

DOI: 10.18721/JEST.26101
УДК 621.3

Д.А. Селезнёв, Г.В. Грешняков

НИИ «Севкабель», Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНОГО ПРИНЦИПА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ МУФТ НА 110 КВ

В статье речь идет о применении в качестве усиливающей изоляции муфт на 110 кВ трубки-регулятора (многофункциональный элемент), работа которого основана на использовании в качестве элементов, выравнивающих поле, термоусаживаемых трубок со специальными свойствами. В этой работе рассматриваются ключевые особенности моделирования конструкции трубки-регулятора и ее оптимизации, выполненной в виде совокупности нескольких термоусаживаемых трубок с заданными параметрами. Оптимизация конструкции и анализ ее работоспособности проводился в специализированном программном комплексе ELCUT Professional. В ходе работы был найден общий оптимальный вид конструкции, параметры каждого отдельного элемента трубки-регулятора. Так же были найдены наиболее уязвимые зоны, в которых значение напряженности электрического поля достигает наиболее высоких значений. Даны рекомендации по устройству конструкции для получения лучшей из возможной картины распределения электрического поля в кабельной разделке.

Ключевые слова: трубка-регулятор, кабельная муфта, компьютерное-моделирование, резистивно-емкостной метод, ELCUT.

Ссылка при цитировании:

Селезнёв Д.А., Грешняков Г.В. Применение резистивно-емкостного принципа регулирования электрического поля кабельных муфт на 110 кВ // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 5–14. DOI: 10.18721/JEST.26101

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

D.A. Seleznev, G.V. Greshnyakov

Research institute «Sevkabel», St. Petersburg, Russia

APPLICATION OF THE RESISTIVE-CAPACITIVE PRINCIPLE OF REGULATING THE ELECTRIC FIELD OF CABLE COUPLINGS FOR 110 KV

The article deals with the use of a tube-regulator (multifunctional element) as reinforcing insulation for 110 kV couplings, the operation of which is based on the use of heat-shrinkable tubes with special properties as elements that leveling the field. In this paper, we consider the key features of modeling the design of the tube-regulator and its optimization, made in the form of a combination of several heat-shrinkable tubes with specified parameters. Optimization of the design and analysis of its performance was carried out in a specialized software package ELCUT Professional. In the course of the work, a general optimal view of the structure and the parameters of each individual element of the tube-regulator were found. The most vulnerable zones were also found in which the electric field strength reaches the highest values. Recommendations are given on the arrangement of the structure to obtain the best possible picture of the distribution of the electric field in cable cutting.

Keywords: tube-regulator, cable coupling, computer simulation, resistive-capacitive method, reinforcing insulation, ELCUT.

Citation:

D.A. Seleznev, G.V. Greshnyakov, Application of the resistive-capacitive principle of regulating the electric field of cable couplings for 110 kV, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 5–14. DOI: 10.18721/JEST.26101

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Постоянное развитие в энергетике неразрывно связано с развитием технологий по передаче электроэнергии потребителям на расстоянии. Кабельная линия – это объект, который служит для передачи электрической энергии. Сейчас, с постоянно растущим населением в городах, а, следовательно, и уплотнения застройки, требуется прокладка, которая максимально снижала бы границы отчужденной зоны. С этой задачей бесспорно лучше всего справляются кабельные линии, которые прокладываются под землей [10, 11]. Неотъемлемой частью кабельной линии является кабельная муфта. Из-за того, что требуется передавать энергию на значительные расстояния, а стандартные строительные длины кабелей, которые выходят с предприятий чаще всего составляют 250–300 м, то практически в любой линии будет присутствовать соединительная муфта.

По результатам анализа аварийных ситуаций на кабельных линиях, можно сказать, что значительная часть аварий происходит в местах соединения кабельных отрезков. Это связано с тем, что в местах разделки происходит нарушение конструкции кабеля [13]. В результате чего, появляется касательная (тангенциальная) составляющая электрического поля, которая оказывает наиболее негативный эффект в работу муфт.

Надежность и срок службы муфт напрямую зависит от совершенства их конструкции [15]. Вопросам по анализу электрических полей в усиливающей изоляции посвящено значительное число работ [14]. В [5] на основе анализа электрического поля в кабельных разделках кабеля из бумажно-пропитанной изоляции, показана методология создания усиливающей изоляции концевых муфт. В [6] распределение электрического поля в соединительной муфте, которая может применяться для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, исследуется

при помощи интегральных уравнений. В результате этой работы была получена эмпирическая формула для расчета касательной составляющей напряженности электрического поля между основной изоляцией кабеля и усиливающей изоляции муфты. Так же ранее авторами был проведен тщательный анализ стресс-конуса соединительной муфты на 110 кВ, с определением всех критических зон в конструкции [3], значение напряженности поля в которых, после проведения полной оптимизации геометрических и физических параметров, достигло минимальных значений [1, 7].

Цель настоящей работы – подтвердить возможность замены существующих сейчас стресс-конусов, работающих на принципе емкостного снижения неравномерности поля [9], термоусаживаемой трубкой-регулятором. Получить на базе моделирования оптимальную конструкцию многофункционального элемента. Рассматриваемый критерий – минимальное значение напряженности электрического поля (его касательной составляющей, которая не должна превышать значение в 5 кВ/мм) в выделенных критических зонах.

Методология исследования

Значение потенциала жилы задавалось равным амплитудному значению фазного напряжения, потенциал экрана принимался равным нулю. Полупроводящая вставка нашего многофункционального элемента электрически соединена с заземлённым экраном кабеля, выполняющая функцию восстановления «обрезанного» экрана. По предложенному алгоритму решалась задача расчета электрического поля переменного тока. Учитывая синусоидальность поля во времени, уравнения ниже записаны относительно комплексных величин (электрического потенциала U , вектора плотности тока j , напряженности электрического поля E) [4].

Формулировка задачи для численного решения основана на уравнении Пуассона, описывающего электростатическое поле:

А также на уравнении растекания токов в проводящей среде:

При учете закона Ома:

Тогда уравнение для потенциала U приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot (\varepsilon \cdot \mathbf{E}) &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{j} &= 0 \\ \mathbf{j} &= \nu \cdot \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\nabla \cdot \left(\left[\varepsilon - \frac{i\gamma}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0$$

Используя связь $\mathbf{E} = -gradU$ можно рассчитать значения напряжённости электрического поля в любой точке модели.

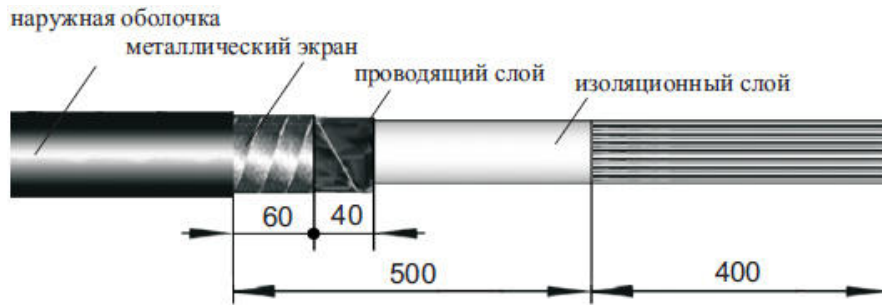


Рис. 1. схематическое изображение разделки кабеля из СПЭ изоляции
Fig. 1. Schematic picture of a cable handling from SPE insulation

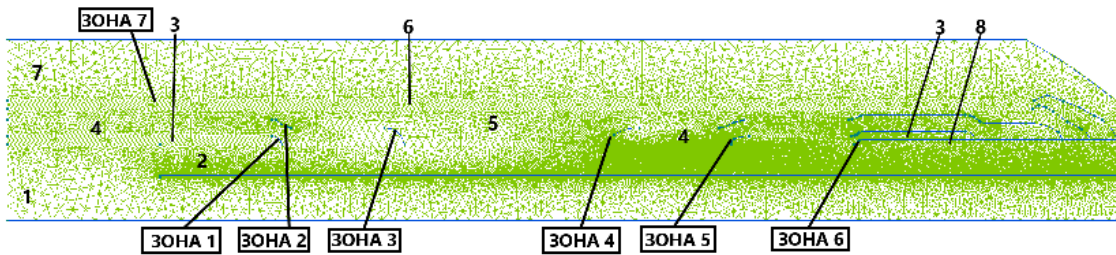


Рис. 2. Предварительная конструкция трубки-регулятора с критическими зонами: 1 – Токосоводящая жила с соединительной гильзой; 2 – Основная изоляция кабеля; 3 – Первый слой многофункционального элемента над гильзой и над полупроводящим экраном по изоляции (полупроводящая вставка или п/пВ); 4 – Второй слой многофункционального элемента с высоким значением диэлектрической проницаемости (диэлектрический экран или ДЭ); 5 – Подмотка; 6 – Третий слой (большой ДЭ); 7 – Верхний изоляционный слой

Fig. 2. Preliminary design of the tube-regulator with critical zones: 1 – Conductor lead with a connecting sleeve; 2 – Main cable insulation; 3 – The first layer of the multifunctional element above the sleeve and above the semiconducting screen for insulation (semiconducting insert or s/cI); 4 – The second layer of a multifunctional element with a high dielectric constant (dielectric screen or DS); 5 – Winding; 6 – Third layer (large DS); 7 – Top insulation layer

Первое уравнение описывает электростатику, где E напряженность потенциального поля, источником которого являются заряды с плотностью ρ .

Решения выше перечисленных уравнений проводятся при помощи метода конечных элементов (МКЭ), на котором основана программа ELCUT¹.

Начальная теория. Проведя анализ разделки высоковольтного кабеля из СПЭ изоляции [12] (см. рис. 1), была построена первоначальная модель трубки-регулятора (см. рис. 2).

В этой модели было изначально известно, что первый слой, который укладывается на срез экранов по изоляции и на соединительную гильзу, должен иметь полупроводящие свойства, для того чтобы «оттягивать» силовые линии от углов гильзы и от среза экранов, используя резистивный способ регулирования поля[8,

¹ ELCUT 6.3. Руководство пользователя. ООО «ТОР». СПб., 2018.

13]. Поверх полупроводящего элемента (вставки) необходимо усадить материал с высоким значением диэлектрической проницаемости, для выравнивания линий напряженности поля при помощи рефракционного метода. Так же можно было сказать, что необходимо, после усадки «3» и «4», выровнять геометрию нашей конструкции, для дальнейшего центрированного наложения последующих слоев. Поэтому элементом «5» является подмотка, которая должна выполнить эту функцию.

После проведения нескольких этапов моделирования, так же были выделены наиболее уязвимые критические области (зоны), в которых значение напряженности достигает максимального значения (см.рис.2).

Этапы моделирования. После определения состава трубки-регулятора и определения всех критических зон в модели, были поставлены пошаговые этапы оптимизации первоначальной конструкции многофункционального элемента:

1. Длина полупроводящей вставки;
2. Разность длин полупроводящей вставки (п/пВ) и диэлектрического экрана (ДЭ);

3. Толщина п/пВ;
4. Толщина ДЭ;
5. Толщина подмотки над ДЭ;
6. Толщина верхнего изоляционного слоя;
7. Толщина большого ДЭ.
8. Расстояние м/у диэлектрическими экранами (усаженными над гильзой и над п/п экраном по изоляции);
9. Диэлектрическая проницаемость п/пВ (в случае, если убрать полупроводящий слой);
10. Диэлектрическая проницаемость ДЭ;
11. Значение электропроводности п/пВ.

Ранее, при исследовании стресс-конуса, нами было обнаружено, что при использовании соединительной гильзы длиной 150 мм или 160 мм, нет разницы в распределении электрического поля в усиливающей изоляции муфт [1], поэтому в данном моделировании была использована гильза длина 150 мм.

Исследование зависимости напряженности электрического поля от длины полупроводящей вставки над гильзой в зоне 1 и от длины полупроводящей вставки над экраном по изоляции в зоне 5 (как со стороны усиливающей изоляции (ус.из), так и со стороны основной изоляции кабеля).

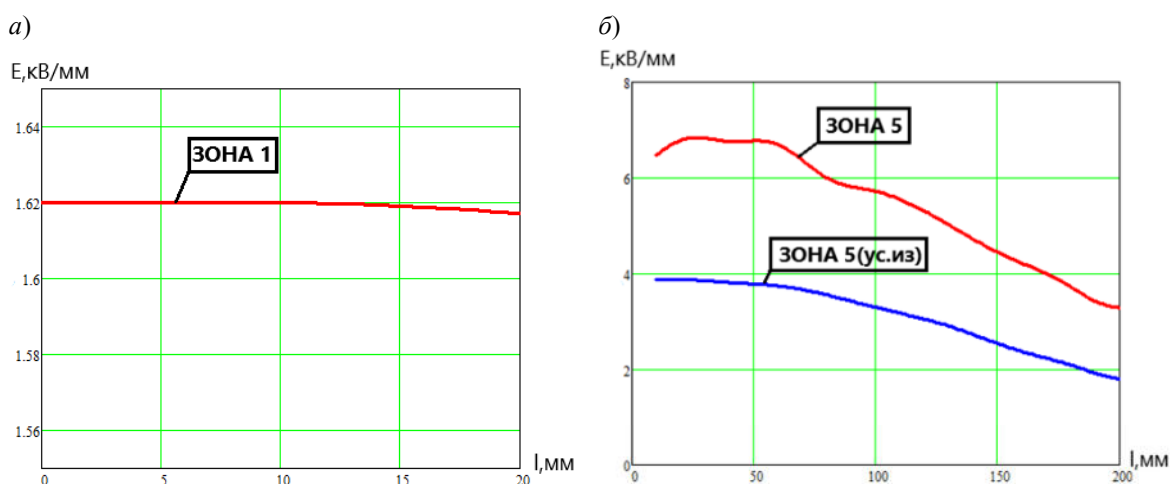


Рис. 3. Графики зависимости напряжённости электрического поля: а) от края соединительной гильзы до края п/пВ над ней; б) от среза полупроводящего экрана по изоляции до края п/пВ над экраном

Fig. 3. Graphs of the dependence of the electric field: а) from the edge of the connecting sleeve to the edge s/cI above it; б) from the cut of the semiconducting screen for insulation to the edge of the s/cI above the screen

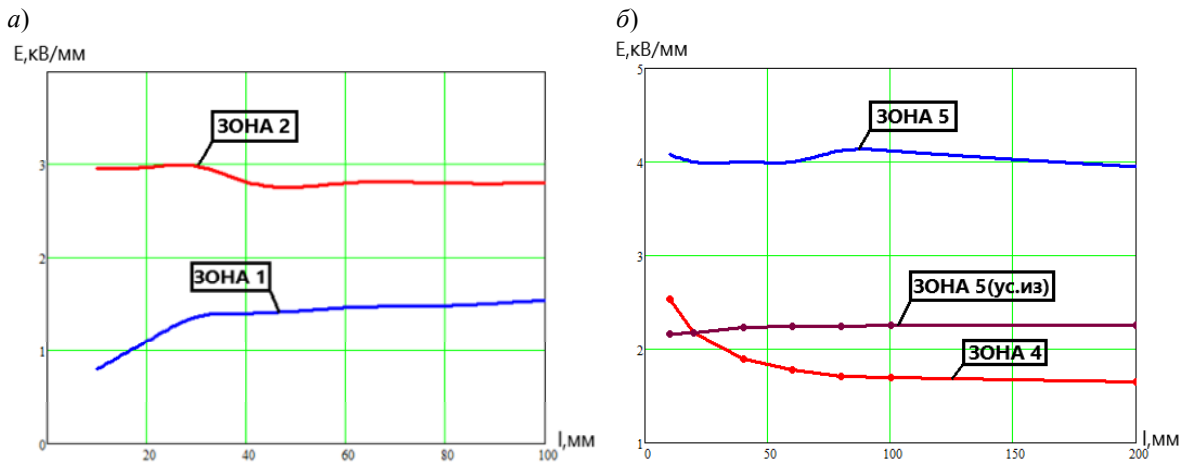


Рис. 4. Графики зависимостей напряженности электрического поля от расстояния между краем п/пВ и краем ДЭ: а) над гильзой, б) над срезом п/п экрана по изоляции

Fig. 4. Graphs of the dependence of the electric field on the distance between the edge of the s/cI and the edge of the DS: а) above the sleeve, б) above the cut of the s/c of the screen for insulation

На первом этапе были рассмотрены зависимости напряженности поля от длин п/пВ, которая заступает за край гильзы и п/п экрана по изоляции. В этом расчете было принято допущение, что все остальные элементы изоляционные, без специальных свойств. В результате получили графики, указанные на рис. 3, а, б. Из этих графиков можно выделить следующее: во-первых, значение E у гильзы изначально не превышает допустимых значений (5 кВ/мм – касательная составляющая), поэтому не имеет смысла делать её слишком длинной, иначе габариты конструкции значительно увеличатся; во-вторых, значения напряженности поля в зоне 5 значительно меняется с изменением длины, но в связи с нежеланием сильно увеличивать габариты муфты, была выбрана величина равная 120 мм.

Исследование зависимости напряженности электрического поля от расстояния между краем п/пВ и ДЭ над гильзой в зонах 1, 2 (а) и над п/п экраном по изоляции в зонах 4, 5 (б).

Проведя анализ двух полученных графиков (см.рис. 4, а, б) можно сказать, что оптимальным расстоянием между краем п/пВ и

ДЭ в обоих случаях будет равно примерно 55 мм. Так как дальнейшее увеличение в первом случае ведёт к увеличению напряженности поля в зоне 1, при этом значение в зоне 2 не уменьшается. Во втором случае снижение в зоне 4 достигло своего пика, и дальнейшее увеличение расстояние не приводит к значительным изменениям E в рассмотренных областях.

Исследование толщины полупроводящих вставок и диэлектрических экранов

При исследовании толщин п/пВ и ДЭ (см. рис. 5 а, б) было принято допущение, что изменения над гильзой и над срезом полупроводящего экрана по изоляции будут проходить идентично, поэтому на данных графиках показаны зоны только над гильзой.

При увеличении толщины полупроводящей вставки значение напряженности поля в зоне 1 уменьшается, но при этом даже при значении в 5 мм оно не превышает допустимого значения, поэтому было принято значение в 5 мм.

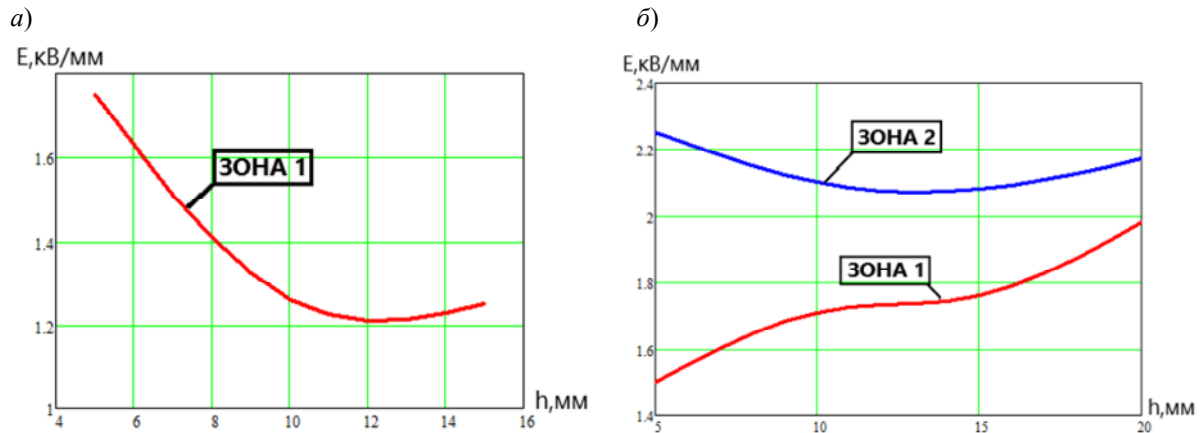


Рис. 5. Графики зависимостей: а) напряженности электрического поля в зоне 1 от толщины п/пВ; б) напряжённости электрического поля в зонах 1,2 от толщины ДЭ

Fig. 5. Dependence graphs: а) electric field strength in zone 1 on thickness of s/cI; б) electric field strength in zones 1 and 2 on thickness of DS

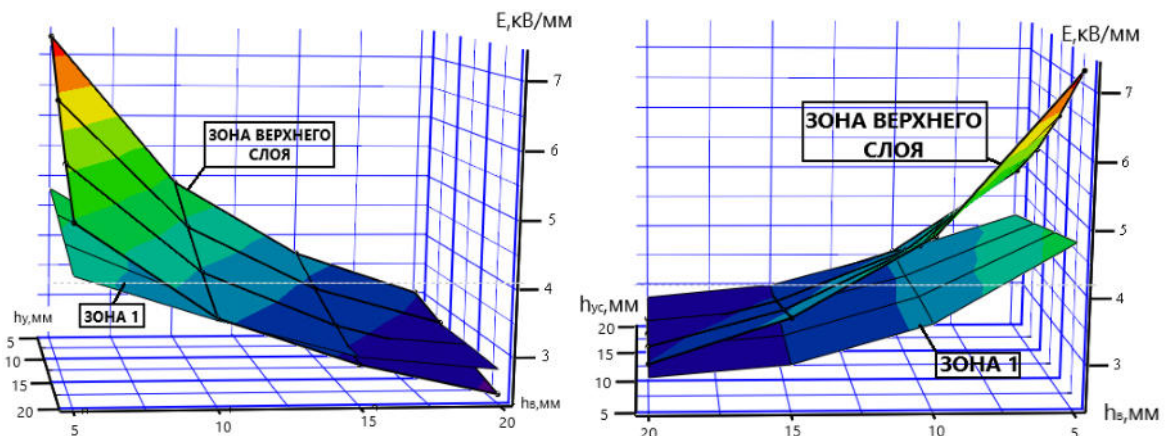


Рис. 6. Графики зависимостей напряженности электрического поля в зоне 1 и в зоне верхнего слоя (зона 7) от толщин большого ДЭ и верхнего изоляционного слоя

Fig. 6. Graphs of the dependences of the electric field in zone 1 and in the zone of the upper layer (zone 7) on the thicknesses of the large DS and the upper insulating layer

При анализе графиков зависимости E от толщины диэлектрических экранов можно сказать, что значительная толщина негативно сказывается на общей картине распределения напряженности электрического поля. Поэтому значение толщины было выбрано 12 мм.

Исследование толщин большого ДЭ и верхнего изоляционного слоя

На этом этапе проводилось исследование зависимости сразу от двух параметров. В ре-

зультате был получен график зависимости напряженности электрического поля от толщины большого ДЭ и от толщины верхнего изоляционного слоя (см.рис.6) в зоне 7 (таблица 1) и зоне 1 (таблица 2).

Можно сказать, что при увеличении обеих величин происходит снижение напряженности электрического поля как в зоне й, так и в зоне 7. В результате, было выбрано значение толщины большого диэлектрического экрана 15 мм, а толщина верхнего изоляционного слоя – 20 мм.

Таблица 1

Значения E в зоне 7

Table 1

E values in zone 7

		Толщина верхнего слоя, мм			
		5	10	15	20
Толщина ДЭ, мм	5	7,3	4,9	3,9	3,02
	10	6,4	4,4	3,4	2,83
	15	5,6	3,96	3,13	2,6
	20	4,96	3,58	2,89	2,43

Таблица 2

Значения E в зоне 1

Table 2

E values in zone 1

		Толщина верхнего слоя, мм			
		5	10	15	20
Толщина ДЭ, мм	5	4,8	3,6	3,0	2,82
	10	4,6	3,6	3,08	2,82
	15	4,4	3,54	3,06	2,82
	20	4,2	3,55	3,05	2,8

Исследование зависимости напряженности электрического поля в критических зонах от диэлектрической проницаемости диэлектрических экранов

В ходе исследования так же была получена зависимость напряженности поля от величины диэлектрической проницаемости ДЭ во всех зонах, на которые изменения исследуемой величины оказывает наибольший эффект (см. рис. 7)

Можно сказать, что оптимальный диапазон диэлектрической проницаемости лежит в пределах от 10 до 12. Так как при дальнейшем увеличении уже не происходит резкого снижения напряженности в критических зонах, а в зонах 7 и 2 – есть стабильное увеличение. Тем более вероятность разработать материал снижается с тем, чем выше будет значение ϵ .

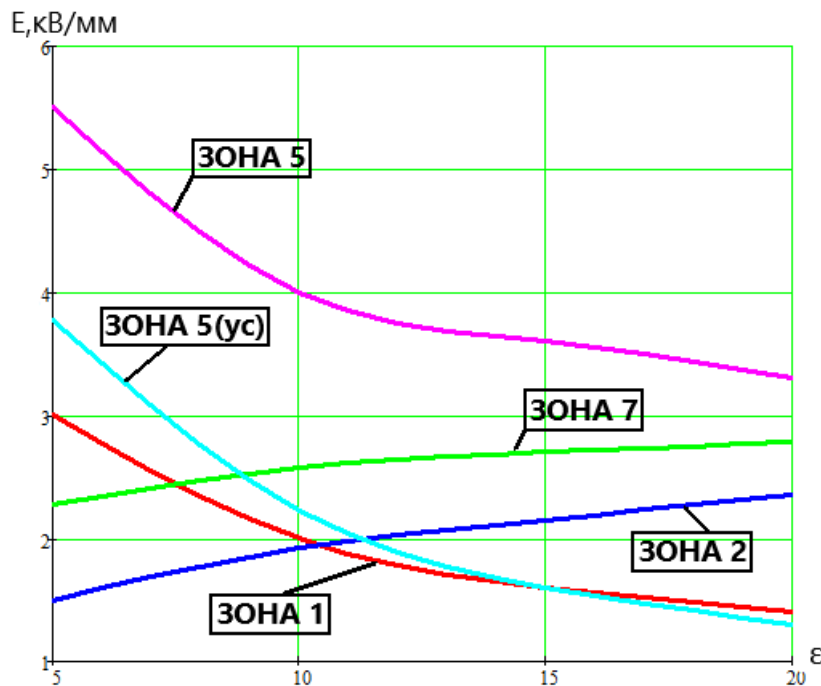


Рис. 7. Графики зависимостей напряженности электрического поля от диэлектрической проницаемости ДЭ

Fig. 7. Graphs of the dependence of the electric field on the dielectric constant of the DS

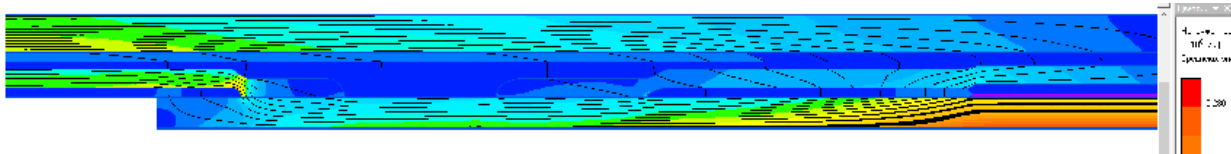


Рис. 8. Картина распределения напряженности электрического поля в трубке-регуляторе
 Fig. 8. The picture of the distribution of electric field strength in the tube-regulator

Таблица 3

Значения напряженности электрического поля во всех критических зонах

Table 3

Electric field strengths in all critical areas

Зоны	1	2	3	4	5	6	7
E_{Σ} , кВ/мм	3.57	0.10	1.51	1.74	1.37/2.71	3.64	2.60
E_{τ} , кВ/мм	3.27	0.04	1.50	1.72	0.07/2.62	3.62	2.60

Так же хотелось бы отметить, что ранее, в предыдущих исследованиях стресс-конуса, было проведено исследование напряженности поля от электропроводности высоковольтного электрода, что по аналогии можно отнести к зависимости от электропроводности п/пВ, поэтому было поставлено значение $\gamma = 0.002$ См/м [1].

В результате проведенной работы, была получена следующая картина распределения силовых линий в усиливающей изоляции кабельной муфты типа трубка-регулятор (см. рис. 8).

И соответственно значения касательной и суммарной составляющих во всех критических зонах (табл. 3)

Как видно из полученных значений, напряженность поля в конструкции не превышает допустимого значения (5 кВ/мм), что говорит о работоспособности данной модели.

Итоги проведенного исследования

- Предложена предварительная конструкция многофункционального элемента;
- На примере соединительной муфты кабеля на 110 кВ, определены параметры, кото-

рые необходимо оптимизировать и критические зоны на значения напряженностей, в которых ориентировались при моделировании;

- Проведено компьютерное моделирование многофункционального элемента, в результате чего были получены оптимальные геометрические и физические параметры элементов конструкции трубки-регулятора;

- Получена итоговая предварительная конструкция многофункционального элемента, в которой максимальное значение напряженности электрического поля не превышает допустимого значения касательной составляющей электрического поля;

- Был разработан патент на полезную модель [2]

Данное исследование подтверждает возможность создания усиливающей изоляции муфты с применением нового комбинированного резистивно-емкостного метода выравнивания электрического поля. При полученных результатах, максимальное значение тангенциальной составляющей поля в трубке составляет 3.62 кВ/мм в зоне 6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А., Коровкин Н.В. Регулирование электрического поля в усиливающей изоляции соединительных кабельных муфт на

напряжение 110 кВ Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 24, № 4. С. 116–125. DOI: 10.5862/JEST.254.13



[2] Патент на полезную модель № 184107 «Соединительная муфта для силового кабеля». Авторы: Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А., Ковалёв Г.Г. Зарегистрирован в государственном реестре полезных моделей 16 октября 2018 г. Срок действия патента истекает 15 июня 2028 года.

[3] **Seleznev D.A., Obratsov N.V., Kiesewetter D.V.** Numerical Simulation of the High-Voltage Cable Sleeve Operation for 110 kV // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2018.

[4] **Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В.** Теоретические основы электротехники. В 2 т. СПб.: Питер, 2009.

[5] **Шварцман Л.Г.** Регулирование электрического поля в концевых муфтах кабелей высокого напряжения // Труды ВНИИКП. 1969. №13. С. 11–33.

[6] **Велугаев С.С., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Фурсов П.В.** Электрическое поле в соединительных муфтах с эластомерной изоляцией на напряжение 110 кВ // Кабели и провода. 2004. № 1. С. 15–18.

[7] **Котов Р.В.** Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки // Электро. 2006. № 5. С. 40–44.

[8] **Christen T., Donzel L., Greuter F.** Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation // IEEE Electr. Insul. Mag. 2011. Vol. 27, no. 2. P. 18–28.

[9] **Кучерявая И.Н.** Электрическое поле в кабельных муфтах при различных способах его выравнивания и при наличии дефектов в элементах // Теоретична електротехніка. 2016. С. 111–118

[10] Кабели и провода / под ред. И.Б. Пешкова. Основы кабельной техники. М.: Энергоатомиздат, 2009. 470 с.

[11] **Хакимуллин Б.Р., Багаутдинов И.З.** Преимущества силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Инновационная наука: [международ. науч. журнал]. 2016. № 4. С. 198–200.

[12] **Ларина Э.Т.** Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М., 1996.

[13] **Lise Donzel, Felix Greuter, Thomas Christen.** Nonlinear resistive electric field grading part 2: Materials and Applications // IEEE Electr. Insul. Mag. 2011. Vol. 26, no. 6. P. 48–60.

[14] **Таджибаев А.И., Канискин В.А., Костенко Э.М.** Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации // Электричество. 1995. № 5. С. 19–23.

[15] **Канискин В.А., Таджибаев А.И.** Исследование надежности полимерных изоляционных конструкций при воздействии перенапряжений // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 54. Кн. 2 Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. С. 61–70.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕЛЕЗНЁВ Дмитрий Александрович – ведущий инженер НИИ «Севкабель»

E-mail: Di.Sel92@ya.ru

ГРЕШНЯКОВ Георгий Викторович – доктор технических наук главный конструктор, НИИ «Севкабель»

E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 20.12.2019

REFERENCES

[1] **G.V. Greshnyakov, D.A. Seleznev, N.V. Korovkin,** Regulirovaniye elektricheskogo polya v usilivayushchey izolyatsii soyedinitelnykh kabelnykh muft na napryazheniye 110 kV, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 254 (04) (2016) 116–125. DOI: 10.5862/JEST.254.13

[2] Patent na poleznuyu model № 184107 «Soyedinitelnaya mufta dlya silovogo kabelya». Avtory: Greshnyakov G.V., Seleznev D.A., Kovalev G.G. Zaregistririvan v gosudarstvennom reyestre poleznykh

modeley 16 oktyabrya 2018 g. Srok deystviya patenta istekayet 15 iyunya 2028 goda.

[3] **D.A. Seleznev, N.V. Obratsov, D.V. Kiesewetter,** Numerical Simulation of the High-Voltage Cable Sleeve Operation for 110 kV, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, (2018).

[4] **K.S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin,** Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. V 2 t. SPb.: Piter, 2009.

- [5] **L.G. Shvartsman**, Regulirovaniye elektricheskogo polya v kontsevykh muftakh kabeley vysokogo napryazheniya, Trudy VNIIEP, 13 (1969) 11–33.
- [6] **S.S. Vetlugayev, L.Ye. Makarov, Yu.V. Obratsov, P.V. Fursov**, Elektricheskoye pole v soyedinitelnykh muftakh s elastomernoy izolyatsiyey na napryazheniye 110 kV, Kabeli i provoda, 1 (2004) 15–18.
- [7] **R.V. Kotov**, Raspredeleniye elektricheskogo polya v kabelnykh muftakh kholodnoy usadki. Elektro, 5 (2006) 40–44.
- [8] **T. Christen, L. Donzel, F. Greuter**, Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation, IEEE Electr. Insul. Mag. 27 (2) (2011).
- [9] **I.N. Kucheryavaya**, Elektricheskoye pole v kabelnykh muftakh pri razlichnykh sposobakh yego vyravnivaniya i pri nalichii defektov v elementakh, Teoretichna yelektrotehnika, (2016) 111–118
- [10] Kabeli i provoda. Osnovy kabelnoy tekhniki. Pod. Red. I.B. Peshkova. M.: Energoatomizdat, 2009.
- [11] **B.R. Khakimullin, I.Z. Bagautdinov**, Preimushchestva silovykh kabeley s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena», Innovatsionnaya nauka: mezhdunar. nauch. zhurnal, 4 (2016) 198–200.
- [12] **E.T. Larina**, Silovyye kabeli i vysokovoltnyye kabelnyye linii. M., 1996.
- [13] **Lise Donzel, Felix Greuter, Thomas Christen**, Nonlinear resistive electric field grading part 2: Materials and Applications, IEEE Electr. Insul. Mag. 26 (6) (2011) 48–60.
- [14] **A.I. Tadzhibayev, V.A. Kaniskin, E.M. Kostenko**, Nerazrushayushchiy metod opredeleniya resursa elektricheskikh kabeley s polimernoy izolyatsiyey v usloviyakh ekspluatatsii, Elektrichestvo, 5 (1995) 19–23.
- [15] **V.A. Kaniskin, A.I. Tadzhibayev**, Issledovaniye nadezhnosti polimernykh izolyatsionnykh konstruksiy pri vozdeystvii perenapryazheniy, Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistem energetiki, 54 (2) (2005) 61–70.

THE AUTHORS

SELEZNEV Dmirtii A. – *Research institute «Sevkabel»*

E-mail: Di.Sel92@ya.ru

GRESHNYAKOV Georgii V. – *Research institute «Sevkabel»*

E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

Received: 20.12.2019