

Разработка и исследование высоковольтного импульсного конденсатора для электрофизических установок

Л.А. Дарьян¹, А.Д. Ленский², В.А. Логунов^{1,*}, О.А. Никитин¹, Д.В. Рыбка²

¹Российский федеральный Ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

*izvestkovo@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты ресурсных испытаний высоковольтных импульсных конденсаторов (ВИК) с рабочим напряжением 100 кВ и емкостью 0.04 мкФ для электрофизических установок. ВИК разработан и изготовлен на базе отечественного технологического и испытательного оборудования в рамках реализации программы импортозамещения. Благодаря оптимизации конструктивных параметров и технологии намотки, в частности загиба края алюминиевой фольги, удалось обеспечить улучшенные технические характеристики по сравнению с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: секция, высоковольтный импульсный конденсатор, бумажно-пленочная изоляция, напряженность электрического поля.

1. Введение

В сложившейся в настоящее время ситуации необходимо решать проблемы не только по импортозамещению продукции большинства отраслей промышленности, но и разрабатывать новые изделия с улучшенными характеристиками на базе отечественных материалов и технологий.

В РФЯЦ-ВНИИТФ создан участок изготовления ВИК на базе отечественного технологического оборудования, позволяющий изготавливать высоковольтные импульсные конденсаторы различной конструкции небольшими партиями.

Целью настоящей работы является разработка и изготовление опытных образцов ВИК на базе отечественного технологического оборудования для замены применяемых в настоящее время конденсаторов зарубежных изготовителей.

2. Опытный образец ВИК

На Рис.1 представлен внешний вид опытного образца, разработанного ВИК.



Рис.1. Опытный образец ВИК.

Корпус опытных образцов конденсаторов выполнен из листового полипропилена толщиной 5 мм. В корпусе размещен пакет, состоящий из последовательно соединенных секций. В качестве обкладок при намотке секций использовалась алюминиевая фольга

отечественного производства, а в качестве диэлектрика – конденсаторная бумага российского производства и полипропиленовая пленка зарубежного изготовителя. Секции пропитывались касторовым маслом. С учетом требуемого ресурса ВИК и формы воздействующего напряжения средняя напряженность электрического поля в диэлектрике составляла 150 кВ/мм. Техническими требованиями на ВИК регламентирована индуктивность разрабатываемых конденсаторов. В связи с этим намотка секций ВИК проведена по схеме, позволяющей обеспечить требуемое значение индуктивности конденсатора.

Индуктивность ВИК измерялась следующим образом. Выводы ВИК соединялись медной шиной накоротко, как показано рисунке 2 с одной (3) или двух (3 и 4) сторон. При этом обеспечивалась минимальная длина шины, которая составила 265 мм. Ширина и толщина шины были соответственно 95 мм и 0.5 мм.

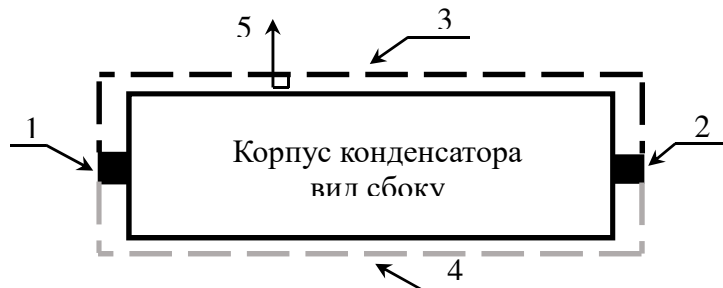


Рис.2. Схема ошиновки ВИК для измерения его индуктивности: 1 и 2 – выводы, 3 – медная шина при односторонней ошиновке, 4 – дополнительная шина при двусторонней ошиновке, 5 – датчик тока.

На выводы конденсатора подавался возбуждающий импульс с амплитудой напряжения 150 В и длительностью 200 нс. Осциллограмма напряжения представлена на Рис.3.

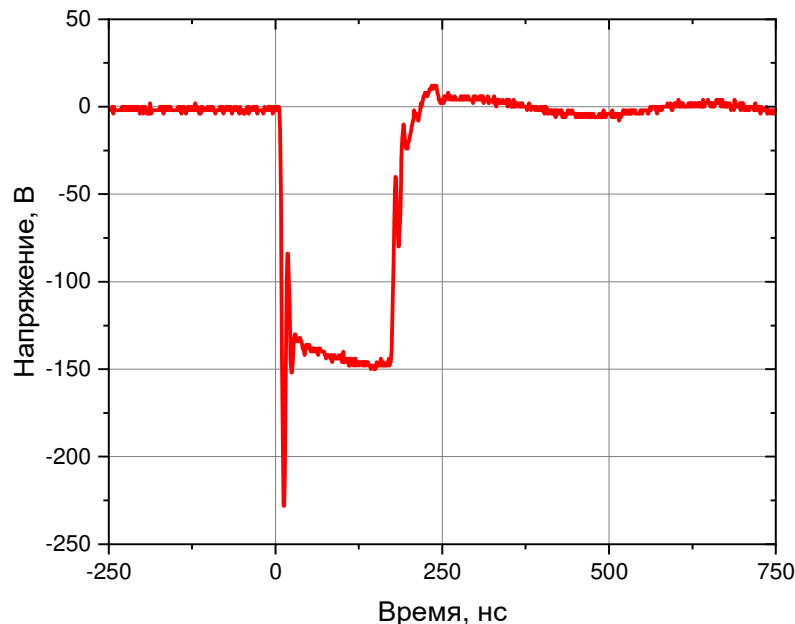


Рис.3. Осциллограмма возбуждающего импульса напряжения на ВИК.

Далее ВИК разряжался через медную шину в колебательном режиме (Рис.4). У данного сигнала обрабатывались 5 периодов, определялся период колебаний T и величины амплитуд токов I_1 и I_2 .

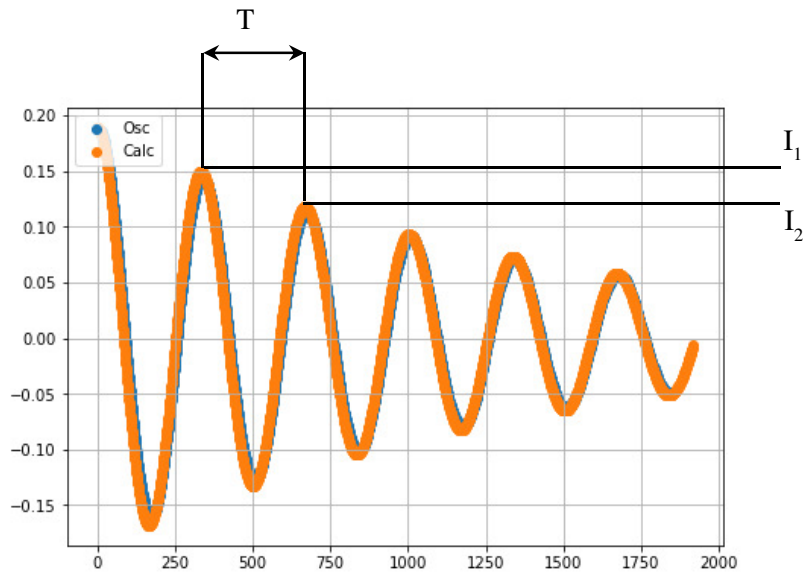


Рис.4. Сигнал разряда ВИК с датчика тока.

Из теории известно, что ток в RLC-контуре можно определить из следующего уравнения [1, 2]:

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t), \quad (1)$$

где U_0 – зарядное напряжение, ω – частота колебаний, L и R – индуктивность и активное сопротивление RLC-контра, соответственно, t – время.

Тогда индуктивность разрядного контура можно определить по формуле:

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

А активное сопротивление контура по формуле:

$$R = \frac{2L}{T} \ln^2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right), \quad (3)$$

где T – период затухающих колебаний, C – емкость контура, I_1 и I_2 – амплитуды затухающих колебаний, сдвинутых по времени относительно друг друга на величину T .

Результаты проведенных измерений показали, что индуктивность разрабатываемого ВИК соответствует требованиям Заказчика и составляет 64.9 нГн при измерении по схеме с односторонней ошиновкой и 42.9 нГн при измерении по схеме с двусторонней ошиновкой.

На следующем этапе разработки проводились ресурсные испытания двух опытных образцов ВИК на автоматизированном испытательном стенде. На Рис.5 представлена электрическая схема зарядно-разрядного контура стенда для проведения ресурсных испытаний.

Напряжение на конденсаторы $C1$ и $C2$ подавалось от высоковольтного источника постоянного напряжения положительной и отрицательной полярности, амплитудой до ± 80 кВ. В качестве нагрузки использовался блок из резисторов ТВО-10 номиналом 27 Ом. Общее сопротивление нагрузки составляло 1.2 Ом. Также в блок нагрузки был установлен

резистивный делитель напряжения. Коммутатор SW1 представлял из себя трехэлектродный газовый разрядник высокого давления. Продувка и напуск сухого воздуха в разрядник с необходимым давлением осуществлялись с помощью системы управления напуском газа автоматизированного испытательного стенда после каждого импульса. Частота повторения циклов заряд-разряд – один импульс в три минуты с автоматической записью импульса напряжения нагрузки $R_{нагр}$ с резистивного делителя напряжения.

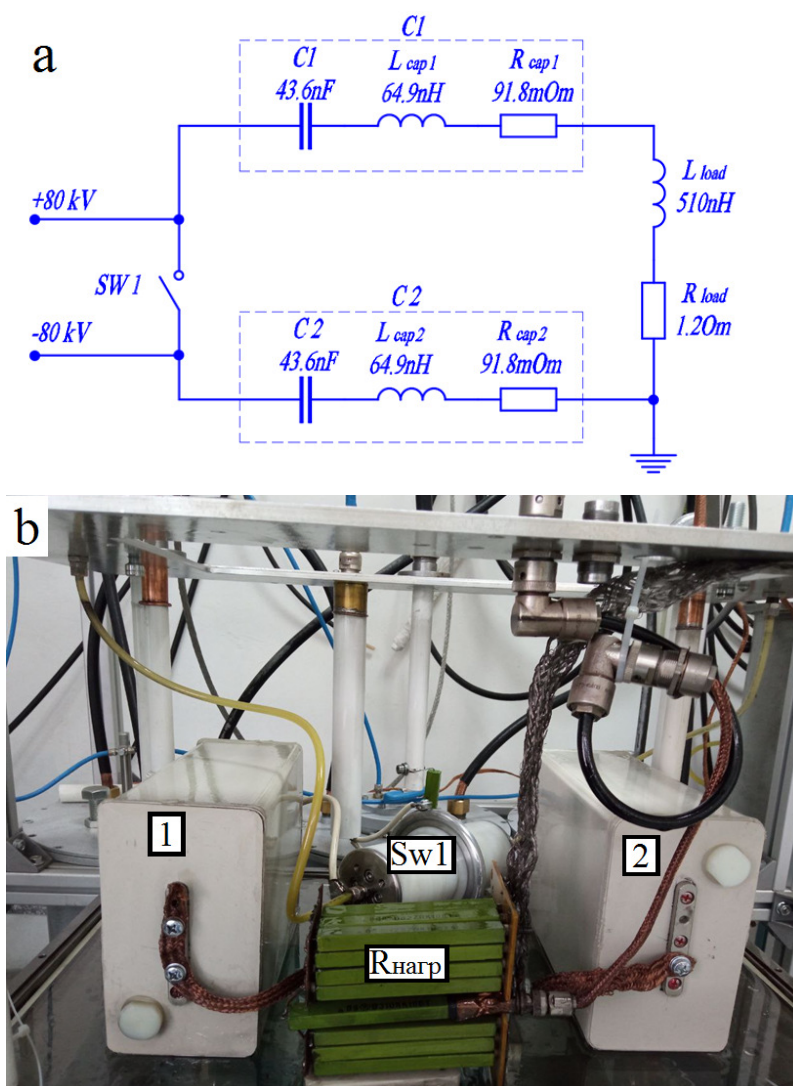


Рис.5. Электрическая схема (а) и испытательная установка (б) для проведения ресурсных испытаний ВИК.

На Рис.6 представлены осциллограмма и расчетная кривая импульса напряжения на нагрузке $R_{нагр}$ и на конденсаторах C1 и C2, полученные при моделировании электрической схемы (Рис.5).

Разработанные ВИК рассчитаны на рабочее напряжение 100 кВ, режим разряда – апериодический при амплитуде тока разряда до 25 кА. При проведении ускоренных ресурсных испытаний конденсаторы заряжались до напряжения +80 кВ и -80 кВ. При этом сопротивление нагрузки подбиралось таким образом, чтобы размах испытательного напряжения составлял 120 кВ для каждого конденсатора, а режим разряда был колебательным. При проведении ресурсных испытаний первый образец выдержал 3500

циклов «заряд-разряд» до пробоя изоляции, а второй – 5940 циклов испытательных воздействий. Учитывая известную формулу [3]:

$$\tau_{ном} = \tau_{исп} \left(\frac{U_{исп}}{U_{ном}} \right)^{10}, \quad (4)$$

где $U_{ном}$ и $U_{исп}$ – рабочее номинальное и испытательное напряжение конденсатора, а $\tau_{ном}$ и $\tau_{исп}$ – номинальный ресурс и ресурс изоляции при испытаниях, соответственно, можно вычислить ресурс разработанных конденсаторов при работе в номинальном режиме. Расчет по формуле (4) показывает, что ресурс первого ВИК составляет 21670 циклов «заряд-разряд», а второго – 36780 циклов «заряд-разряд», что соответствует требованиям, предъявляемым к разработанным опытным образцам.

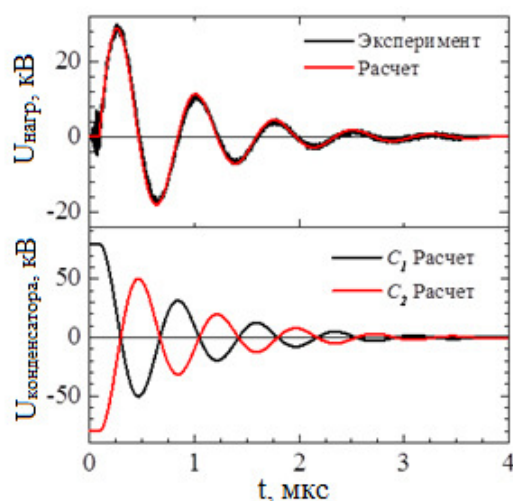


Рис.6. Осциллограмма импульса напряжения и расчетные кривые напряжения в нагрузке $R_{нагр}$ и на конденсаторах $C1$ и $C2$.

3. Заключение

В РФЯЦ-ВНИИТФ разработаны и изготовлены высоковольтные импульсные конденсаторы на базе отечественного технологического оборудования с характеристиками, не уступающими применяемым ранее в отечественной практике зарубежным образцам.

Благодарности

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта №19-48-700017.

3. Литература:

- [1] Савельев И.В., *Курс общей физики в 4-х томах. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика*. (Москва: КноРус, 2012).
- [2] Иродов И.Е., *Электромагнетизм. Основные законы: Учебное пособие для физич. спец. вузов*. (Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013).
- [3] Кучинский Г.С., Назаров Н.И., *Силовые электрические конденсаторы*. (Москва: Энергоатомиздат, 1992).