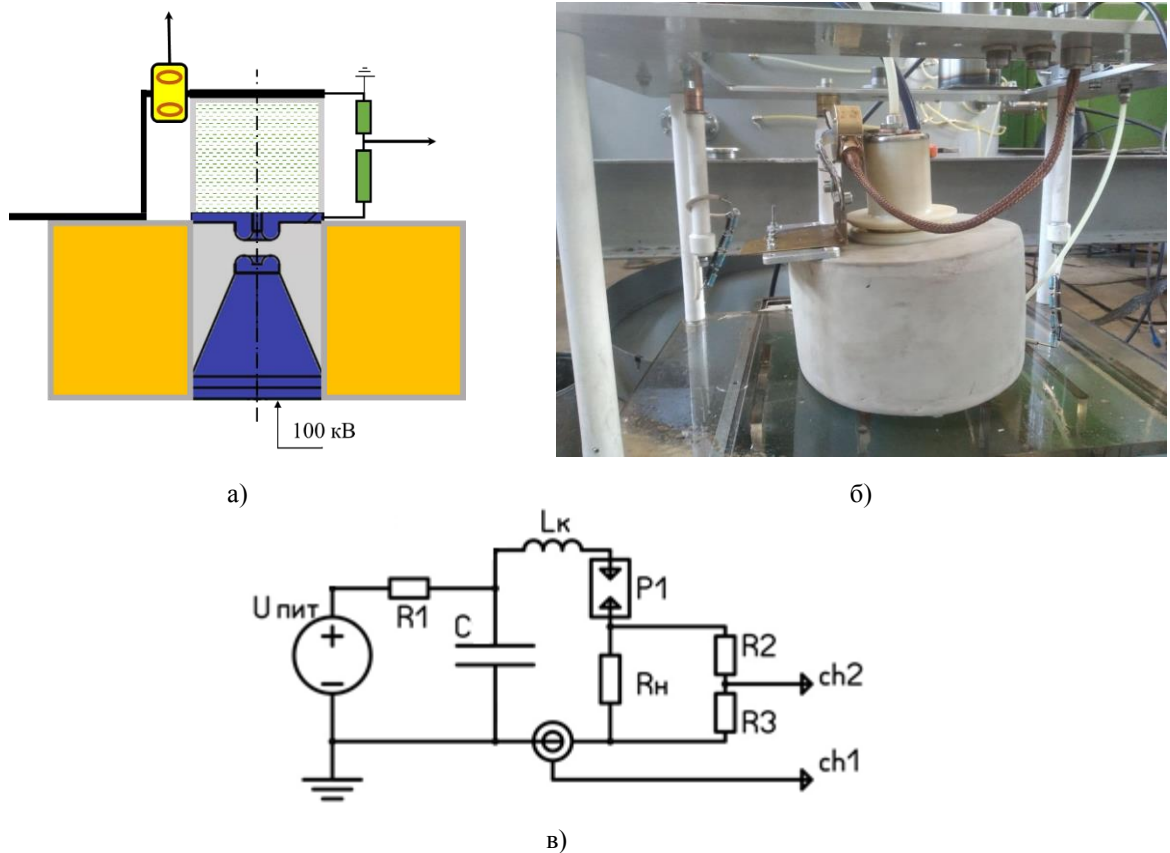


Рисунок 16. Схематическое изображение разреза испытательного стенда (а), его фотография (б) и электрическая схема стенда с испытываемым высоковольтным конденсатором (в)

Источник питания, через развязывающий резистор R_1 , заряжает конденсатор C до напряжения 100 кВ. Коммутация конденсатора на нагрузку осуществляется при сбросе давления в разряднике P_1 . Контроль напряжения осуществляется выносным делителем R_2 - R_3 , где $R_2=75$ Ом, $R_3=0.223$ Ом. Ток в контуре измеряется с помощью пояса Роговского. Осциллограммы импульсов тока и напряжения приведены на рисунке 17.

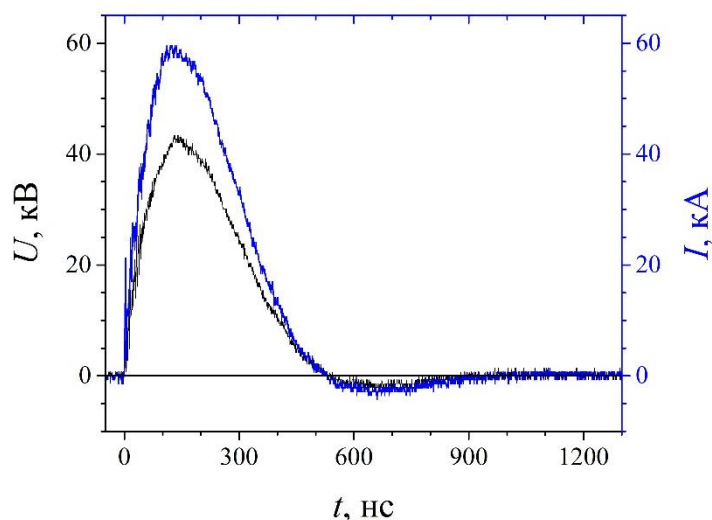


Рисунок 17. Характерные зависимости напряжения на нагрузке на основе водносолевого раствора и тока в контуре при зарядном напряжении 100 кВ

В результате высоковольтных испытаний прототипа конденсаторно-коммутаторной сборки получены следующие характеристики: при зарядном напряжении 100 кВ амплитуда импульса тока достигает 60 кА в режиме разряда на резистивную нагрузку с сопротивлением, близким к согласованному. При амплитуде напряжения на нагрузке 43 кВ полное сопротивление контура составляет величину 0.72 Ом. Снижение амплитуды тока относительно теоретически достижимой объясняется увеличением индуктивности контура из-за подводящих шин и потерями энергии в разряднике конденсаторно-коммутаторной сборки.

Цель по разработке и изготовлению конденсатора с заданными параметрами, можно считать достигнутой. Однако набрать статистику наработки конденсатора на ресурс не удалось по причине пробоя изолятора разрядника (рисунок 18).



Рисунок 18. Фотография «пробитого» разрядника

Также следует отметить, что конструкция конденсатора с точки зрения изготовления получилась сложная: процесс намотки достаточно трудоемок, небольшая ширина намоточного материала, большое количество витков и большой конечный диаметр требовали усиленного контроля.

Заключение

В ходе работы был спроектирован и изготовлен стенд для ресурсного испытания экспериментальных образцов. Была выдвинута идея о возможности повышения ресурса работы конденсатора за счет минимизации локального усиления электрического поля на электродах. Были проведены электростатические расчеты, которые подтвердили предположения о характере пробоя ранее эксплуатировавшихся ККС и задали направление для дальнейшей работы. Были изготовлены экспериментальные образцы, при испытании которых выяснено, что наличие подгиба обкладок необходимо, но его ориентация не оказывает существенного влияния на ресурс образцов. Изоляция электрода конденсаторной бумагой с обеих сторон, по сравнению с односторонней, увеличивает ресурс секций примерно вдвое. Также было выяснено, что изоляция из ПП пленки на порядок увеличивает ресурс секций по сравнению с ПЭТ пленкой при согласованном режиме, однако почти настолько же уменьшает его в режиме КЗ. Практическим итогом стало изготовление цилиндрического низкоиндуктивного сильноточного конденсатора с заданными характеристиками и в установленных габаритах. В дальнейшем данный конденсатор может работать в составе ККС в малогабаритных лабораторных генераторах.