

# Анализ пробоя электрической изоляции токоведущих шин, используемых для питания катушек тороидального поля в установке ITER

А.П.Лашуков\*, Р.Ш.Еникеев\*, С.А.Ионин\*\*

\*АО НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, \*\*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

## Реферат

Рассматриваются задачи моделирования распределения напряженности электрического поля токоведущих шин, используемых для питания катушек тороидального поля в установке ITER при отсутствии и при наличии в изоляции воздушных включений. Моделирование выполнено в программе ELCUT 6.0. Статья доступна на сайте программы ELCUT, <http://elcut.ru/publications/iter1.pdf>.

## Abstract

Electrical field distribution of the TF bussbars of ITER is considered for the cases of intact insulation and insulation containing air inclusions. Modelling is performed in ELCUT 6.0 software. The paper is available on the ELCUT software website <http://elcut.ru/publications/iter1.pdf>.

## Введение

Для питания катушек тороидального поля (TF) в установке ITER требуются мощные токоведущие шины. Шины будут выполнены из алюминия, а для их охлаждения будет использована деионизированная вода. Шины представляют собой двуполярные прямые или изогнутые отрезки, соединенные друг с другом через жесткие или гибкие медные соединения. Эти соединения обеспечивают компенсацию температурного расширения отрезков шин из-за циклического нагрева.

Проводник шин будет сделан из алюминия марки АД0 ГОСТ 4784-97 со следующими основными характеристиками:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| - плотность                                | 2710 кг/м <sup>3</sup>       |
| - электрическое сопротивление при 20°C     | 2,95 · 10 <sup>-8</sup> Ом·м |
| - коэффициент температурного сопротивления | 0,004 1/°C                   |
| - удельная теплоёмкость                    | 922 Дж/(кг·°C)               |
| - предел прочности, не меньше чем          | 60 МПа                       |
| - коэффициент линейного расширения         | 24 · 10 <sup>-6</sup> 1/°C   |

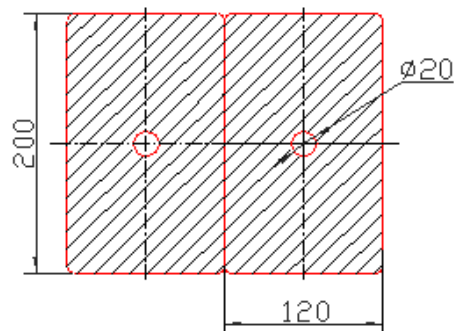


Рис.1. Поперечное сечение шины TF (один полюс)

В системах питания тороидального поля каждая шина имеет внешнюю ленточную изоляцию, разработанную для испытательного напряжения DC не менее 40 кВ. Эта изоляция представляет собой композицию из стекловолокна, слюдяной бумаги и полиэфирной пленки, пропитанной и склеенной вместе с модифицированным эпоксидно-новолаковым связующим веществом. Два слоя стекловолокна с эпоксидным компаундом проложены поверх слоев базовой изоляции, чтобы увеличить механическую прочность изоляции. Изоляция равномерно плотно уложена и запечена в специальной пленке в бойлере с битумом.

Каждая шина TF состоит из двух параллельных проводников в стекловолоконной витковой изоляции, которая делает возможным сформировать данную конструкцию и избежать неконтролируемого перехода тока из одного проводника в другой.

Две отдельные шины, соединенные вместе и покрытые защитной оболочкой, которая состоит из нескольких стекловолоконных слоев и оболочки, формируют двуполярную шину, которая обеспечивает течение тока в двух направлениях.

Двойная шина уложена в тонкую стальную оболочку толщиной 1 мм. Оболочка состоит из двух частей, соединенных друг с другом загибанием кромок/закаткой. Шина зафиксирована в оболочке с помощью стекловолоконных многослойных прокладок, прокладки приклеены к изоляции шины и могут перемещаться относительно оболочки при температурном расширении шины. Неточность в производстве шин и оболочки компенсируется выбором толщины прокладки.

Между шинами разной полярности имеются алюминиевые полосы толщиной 5 мм (заземляющие сепараторы), предназначенные для предотвращения межполюсных коротких замыканий и индикации одиночного пробоя изоляции.

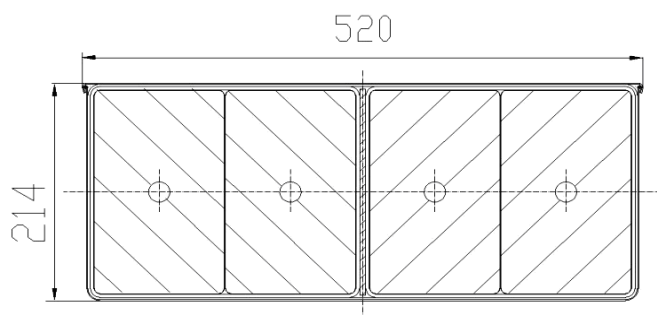


Рис.2. Поперечное сечение двуполярной шины TF

Конструкция шин и их изоляции такова, что обязательным требованием при проектировании является проверка электрической прочности изоляции. Причем интерес представляет также дефектная изоляция (т.е. содержащая воздушные включения). Как известно [2], напряженность электрического поля, при которой происходит пробой воздуха, составляет при нормальных условиях приблизительно 3 кВ/мм. При некоторых дефектах в изоляции, таких как воздушные пузыри, отслоения, напряженность электрического поля внутри этих дефектов может принимать такие значения, при которых начинают происходить частичные разряды, и при которых возможен электрический пробой этих воздушных дефектов.



Рис.3. Токоведущие шины для питания катушек тороидального поля (TF) в установке ITER

Целями настоящей работы являлись:

- 1) Определение областей в изоляции шин, в которых напряженность электрического поля максимальна
- 2) Оценка влияния воздушных включений в изоляции на распределение электрического поля токоведущих шин

### Численное моделирование

Для решения поставленных задач было использовано численное моделирование с помощью метода конечных элементов в программе *Elcut* 6.0.

### Геометрическая модель

Геометрическая модель изолированных токоведущих шин была создана в программе AutoCAD, и затем экспортирована в *Elcut*. Число узлов сетки конечных элементов в каждой из моделей было в районе 365 000 для модели №I, и 740 000 для модели №II (см. Рис.4).

В ходе расчетов рассматривались следующие модели токоведущих шин:

1. Поперечное сечение шин в центральной части (Рис. 4).
2. Поперечное сечение шины в месте расположения выводных концов у края кожуха (Рис. 5).

Были рассмотрены различные варианты расположения воздушных включений внутри изоляции для каждой модели, а также их влияние на распределение напряженности электрического поля. Во всех случаях воздушные включения были расположены рядом с сепаратором.

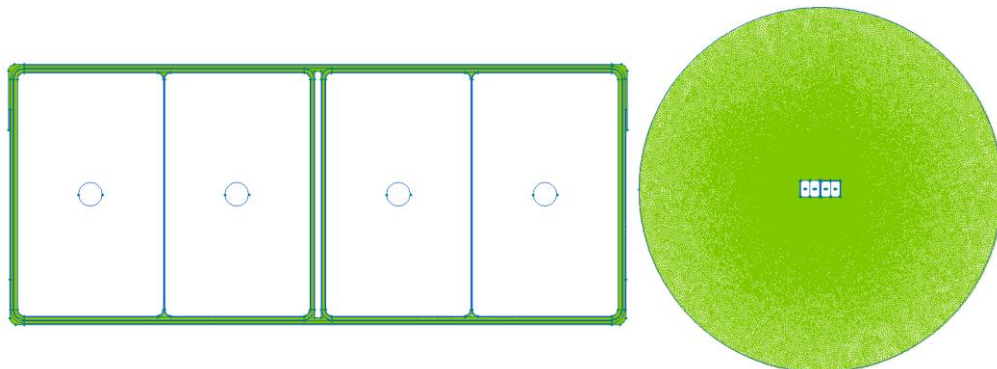


Рис.4. Общий вид токоведущих шин с построенной сеткой конечных элементов (слева - модель № I, справа - модель № II).

В первой геометрической модели (Рис. 4, слева) расчетная область ограничена периметром металлического корпуса, на поверхности которого напряженность поля равна нулю. Во второй модели (Рис. 4, справа) корпус отсутствует, поэтому расчетная область ограничена окружностью достаточно большого радиуса, чтобы избежать искажений картины поля.

Область, в которой напряженность поля будет максимальной, будет находиться в том месте, в котором расстояние между элементами конструкции с разными потенциалами минимально. По этой причине, для более подробного анализа была выбрана область между одной из шин и сепаратором в модели №1.

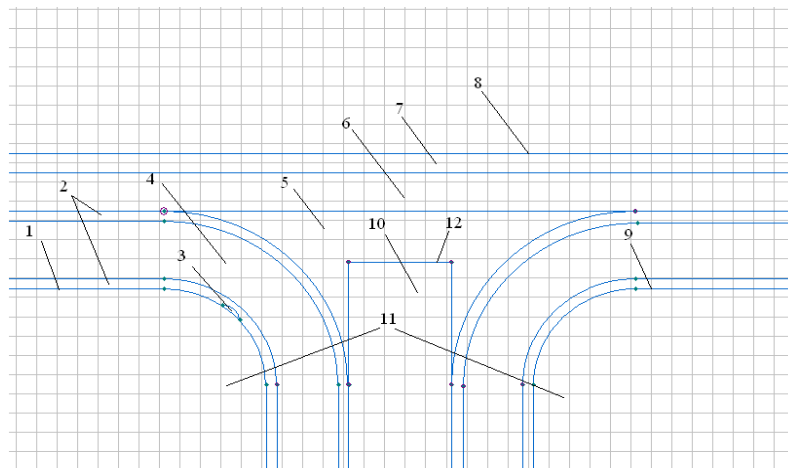


Рис. 5. Модель прямой части поперечного сечения токоведущих шин возле сепаратора. 1, 9 – поверхности алюминиевых шин с заданными потенциалами; 2 – стеклолента; 3 – воздушное включение; 4 – основная изоляция; 5 – эпоксидный компаунд К115; 6 – бандаж; 7 – стеклотекстолит; 8, 12 – поверхности корпуса и сепаратора; 10 – сепаратор; 11 – алюминиевые шины.

### Свойства материалов

Свойства моделируемых материалов приведены в Табл.1.

Табл. 1. Свойства материалов

| Номер на Рис.5 | Элемент                                 | Проницаемость, $\epsilon$ |
|----------------|---|---------------------------|
| 2              | Стеклолента (ЛЭС 0.2x50)                | 3.7                       |
| 3              | Воздушное включение                     | 1                         |
| 4              | Основная изоляция (ЛСМ 0.16x30)         | 4                         |
| 5              | Эпоксидный компаунд К115                | 3.5                       |
| 6              | Бандаж (ЛЭС 0.2x50)                     | 3.7                       |
| 7              | Стеклотекстолит СТЭФ-1-10 ГОСТ 12652-74 | 5                         |
| 10             | Сепаратор                               | -                         |
| 11             | Алюминиевые шины                        | -                         |

## Граничные условия

Граничные условия представлены в Табл. 2. На внешней границе электрический потенциал равен нулю, т.к. за пределами модели поле шин отсутствует. Таким образом, данная задача является к внутренней задаче Дирихле. Потенциал на поверхности сепаратора и корпуса также равен нулю, т.к. эти элементы конструкции будут заземлены. Потенциалы токоведущих шин заданы равными 10 кВ, что соответствует максимально возможному напряжению в номинальном режиме, или 48 кВ в тестовом режиме.

Табл. 2. Граничные условия

| № | Граница                       | Граничные условия          |
|---|-------------------------------|----------------------------|
| 1 | Токоведущие шины              | Потенциал, 48 кВ или 10 кВ |
| 2 | Сепаратор                     | Потенциал, 0 кВ            |
| 3 | Корпус (модель № I)           |                            |
| 4 | Внешняя граница (модель № II) |                            |

## Расчеты распределения напряженности электрического поля

### Модель № I

#### 1) Начальная модель

Задача решается для геометрической модели, показанной на Рис.4 слева. Изоляция считается не содержащей воздушных включений. На Рис.6 показана картина электрического поля вблизи сепаратора и графики распределения напряженности электрического поля вдоль горизонтальных линий на картине поля при напряжении 10 кВ.

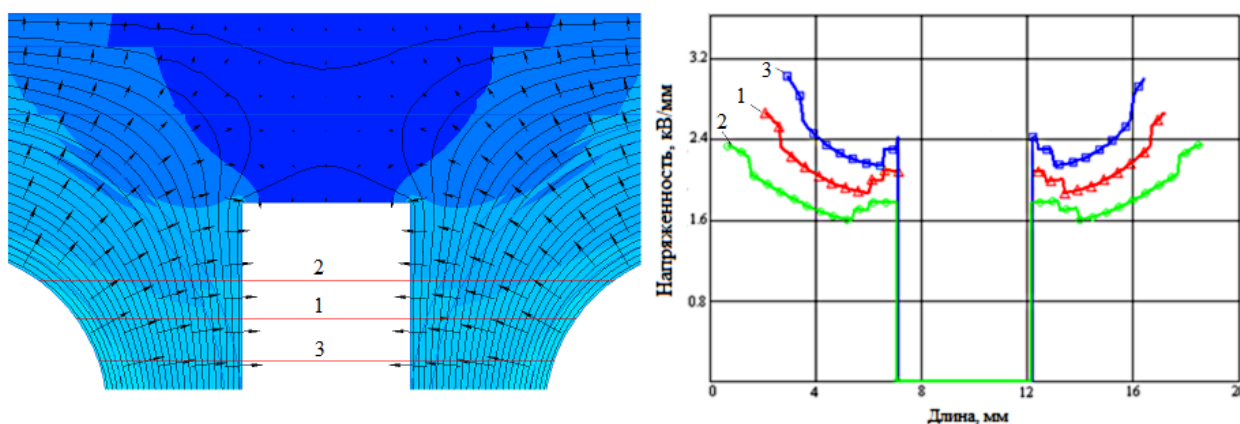


Рис.6. Слева: распределение напряженности электрического поля токоведущих шин вблизи сепаратора. Горизонтальные линии соответствуют линиям, вдоль которых построены графики распределения электрического поля. Справа: графики распределения напряженности электрического поля ( $U = 10$  кВ) вдоль линий на картине поля: 1 – центральная линия; 2 – верхняя линия; 3 – нижняя линия.

[http://elcut.ru/advanced/iter\\_tf\\_bussbars\\_1.html](http://elcut.ru/advanced/iter_tf_bussbars_1.html)

При напряжении 10 кВ максимальное значение напряженности электрического поля внутри изоляции составляет 3 кВ/мм (Рис.6, справа, кривая 3). Это значительно меньше, чем пробивное значение напряженности для данного типа изоляции, которое составляет 35 кВ/мм. Максимальное значение напряженности поля при напряжении 48 кВ составило 15 кВ/мм.

#### 2) Исходная расчетная модель с воздухом вместо компаунда

При разборке и исследовании макетного образца шины PF, технология нанесения изоляции которой соответствовала технологии для шины TF, были обнаружены пустоты

незаполненные компаундом (Рис. 7), которые могут повлиять на картину распределения поля в шине. Для исследования влияния пустот между шиной и сепаратором была рассмотрена модель (Рис. 4, слева), в которой вместо свойств компаунда задавались параметры воздуха.

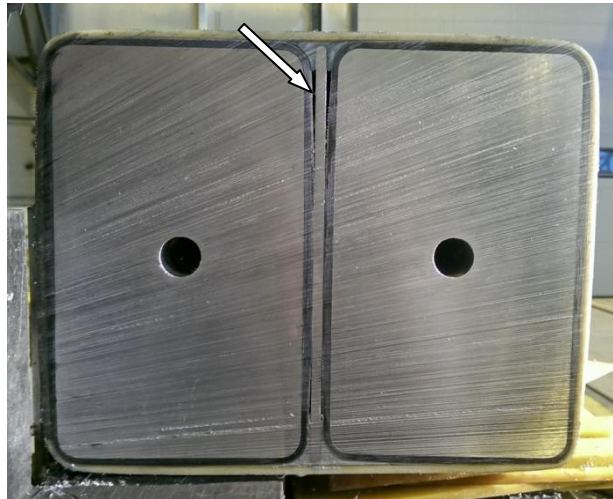


Рис. 7. Поперечное сечение шин для питания катушек тороидального поля.

В этом случае максимальное значение напряженности электрического поля при напряжении 10 кВ составило приблизительно 7 кВ/мм. График распределения напряженности был построен аналогично графикам на Рис. 8.

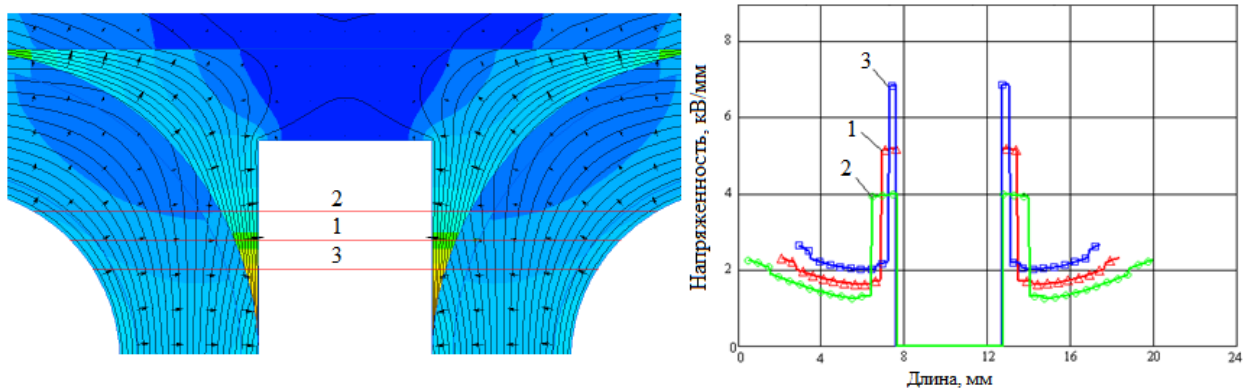


Рис.8. Картина и графики распределения напряженности электрического поля ( $U = 10$  кВ) вдоль линий: 1 – центральная линия; 2 – верхняя линия; 3 – нижняя линия.

[http://elcut.ru/advanced/iter\\_tf\\_bussbars\\_2.html](http://elcut.ru/advanced/iter_tf_bussbars_2.html)

Из полученных картин распределения электростатического поля видно, что наличие воздуха в месте заливки компаунда приводит к снижению напряженности электрического поля внутри изоляции и к появлению значительных величин напряженности поля ( $\sim 7$  кВ/мм при приложенных 10 кВ) на воздушном промежутке (Рис. 8, кривая 3). В этом промежутке будут происходить частичные разряды.

### 3) Расчетная модель с воздушными включениями в изоляции

В исходную геометрическую модель было добавлено воздушное включение. Размер, форма и положение включения менялись. В моделях использовалось напряжение на шинах 48 и 10 кВ постоянного тока.



### 3.1) Воздушное включение между шиной и изоляцией

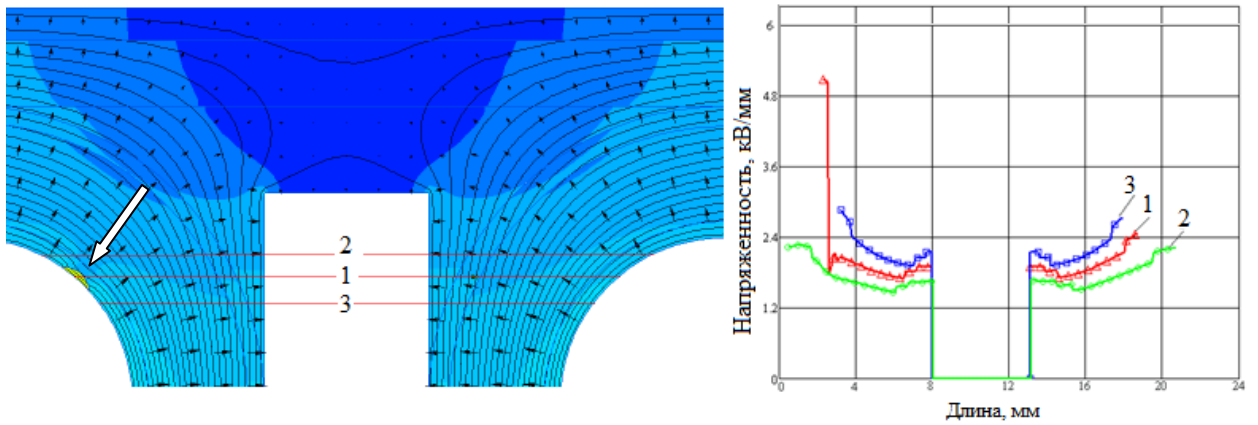


Рис.9. Картина и графики распределения напряженности электрического поля ( $U = 10$  кВ) вдоль линий: 1 – центральная линия; 2 – верхняя линия; 3 – нижняя линия.

[http://elcut.ru/advanced/iter\\_tf\\_bussbars\\_3.html](http://elcut.ru/advanced/iter_tf_bussbars_3.html)

### 3.2) Воздушное включение между изоляцией и стеклолотой

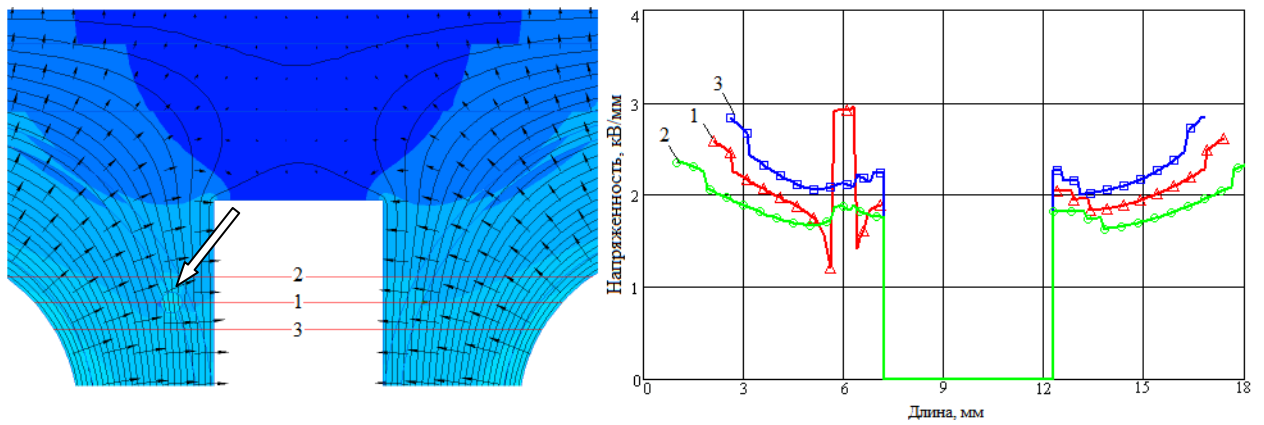


Рис.10. Картина и графики распределения напряженности электрического поля ( $U = 10$  кВ) вдоль линий: 1 – центральная линия; 2 – верхняя линия; 3 – нижняя линия.

[http://elcut.ru/advanced/iter\\_tf\\_bussbars\\_4.html](http://elcut.ru/advanced/iter_tf_bussbars_4.html)

### 3.3) Воздушное включение внутри основной изоляции

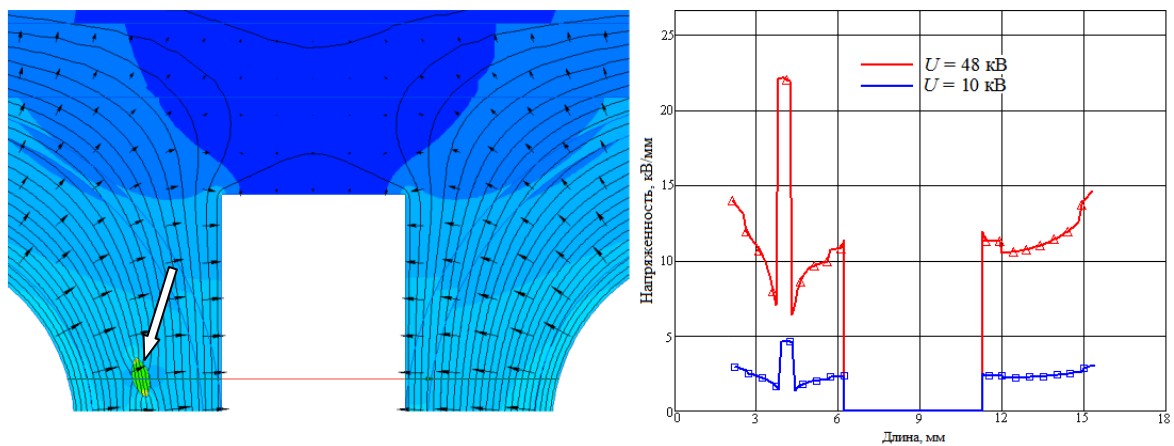


Рис.11. Картина и графики распределения напряженности электрического поля, 1:  $U = 48$  кВ; 2:  $U = 10$  кВ.

[http://elcut.ru/advanced/iter\\_tf\\_bussbars\\_5.html](http://elcut.ru/advanced/iter_tf_bussbars_5.html)

Наличие воздушного включения внутри изоляции приводит к увеличению напряженности электрического поля в месте его появления и снижению поля в его окрестности. Напряженность поля внутри дефекта может существенно превышать напряженность поля в окружающей его изоляции, однако не может быть больше величины  $1.5E_{из}$ . Величины напряженности поля в воздушном включении для задач, соответствующих модели №1 несколько превышают величину  $1.5E_{из}$ , что связано с двумерностью рассмотренной модели, в которой не учтен объем воздушного включения.

## Модель № II

### 1) Исходная модель

Модель показана на Рис.4. В данном случае воздушные включения в изоляции отсутствуют. На Рис. 13 показаны картина поля и график распределения напряженности электрического поля в той области, в которой произошел пробой изоляции.



Рис.12. Область, в которой произошел пробой

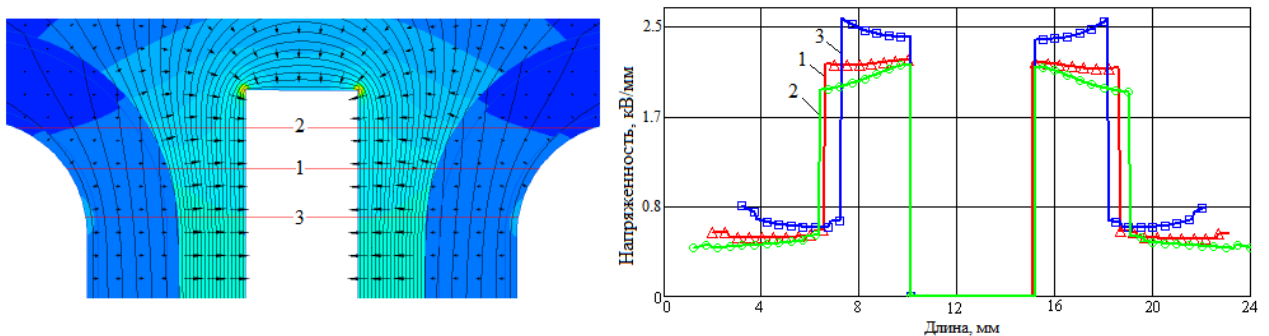


Рис.13. Картина и графики распределения напряженности электрического поля ( $U = 10$  кВ) вдоль линий: 1 – центральная линия; 2 – верхняя линия; 3 – нижняя линия.

[http://elcut.ru/advanced/iter\\_tf\\_bussbars\\_6.html](http://elcut.ru/advanced/iter_tf_bussbars_6.html)

В данной модели расстояние между элементами конструкции с разными потенциалами было больше, чем в модели на Рис.4, в результате чего напряженность поля внутри изоляции уменьшилась до 1 кВ/мм (при напряжении 10 кВ). Напряженность поля в воздушном зазоре между изоляцией шин и сепаратором увеличилась до 3 кВ/мм. Полученные значения напряженности меньше соответствующих значений, полученных ранее для модели I.



## 2) Воздушное включение внутри основной изоляции

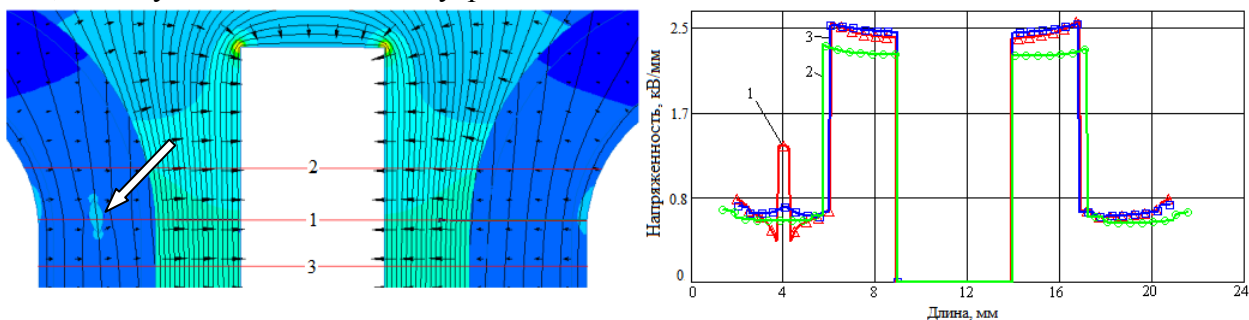


Рис.14. Картина и графики распределения напряженности электрического поля ( $U = 10$  кВ) вдоль линий: 1 – центральная линия; 2 – верхняя линия; 3 – нижняя линия.

[http://elcut.ru/advanced/iter\\_tf\\_bussbars\\_7.html](http://elcut.ru/advanced/iter_tf_bussbars_7.html)

### Заключение

Выполненный анализ распределения электрического поля в шинах ТФ показал, что:

1. Область с наибольшей напряженностью электрического поля внутри изоляции расположена на прямолинейном участке шины в месте прилегания сепаратора к высоковольтной изоляции токоведущих частей шины. Показано, что в этой области напряженность электрического поля может достигать величины  $\sim 3.2$  кВ/мм при напряжении между сепаратором и шиной 10 кВ.

2. Долговечность изоляции, вычисленная по эмпирической зависимости [4] с учетом максимальной напряженности поля внутри изоляции, соответствует требованиям ИТЭР, предъявляемым к сроку службы шин, который составляет не менее 20 лет.

3. Во всех расчетных моделях, в том числе и в моделях с максимальным приложенным напряжением 48 кВ, напряженность поля внутри изоляции была существенно меньше пробивной напряженности для указанного типа изоляции (35 кВ/мм).

4. Уровень напряженности электрического поля внутри воздушных включений может превышать величину пробивной напряженности воздуха, что может вызвать появление частичных разрядов.

### Список литературы

[1] ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые.

[2] Техника высоких напряжений : учеб. пособие для вузов / И. М. Богатенков [и др.]; под общ. ред. Г. С. Кучинского.— СПб. : Изд-во ПЭИПК, 1998 .— 699 с.

[3] ELCUT 6.0 Руководство пользователя, ООО ТОР, Санкт-Петербург, 2013

[4] Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах/ под общ. редакцией В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

### Об авторах

1. Лашуков Александр Павлович, инженер-исследователь, АО НИИЭФА, закончил Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения, факультет систем управления, кафедра технической физики, электромеханики и робототехники в 2014 г. Адрес электронной почты: [lashukov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:lashukov@sintez.niiefa.spb.su), телефон: (812) 462-76-36

2. Еникеев Рустам Шамильевич, начальник лаборатории АО НИИЭФА, закончил Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения, факультет систем управления, кафедра технической физики, электромеханики и робототехники в 2006 г. Кандидат технических наук, защитил диссертацию по специальности: “Электрофизика и электрофизические аппараты”, на тему: “Переходные процессы в емкостных накопителях энергии с полупроводниковыми коммутаторами”, ученый совет НИИЭФА, 2011 г. Адрес электронной почты: enikeev@sintez.niiefa.spb.su, телефон: (812) 462-79-88

3. Ионин Сергей Алексеевич, студент Санкт-Петербургского Политехнического университета, Института Энергетики и Транспортных систем, кафедра Теоретические основы электротехники, 6 курс. Адрес электронной почты: ionin@elcut.ru, телефон: (812) 552-75-72.

#### About the authors

1. Aleksandr Lashukov, research engineer at JSC “D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus”, graduated from the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, faculty of control system, department of technical physics, electromechanics and robotics, 2014, E-mail: lashukov@sintez.niiefa.spb.su, tel. +7(812) 462-76-36

2. Rustam Enikeev, head of laboratory at JSC “D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus”, graduated from the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, faculty of control system, department of technical physics, electromechanics and robotics, 2006. PhD, Electrophysics and electrical devices, 2011. E-mail: enikeev@sintez.niiefa.spb.su, tel. +7(812) 462-79-88

3. Sergey Ionin, master student of Saint-Petersburg Polytechnic University, Institute of Power Engineering and Transportation, department of Theoretical Electrical Engineering. E-mail: ionin@elcut.ru, tel. +7 (812) 552-75-72.