

## Проходной вакуумный изолятор секционированного типа для мощных импульсных ускорителей

*А.А. Бухаркин, М.В. Журавлёв\*, Г.Н. Курапов, В.А. Рыжков, Г.Е. Ремнёв, Е.А. Курапова, А.С. Панова, П. Глумац*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия  
\*zhuravlev@tpu.ru*

**Аннотация.** Проходной вакуумный изолятор в импульсных ускорителях заряженных частиц имеет одно из определяющих значений максимального рабочего напряжения. Импульсный характер напряжения определяет требования к паразитным параметрам изолятора, которые напрямую зависят от габаритов. Поэтому ключевую роль играет удельная электрическая прочность. Этот параметр главным образом зависит от равномерного распределения поля вдоль изолятора. Дополнительное негативное влияние оказывает поверхностный заряд, создаваемый скапливающимися электронами, и деградация материала изолятора из-за УФ излучения. Несмотря на многолетние исследования, универсального решения этой проблемы не найдено. Так, например, могут использоваться секционированные изоляторы, металлические кольца которых могут выполнять функцию экрана от электронов и УФ излучения, а также диэлектрические линзы для конфигурирования электрического поля и его равномерного распределения вдоль поверхности изолятора. Такие подходы рассматривались ранее. В данной работе эти два подхода объединены. Представлены расчет электрических полей, конструкция узла изолятора и измерение распределения напряжения на секциях изолятора. Расчетное отклонение от идеально равномерного распределения составило  $\pm 0.2\%$ , измеренное  $2.26\%$ .

**Ключевые слова:** проходной изолятор, вакуумный изолятор, секционированный изолятор, диэлектрическая линза, импульсный ускоритель.

### 1. Введение

Изолятор вакуумной камеры мощных импульсных ускорителей заряженных частиц – один из ключевых узлов, определяющих рабочее напряжение. При его эксплуатации возникает ряд процессов, снижающих электрическую прочность и ресурс этих изоляторов. Накопление заряда на поверхности, из-за оседания электронов. Деградация полимерных изоляторов происходит вследствие воздействия УФ излучения. Также при импульсном характере напряжения, с временем нарастания фронта в диапазоне единиц-десятков наносекунд, распределение электрического поля вдоль поверхности изолятора определяется изменением емкости по отношению к земле. При использовании классических для этого типа ускорителей изоляторов шайбового типа данное распределение крайне нелинейно, что приводит к неравномерности электрического поля вдоль поверхности и, как следствие, возникновению высоких локальных напряжённостей на поверхности изолятора. Использование больших секционированных изоляторов, позволяющих снизить напряженность поля, недопустимо так как они обладают сравнительно большой индуктивностью, приводящей к затягиванию фронта напряжения. Еще одно условие, увеличивающие пробивное напряжение и срок службы изолятора – это перпендикулярность эквипотенциальных линий поверхности изолятора, что предотвращает попадание вторичных электронов на его поверхность.

Для достижения высокой электрической прочности, сохраняя разумные габариты изолятора, необходимо исключить или существенно снизить воздействие этих процессов. Основная задача, которую необходимо решить для получения максимально однородного поля – равномерное распределение емкости вдоль поверхности изоляционных промежутков. При этом необходимо учитывать конструктивные емкости всего узла. Градиентные кольца используются в качестве одного из способов получения равномерного распределения

поля [1]. Изолятор разбивается на меньшие изолирующие промежутки с металлическими вставками. Этот подход фокусируется на распределении емкостей вдоль изолирующего диэлектрика и в некоторых случаях не учитывает ёмкость элементов конструкции и как правило крайние кольца в таких изоляторах определяют прочность всего изолятора поскольку имеют наибольшую емкость на землю. Другой вариант использование диэлектрических формирователей поля (линз) [2]. Такой вариант сосредоточен на распределении конструктивных емкостей и не всегда позволяет решить задачу равномерного распределения поля. Также использование линз позволяет задать направление эквипотенциалей перпендикулярно поверхности изолятора. Таким образом, используя только один из способов, не всегда удаётся достичь высокой однородности распределения напряжённости, особенно в случае предъявления к изолятору дополнительных требований по габаритам, форм-фактору, несущей способности и т.д. При одновременном использовании обоих этих подходов можно сбалансировать распределение емкостей по поверхности диэлектрика и учесть конструктивные особенности установки, что позволит получить электрическое поле с весьма высокой степенью однородности вдоль поверхности изолирующих промежутков. При этом градиентные кольца определённой конструкции могут выполнять функцию защиты поверхности изолятора от накопления заряда и УФ излучения [3]. Однако, расчёт конструкции изолятора, разбитого на секции при одновременной установке диэлектрической линзы, обеспечивающей высокую степень однородности поля, требует весьма объёмных и сложных расчётов.

Использование современного программного обеспечения (ПО) для расчёта конфигурации электрического поля позволяет создать конструкцию изолятора обеспечивающую весьма высокую степень однородности распределения напряжённости вдоль поверхности изолирующих промежутков в вакуумном объёме. Объединение способов распределения поля с помощью градиентных колец и диэлектрических линз с использованием специализированного ПО видится перспективным направлением для создания проходного вакуумного изолятора для мощных импульсных ускорителей заряженных частиц. Предполагается достижение высоких удельной электрической прочности и ресурса такого изолятора.

## **2. Расчёт, конструкция и испытания изолятора**

### *2.1. Расчёт*

С целью создания узла изолятора с равномерным распределением поля и защитными экранами в первую очередь проводился итерационный расчёт конфигурации. Форма поля изменялась за счёт кромки потенциального диска, формы диэлектрической линзы и диаметров металлических градиентных колец. Расчёт распределения напряжения вдоль поверхности изоляционных промежутков осуществлялся в программном пакете ELCUT. Результирующая конфигурация поля и расчётное распределение напряжения на диэлектрических кольцах приведены на Рис. 1. Диэлектрическая линза из оргстекла. Градиентные кольца с небольшим отличием по диаметру и защитным экраном со стороны вакуумной камеры. Кромка потенциального электрода оснащена кольцом, предварительно формирующем распределение поля. Со стороны высокого напряжения объём изолятора заполнен дистиллированной водой для увеличения емкости между градиентными кольцами. Контур расчёта распределения напряжения находится со стороны вакуума вблизи границы раздела с оргстеклом.

Расчётное распределение напряжения для 500 кВ составило  $100 \pm 1$  кВ на секцию. Диэлектрические кольца имеют прямоугольное сечение, выполнены из оргстекла диаметром

205 мм и высотой 20 мм. Соотношение между диаметром катода и внутренним диаметром защитных экранов градиентных колец –  $e$ .

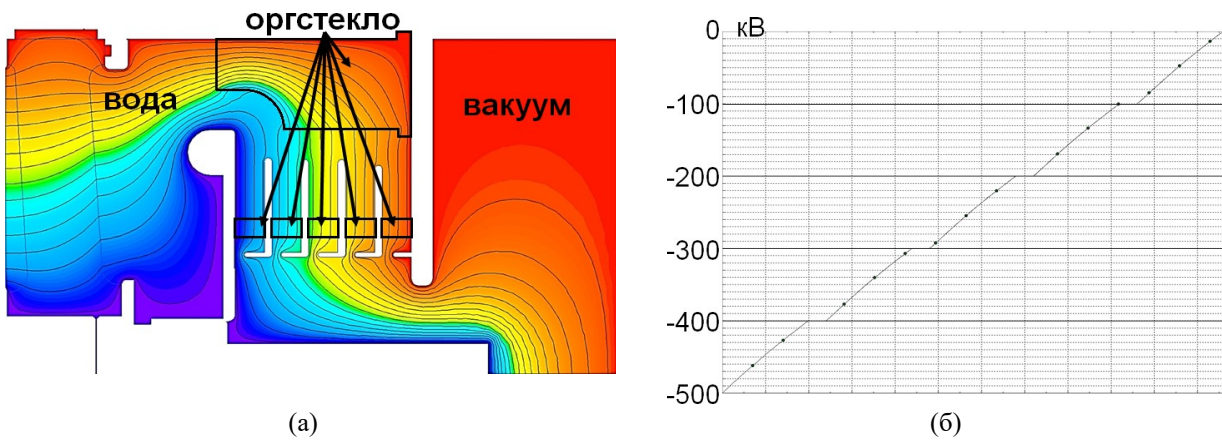


Рис. 1. Расчёт конфигурации электрического поля (а) и распределения напряжения вдоль поверхности диэлектрических промежутков со стороны вакуума (б).

### 2.2. Конструкция

На основании расчёта была построена 3D модель и изготовлен узел изолятора. Конструкция изолятора представлена на Рис. 2. На фото (Рис. 2б) кольцо предварительного формирования поля снято.

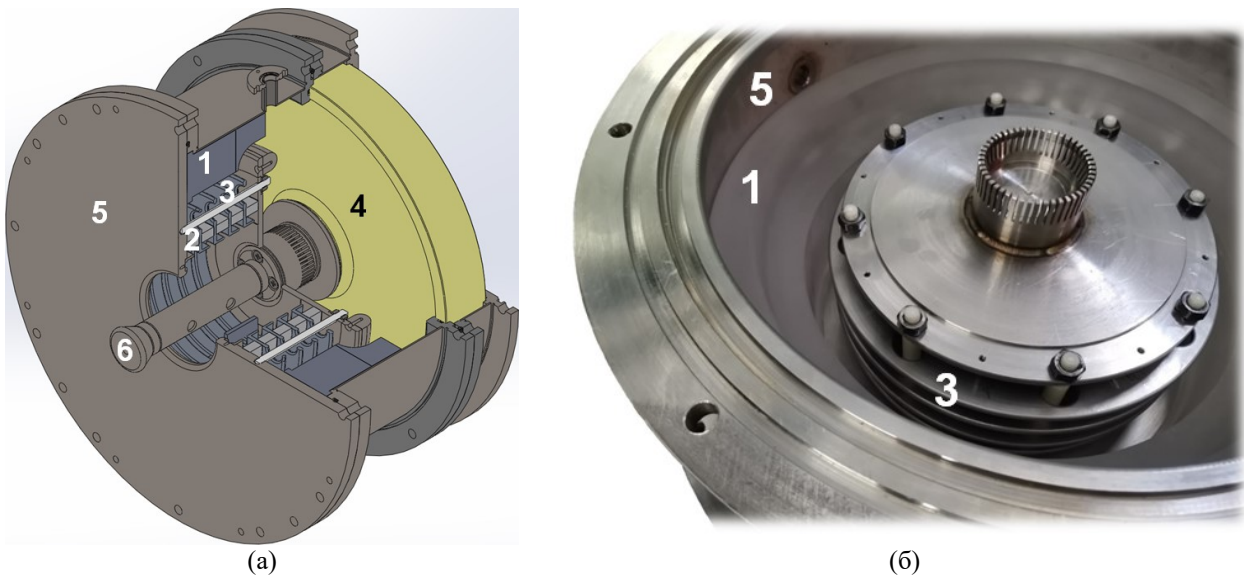


Рис. 2. 3D модель (а) и фотография внутреннего объёма сборки изолятора (б). 1 – конфигуратор поля из оргстекла, 2 – изоляционные кольца из оргстекла, 3 – металлические градиентные кольца, 4 – капролоновый шайбовый изолятор, 5 – корпус, 6 – катод.

Со стороны разрядника объём изолятора ограничен капролоновым шайбовым изолятором. Стопка из чередующихся диэлектрических изолирующих и металлических градиентных колец стягивалась капролоновыми шпильками. Расчёт влияния стягивающих диэлектрических шпилек на форму поля показал отсутствие сколько-нибудь существенного изменения. В качестве уплотнения использовался двухкомпонентный силиконовый герметик. Слой герметика не превышает 0.5 мм, и его влияние на распределение поля пренебрежимо мало.

### 2.3. Испытания

Изготовленная конструкция устанавливалась на генератор ускорителя для измерения фактического распределения напряжения по градиентным кольцам. Измерения проводились с помощью двухкаскадного делителя напряжения, первый каскад жидкостный, второй – резистивный. Измерительная сборка устанавливалась в вакуумную камеру (Рис. 3). Перед каждым импульсом делитель подключался через контактную скобу к градиентному кольцу, начиная с потенциального диска.



Рис. 3. Фотография измерительной сборки, установленной в вакуумную камеру.

Амплитуда испытательного импульса напряжения составляла 75.9 кВ. Осциллограммы импульсов напряжения с каждого градиентного кольца, приведённые в одних координатах, представлены на Рис. 4. Численные значения результатов измерения сведены в Таблицу 1.

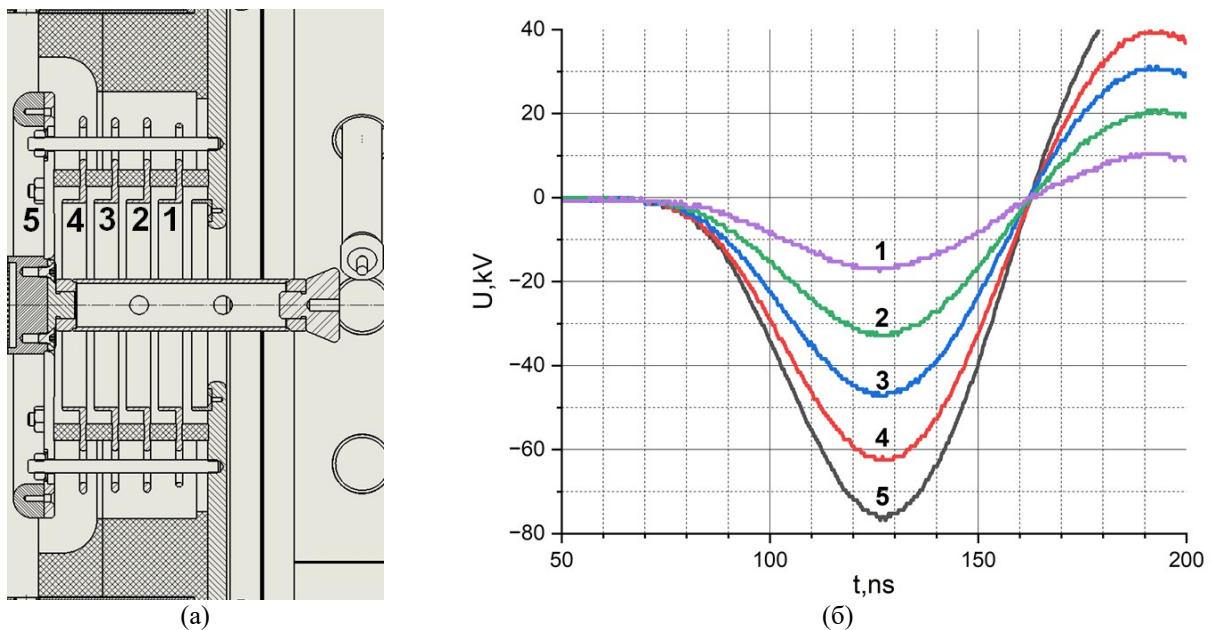


Рис. 4. Нумерация градиентных колец (а) и осциллограммы напряжения на каждом кольце (б).  
1-4 – градиентные кольца, 5 – потенциальный диск.

**Таблица 1.** Численные результаты измерений.

	$U$ секции, кВ	$\Delta U$ секция, кВ	$\Delta U$ секция, % от макс (75.9 кВ)
Секция 1	16.9	16.9	22.27
Секция 2	32.5	15.6	20.55
Секция 3	47.1	14.6	19.24
Секция 4	61.4	14.3	18.84
Секция 5	75.9	14.5	19.1

Измеренные значения распределения напряжения по диэлектрическим промежуткам показали высокую степень равномерности. Однако есть значительные отклонения от расчётов. Так при амплитуде испытательного импульса 75.9 кВ в идеальном случае напряжение на секции должно составить 20 % или 15.18 кВ. Максимальное отклонение от этой величины составило 1.72 кВ, т.е. 11.33 % от идеального напряжения на секции или 2.26 % от полной амплитуды импульса. Таким образом, использование расчёта распределения электрических полей для конструкции изоляторного узла позволило создать конструкцию сложной формы с высокой равномерностью падения напряжения вдоль диэлектрических зазоров. При расчётах учитывалось влияние формы диэлектрической линзы, диаметра и формы потенциального диска, соотношение диаметров градиентных металлических колец.

### 3. Заключение

Расчёт конфигурации электрического поля узла секционированного изолятора в программном пакете ELCUT позволил учесть влияние нескольких факторов. Форма диэлектрического формирователя поля, предварительное конфигурирование посредством кромки потенциального диска, соотношения диаметров градиентных колец. Расчёт показал практически полностью однородное распределение напряжений вдоль диэлектрических промежутков. Для 5 секций расчётное отклонение составило  $\pm 0.2$  % от максимума. На основании этих расчётов была создана конструкция изоляторного узла и измерены распределения напряжения. Измерения показали меньшую, но существенную степень равномерности падающего напряжения. Максимальное отклонение на секцию составило 2.26 %. В дальнейшем необходимо провести ресурсные испытания такого узла изолятора, в том числе для выявления не учтённых нюансов.

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-19-00614 (<https://rscf.ru/project/23-19-00614/>).

### 4. Список литературы

- [1] A. Poloskov, M. Serebrennikov, I. Egorov, High-voltage pulse bushing with induced voltage distribution between sections, *Vacuum*, vol. **194**, 110593, 2021, doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110593.
- [2] E. G. Krastelev, Yu. D. Kalashnikov, A High-Power Generator of Nanosecond Pulses with an Amplitude of up to 500 kV and a Repetition Rate of up to 50 Hz, *Instruments and Experimental Techniques*, vol. **59**, 231, 2015, doi: 10.1134/S0020441216010243
- [3] Miller, Hillard, Flashover of insulators in vacuum: The last twenty years, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. **22**, 3641, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004702.