

УДК 621.315.687.22

EDN YIDFWC

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛИТОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С.С. Жуликов

ORCID: 0009-0006-5969-3720 e-mail: tech-ems@mail.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Д.И. Ковалев

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

А.А. Нестеренко

ORCID: 0009-0003-1522-3530 e-mail: nesterenkoala@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Д.А. Кругликов

ORCID: 0009-0008-4376-535X e-mail: kruglikovdma@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

В статье приведены результаты исследований влияния избыточных зарядов на внешней поверхности литой полимерной изоляции шинопровода 1 кВ, образованных в результате трибоэлектризации или осаждения ионов коронного разряда, на электрическую прочность междуфазной изоляции. Произведена оценка влияния зарядов статического электричества на полимерные материалы литой изоляции. Проведенными расчетами установлено, что накопление зарядов статического электричества на поверхности диэлектрика до теоретически возможного предельного значения в воздухе $\sigma = 26,5$ мкКл/м² приводит к искажению распределения напряженности электрического поля в шинопровode и ее увеличению до $E_{\text{макс}} = 4,85$ кВ/мм, что достаточно для перекрытия изоляции в месте выхода шин из изоляционной конструкции для присоединения к трансформатору. В статье проведены исследования электростатические свойств новых композиционных материалов на основе эпоксидной смолы с различными наполнителями для оценки их способности накапливать на своей поверхности заряды статического электричества. Проведенные натурные эксперименты по электризации образцов новых композиционных материалов при трении и зарядке в поле коронного разряда, показали, что максимальная поверхностная плотность зарядов, достигнутая при

трибоэлектризации, составляет 1,38 мкКл/м², при коронном разряде – 0,3 мкКл/м². Проведены эксперименты по определению пробивной прочности макета шинпровода 1 кВ с литой эпоксидной изоляцией с наполнителем из кремния при отсутствии и при наличии на его поверхности зарядов СЭ. Эксперименты показали, что наличие зарядов на поверхности компаунда снижает напряжение перекрытия изоляции между шинами.

Ключевые слова: заряды статического электричества; перекрытие изоляции; плотность тока электризации; поверхностная плотность зарядов; постоянная времени релаксации; удельное объемное сопротивление; удельное поверхностное сопротивление; шинопровод.

Для цитирования: Жуликов С.С., Ковалев Д.И., Нестеренко А.А., Кругликов Д.А. Исследование электростатических свойств изоляционных материалов литой полимерной изоляции // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 3. С. 101-119. EDN YIDFWC

STUDY OF THE ELECTROSTATIC PROPERTIES OF INSULATION MATERIALS OF CAST POLYMER INSULATION

S.S. Zhulikov

ORCID: 0009-0006-5969-3720 e-mail: tech-ems@mail.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
Moscow, Russia

D. I. Kovalev

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm@mpei.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
Moscow, Russia

A.A. Nesterenko

ORCID: 0009-0003-1522-3530 e-mail: nesterenkoala@mpei.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
Moscow, Russia

D.A. Kruglikov

ORCID: 0009-0008-4376-535X e-mail: kruglikovdma@mpei.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of studies on the influence of excess charges on the outer surface of cast polymer insulation of a 1 kV busduct formed as a result of triboelectrification or deposition of ions from a corona discharge on the dielectric

strength of interphase insulation. An assessment of the effect of static electricity charges on polymer materials of cast insulation was carried out. Calculations have shown that the accumulation of static charges on the dielectric surface up to the theoretically possible limit in air ($\sigma = 26,5 \text{ } \mu\text{C}/\text{m}^2$) leads to distortion of the electric field distribution in the busduct and an increase in its maximum value up to $E_{\text{max}} = 4,85 \text{ kV}/\text{mm}$, which is sufficient to cause insulation flashover at the point where the busbars exit the insulating structure for connection to a transformer. The electrostatic properties of new epoxy-based composite materials with various fillers were investigated to evaluate their ability to accumulate static charges on their surface. Experimental studies of electrification of samples of new composite materials by friction and charging in a corona discharge field showed that the maximum surface charge density achieved under triboelectrification is $1,38 \text{ } \mu\text{C}/\text{m}^2$, while under corona discharge it is $0,3 \text{ } \mu\text{C}/\text{m}^2$. Experiments were also carried out to determine the dielectric strength of a 1 kV busduct mock-up with cast epoxy insulation with a silicon filler in the absence and presence of static charges on its surface. The experiments showed that the presence of charges on the compound surface reduces the insulation flashover voltage between the busbars.

Keywords: static electricity charges; busbar; electrification current density; surface charge density; specific surface resistance; specific volume resistance; relaxation time constant; insulation overlap.

For citation: S.S. Zhulikov, D.I. Kovalev, A.A. Nesterenko and D.A. Kruglikov, "Study of the electrostatic properties of insulation materials of cast polymer insulation", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 101-119, 2026. EDN YIDFWC

Введение

В последнее время для конструкций электрооборудования разрабатывается литая полимерная изоляция на основе эпоксидной смолы с различными наполнителями. При определенных условиях на поверхности изоляции могут накапливаться заряды статического электричества (СЭ), искажающее распределение электрическое поле как внутри, так и снаружи изоляционной конструкции. Способность эпоксидной смолы электризоваться при трении подтверждается тем, что она находится в нижней части трибоэлектрического ряда и способна получать заряды отрицательного знака при трении о воздух и частицы пыли, состоящей из различных материалов, например, ворсинок шерстяной ткани или меха [1-4]. Пыль достаточно часто присутствует в потоке воздуха, обдувающим изоляционную конструкцию вентиляторами системы охлаждения трансформатора. Наэлектризованная поверхность эпоксидной смолы притягивает мелкие частицы различных видов пыли и волокон из окружающего воздуха. Среди них могут быть характерные для промышленных предприятий проводящие волокна сажевых фильтров выхлопных систем и угольная пыль, которые, попадая на поверхность изоляции между шинами, приводят к ее перекрытию.

В местах выхода шин из изоляционной конструкции на воздух поверхность изоляции может заряжаться ионами коронного разряда, возникающего на острых кромках шин из-за наличия заусенцев и шероховатостей при недостаточно тщательной механической обработке.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния избыточных зарядов на внешней поверхности литой полимерной изоляции шинопровода 1 кВ, образованных в результате трибоэлектризации или осаждения ионов коронного разряда, на электрическую прочность междуфазной изоляции.

Поверхностная плотность зарядов σ на диэлектрике при контактной электризации ограничивается пробивной прочностью среды, в которой формируется электрическое поле. Для воздуха в однородном электрическом поле пробивная напряженность принимается равной $E_{\text{проб}} = 3 \cdot 10^6$ В/м (3 кВ/мм).

Для равномерно заряженного плоского диэлектрика предельная поверхностная плотность зарядов оценивается из условия достижения пробивной напряженности в воздушном промежутке. Принимая $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, получаем по (1):

$$\sigma_{\text{с пред}} = \epsilon_0 E_{\text{проб}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^6 = 26,5 \text{ мкКл/м}^2. \quad (1)$$

I. Расчет напряженности электрического поля при различных плотностях заряда на поверхности шинопровода

Расчетное распределение напряженности электрического поля в шинопроводе с литой изоляцией (рис. 1) при различной поверхностной плотности заряда на ее внешней поверхности представлено на рис. 2 и 3.

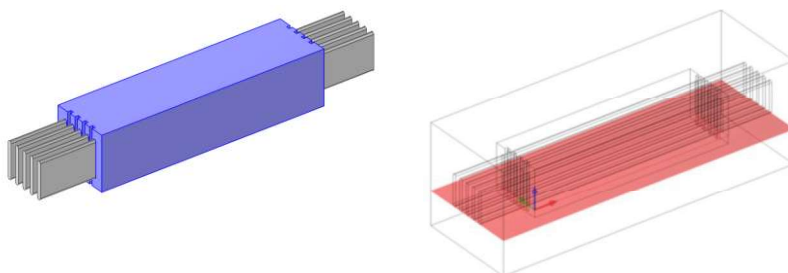


Рис. 1. Расчетная модель шинопровода 1 кВ с литой полимерной изоляцией и секущая плоскость у кромок шин, в которой проводились расчеты

Fig. 1. Calculation model of a 1 kV busduct with cast polymer insulation and the cutting plane at the busbar edges where the calculations were performed

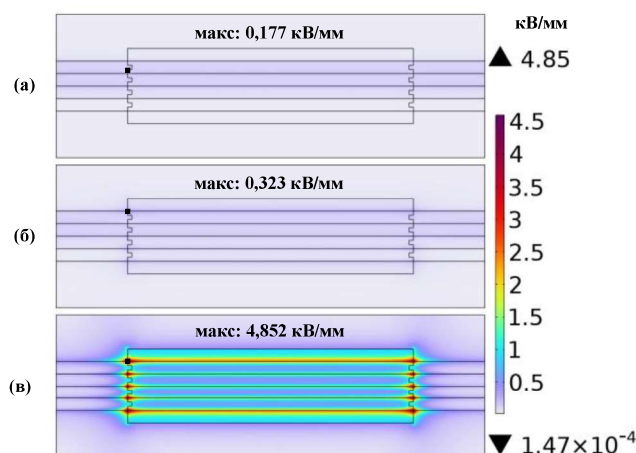


Рис. 2. Распределение модуля напряженности электрического поля в секущей плоскости у кромок шин при различных значениях поверхностной плотности заряда: $\sigma_s = 0$ Кл/м² (а); $\sigma_s = -1,38$ мкКл/м² (б); $\sigma_s = -26,5$ мкКл/м² (в)

Fig. 2. Distribution of the electric field strength magnitude in the cutting plane near the busbar edges for different values of surface charge density: $\sigma_s = 0$ Кл/м² (а); $\sigma_s = -1,38$ мкКл/м² (б); $\sigma_s = -26,5$ мкКл/м² (в)

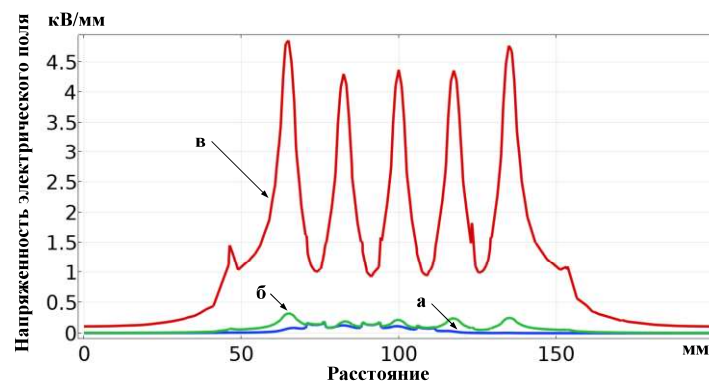


Рис. 3. Модуль напряженности электрического поля вдоль секущей линии у кромок шин при различных значениях поверхностной плотности заряда: $\sigma_s = 0$ Кл/м² (а); $\sigma_s = -1,38$ мкКл/м² (б); $\sigma_s = -26,5$ мкКл/м² (в)

Fig. 3. Electric field strength magnitude along the cutting line near the busbar edges for different values of surface charge density: $\sigma_s = 0$ Кл/м² (а); $\sigma_s = -1,38$ мкКл/м² (б); $\sigma_s = -26,5$ мкКл/м² (в)

Из расчетов следует, что по сравнению с незаряженной поверхностью ($\sigma_S = 0$ Кл/м²) напряженность электрического поля внутри шинпровода и в местах выхода шин из изоляционной конструкции для максимально заряженной поверхности $\sigma_S = -26,5$ мКл/м² увеличивается с 0,18 до 4,85 кВ/мм, что превышает пробивную прочность $E_{пр} = 3$ кВ/мм чисто воздушного промежутка в однородном электрическом поле.

II. Исследование электростатических свойств материалов на основе эпоксидных смол

Для оценки способности новых композиционных материалов на основе эпоксидной смолы с различными наполнителями накапливать на поверхности заряды СЭ проведены исследования их электростатических свойств. Склонность материалов к электризации определяется по постоянной времени свободной диссипации (рассеяния) накопленных в диэлектрике электростатических зарядов $\tau_{расч}$, т.е. после прекращения его электризации. Для омического закона релаксации (2):

$$\tau_{расч} = \epsilon_d \epsilon_0 \rho_v, \quad (2)$$

где ϵ_d — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ρ_v — удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·м; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная.

Диссипация зарядов СЭ происходит также за счет поверхностных токов, обусловленных наличием на поверхности гидрофильных диэлектриков тонкой пленки воды и растворенных в ней загрязнений и примесей. В случае небольших размеров диэлектрика и высоких значений относительной влажности воздуха [5, 6] на процессы диссипации поверхностных зарядов оказывает влияние удельное поверхностное сопротивление ρ_s , Ом.

Исследуемые образцы литой полимерной изоляции на основе эпоксидной смолы с различными наполнителями и их электростатические параметры, определенные в результате измерений и расчетов представлены в табл. 1. Измерения проводились по методике [7,8] при относительной влажности воздуха $\gamma = 13,3 \dots 22,2$ % и температуре $t = 15 \dots 25$ °С, что отличается от нормальных условий ($t_0 = 20$ °С, $\gamma_0 = 65$ %, $P_0 = 760$ мм. рт. ст.) Данные условия были выбраны преднамеренно, так как при низкой относительной влажности воздуха усиливается эффект электризации материалов.

Из табл. 1 следует, что исследуемые образцы литой полимерной изоляции являются хорошими диэлектриками, способными накапливать и длительное время удерживать на своей поверхности заряды СЭ. Принято считать, что для материалов, обладающих диссипативными свойствами $\tau_{расч} \leq 0,1$ с, для материалов, применяемых во взрывоопасных средах, $\tau_{расч} \leq 0,001$ с [9], исходя из условия безыскровой электризации (потенциал наэлектризованного предмета не превышает 300 В).

Таблица 1.
Исследуемые образцы литой полимерной изоляции и их параметры

Table 1.
Investigated samples of cast polymer insulation and their parameters.

№ п/п	Образцы (рабочее название)	Удельное по- верхностное сопротивле- ние ρ_s , Ом	Удельное объемное сопротив- ление ρ_v , Ом	Диэлек- трическая проницае- мость ϵ_d , о.е.	Постоян- ная вре- мени дис- сипации $\tau_{расч}$, с
1	Кварц	$7,5 \cdot 10^{14}$	$2,1 \cdot 10^{12}$	4,18	78
2	Корунд	$2,3 \cdot 10^{15}$	$6,1 \cdot 10^{12}$	7,67	413
3	Слюда	$1,5 \cdot 10^{16}$	$4,0 \cdot 10^{13}$	3,35	1188
4	Резина	$1,5 \cdot 10^{16}$	$6,3 \cdot 10^{11}$	4,69	26
5	Стеклянные шарики	$3,0 \cdot 10^{14}$	$7,7 \cdot 10^{11}$	6,68	47
6	Битое стекло	$7,5 \cdot 10^{14}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	4,08	71
7	Силикон	$7,5 \cdot 10^{15}$	$7,9 \cdot 10^{11}$	4,20	29
8	Магний	$7,5 \cdot 10^{15}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	4,68	95
9	ART	$7,5 \cdot 10^{15}$	$3,8 \cdot 10^{13}$	5,04	1680
10	MAG	$7,5 \cdot 10^{15}$	$2,6 \cdot 10^{12}$	4,89	112
11	Лайт	$3,0 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	4,51	74
12	Вермикулит	$3,8 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	8,82	1016
13	1472TB	$1,7 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	4,63	68
14	Чистая эпоксидная смола	$1,4 \cdot 10^{15}$	$8,7 \cdot 10^{11}$	6,72	52
15	Кварц 2023	$1,1 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^{12}$	4,90	81

На следующем этапе проводились эксперименты по электризации образцов путем их трибоэлектризации, в поле коронного разряда и в потоке сухого воздуха. В качестве материала при трибоэлектрической зарядке образцов использовались шерстяная и синтетическая ткани, расположенные в противоположном конце трибоэлектрического ряда относительно эпоксидной смолы (табл. 1). Шерстяная и синтетическая ткани относятся к положительной части ряда и склонны к отдаче электронов, тогда как эпоксидная

смола расположена в отрицательной области и характеризуется способностью принимать электроны. Применение материалов с различной трибоэлектрической активностью позволяет оценить поведение исследуемых материалов в условиях разнонаправленного переноса заряда.

Образцы круглой формы диаметром 10 см подвергались трибоэлектризации путем натирания тканями в течение 20 секунд с последующим измерением поверхностной плотности зарядов σ_s измерителем параметров электростатического поля СТ-07 на фиксированном расстоянии от поверхности образца $d=10$ см. После процесса трибоэлектризации образец быстро перемещался под заземленный экран прибора, где проводились измерения σ_s (рис. 4). При этом время перемещения $t_{\text{пер}}$ составляло менее 1 с, что на несколько порядков меньше постоянной времени диссипации заряда $t_{\text{пер}} \ll \tau_{\text{расч}}$. Это позволяло измерить исходную поверхностную плотность зарядов сразу после процесса электризации образцов. Процедура электризации и измерений для каждого образца повторялась до достижения максимального значения поверхностной плотности зарядов σ_{Smax} , результаты измерений представлены в табл. 2.



Рис. 4. Размещение наэлектризованного образца диэлектрика под заземленной плоскостью измерителя электростатического поля ротационного типа

Fig. 4. Arrangement of a charged dielectric sample under the grounded plate of a rotary-type electrostatic field meter

Аналогичные исследования были проведены для образца «Кварц 2023» размером 1х1 метр при его трибоэлектризации с применением различных тканей, в поле коронного разряда отрицательной полярности, а также в потоке сухого воздуха от компрессора с последующим измерением поверхностной плотности зарядов. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Таблица 2.

Результаты исследования трибоэлектризации образцов литой полимерной изоляции с различными наполнителями

Table 2.

Results of the study of triboelectrification of cast polymer insulation samples with various fillers

№ п/п	Образцы ($d = 10$ см), рабочее название (наполнитель)	Максимальная поверхностная плотность зарядов $\sigma_{\text{Смакс}}$, мкКл/м ²
1	Кварц	0,27
2	Корунд	0,16
3	Слюда	0,18
4	Резина	0,26
5	Стеклянные шарики	0,23
6	Битое стекло	0,25
7	Силикон	0,38
8	Магний	0,36
9	ART	0,25
10	MAG	0,40
11	Лайт	0,30
12	Вермикулит	0,31
13	1472TB	0,31
14	Чистая эпоксидная смола	0,37
15	Кварц 2023	0,53

Таблица 3.

Результаты исследования трибоэлектризации образца «Кварц 2023»

Table 3.

Results of the study of triboelectrification of the “Quartz 2023” sample

Наименование образца	Материал (метод), используемый для электризации	Поверхностная плотность заряда $\sigma_{\text{Смакс}}$, мкКл/м ²
Кварц 2023, 100x100 см	Шерстяная ткань	1,14
	Синтетическая ткань	1,38
	Поток воздуха	0,06
	Коронный разряд	0,3

Из результатов исследований следует, что максимальные значения поверхностной плотности зарядов 1,38 мкКл/м² и 1,14 мкКл/м² были получены в процессе трибоэлектризации образца «Кварц 2023» большого размера при контакте с синтетической и шерстяной тканями соответственно.

Полученные экспериментальные значения поверхностной плотности зарядов меньше на порядок предельного теоретически возможного значения $\sigma_{\text{Смакс}} = 26,5 \text{ мкКл/м}^2$. Для объяснения полученных экспериментальных данных рассмотрим более подробно процессы, происходящие при контактной электризации двух твердых диэлектриков.

III. Процессы, происходящие при контактной электризации двух твердых диэлектриков

При разделении поверхностей контакта наблюдается рекомбинация зарядов двойного электрического слоя (ДЭС), обусловленная токами проводимости в материалах и газоразрядными процессами (ионизацией) в воздушном промежутке. Схема формирования поверхностного заряда после разделения и роль проводимости и газового разряда представлены на рис. 5. В момент разделения поверхностей исходная плотность зарядов на границе контакта соответствует зарядам ДЭС $\sigma_{\text{конт}}$, однако, далее часть зарядов рекомбинирует, поэтому поверхностная плотность зарядов после разделения оказывается меньше исходной (условие $\sigma_{\text{п}} < \sigma_{\text{конт}}$ показано на рис. 5).

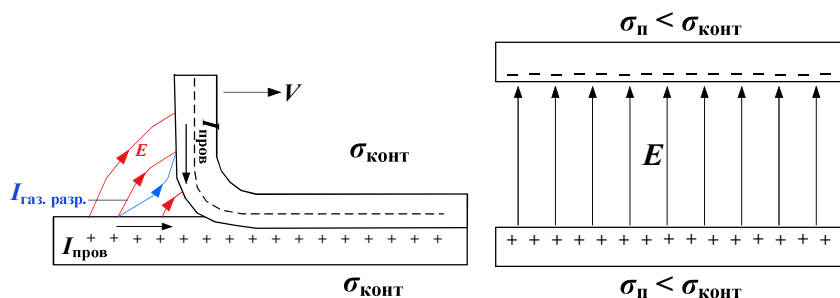


Рис. 5. Электризация твердых диэлектриков при разделении контакта: рекомбинация зарядов за счет токов проводимости и газоразрядных процессов

Fig. 5. Electrification of solid dielectrics during contact separation: charge recombination due to conduction currents and gas discharge processes

При малых скоростях разделения и низких поверхностных сопротивлениях рекомбинация в основном определяется электропроводностью материалов (преобладает вклад токов проводимости). При высоких поверхностных сопротивлениях возрастает роль газоразрядной нейтрализации, поскольку увеличение напряженности поля в воздушном промежутке приводит к ионизации воздуха и возникновению тока газового разряда, уменьшающего исходный поверхностный заряд. Тем самым фактическая величина $\sigma_{\text{п}}$ определяется интегральным вкладом проводимости и газового разряда за

время после разделения поверхностей, что в модели описывается балансом зарядов во времени по (3).

$$\sigma_n(t) = \sigma_{\text{конт}} - \int_0^t j_{\text{пров}}(t) dt - \int_0^t j_{\text{газ, разр}}(t) dt, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{конт}}$ – плотность зарядов ДЭС до разделения поверхностей, $\sigma_n(t)$ – поверхностная плотность зарядов после разделения, $j_{\text{пров}}(t)$ – плотность тока проводимости, $j_{\text{газ, разр}}(t)$ – плотность тока газового разряда (ионизации).

Таким образом, итоговая поверхностная плотность заряда определяется тем, какая доля исходных зарядов успела рекомбинировать за счет проводимости материалов и газоразрядных процессов в промежутке. Для учета влияния проводимости материалов и ионизационных процессов на итоговую поверхностную плотность зарядов примем в модели экспоненциальную релаксацию соответствующих плотностей токов (4-5).

$$j_{\text{пров}}(t) = j_{0 \text{ пров}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right); \quad (4)$$

$$j_{\text{газ, разр}}(t) = j_{0 \text{ газ, разр}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right). \quad (5)$$

Тогда выражение для итоговой поверхностной плотности зарядов определяется разностью между исходной плотностью зарядов ДЭС и интегральных вкладов токов нейтрализации по (6):

$$\sigma_n(t) = \sigma_{\text{конт}} - \int_0^t j_{\text{пров}} e^{-t/\tau_1} dt - \int_0^t j_{0 \text{ газ, разр}} e^{-t/\tau_2} dt. \quad (6)$$

Интегрирование по времени при $t \rightarrow \infty$ (установившийся режим) дает следующее соотношение (7):

$$\int_0^{\infty} \exp(-at) dt = \frac{1}{a}. \quad (7)$$

Учитывая приведенную выше формулу, после интегрирования получаем (8-9):

$$\int_0^{\infty} j_{0 \text{ пров}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) dt = j_{0 \text{ пров}} \tau_1; \quad (8)$$

$$\int_0^{\infty} j_{0 \text{ газ, разр}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) dt = j_{0 \text{ газ, разр}} \tau_2. \quad (9)$$

Тогда выражение для итоговой поверхностной плотности зарядов имеет следующий вид (10):

$$\sigma_n(\infty) = \sigma_{\text{конт}} - j_{0\text{ пров}} \tau_1 - j_{0\text{ газ. разр}} \tau_2, \quad (10)$$

где τ_1 и τ_2 – постоянные времени релаксации токов (с).

В рамках уточненной модели это выражение используется для качественного и расчетного описания того, что величина поверхностного заряда после разделения материалов определяется суммарной «эффективностью» нейтрализации за счет проводимости материала и газоразрядных процессов в промежутке, каждая из которых характеризуется собственной временной постоянной.

Для оценки поверхностной плотности зарядов после разделения поверхностей используется общее выражение баланса зарядов с учетом токов проводимости и газового разряда (11):

$$\sigma_n(t) = \sigma_{\text{конт}} - j_{0\text{ пров}} \tau_1 - j_{0\text{ газ. разр}} \tau_2. \quad (11)$$

В случае контакта двух диэлектриков в рамках принятого допущения рекомбинация зарядов за счет токов проводимости отсутствует вследствие высоких значений удельных поверхностного и объемного сопротивлений диэлектриков (табл. 1), поэтому вклад проводимости полагается пренебрежимо малым (12):

$$j_{0\text{ пров}} \tau_1 = 0. \quad (12)$$

Тогда компенсация контактной плотности зарядов ДЭС возможна только за счет газоразрядных (ионизационных) процессов при достижении напряженности электрического поля в воздушном промежутке пробивных значений $E_{\text{проб}}$, а выражение для поверхностной плотности зарядов σ_n примет следующий вид (13):

$$\sigma_n = \sigma_{\text{конт}} - j_{0\text{ газ. разр}} \tau_2. \quad (13)$$

Следовательно, для идеальных диэлектриков ($\rho_v \rightarrow \infty$, $\rho_s \rightarrow \infty$) при разделении их поверхностей величина σ_n ограничивается только ионизационными процессами.

Предельная поверхностная плотность зарядов $\sigma_{\text{пред}} = 26,5 \text{ мкКл/м}^2$ достижима при условии наличия однородного электрического поля в воздушном промежутке между разделяющимися поверхностями твердых диэлектриков и рассчитана исходя из пробивной прочности воздуха 3 кВ/мм.

В проведенных экспериментах по трибоэлектризации компенсация контактной плотности зарядов $\sigma_{\text{конт}}$ происходит в основном за счет газоразрядных (ионизационных) процессов, так как токами проводимости можно пренебречь вследствие высоких значений поверхностного и объемного сопротивлений диэлектриков. В первый момент разделения контактирующих поверхностей диэлектриков, когда длина воздушного зазора между ними

составляет несколько микрон, из-за характера микрорельефа (чешуйчатые ворсинки ткани, микровыступы) (рис. 6) и локального усиления напряженности электрического поля на остриях, воздух в зазоре ионизируется и происходит серия микроразрядов. При этом напряженность электрического поля на остриях намного превышает среднюю напряженность в воздушном промежутке. По этой причине экспериментальное значение максимальной поверхностной плотности заряда $\sigma_{S_{\text{макс}} \text{ практ}} = 1,38 \text{ мКл/м}^2$ намного ниже предельного теоретически возможного значения $\sigma_{S_{\text{макс}}} = 26,5 \text{ мКл/м}^2$, рассчитанного для пробивной напряженности воздуха в однородном электрическом поле.

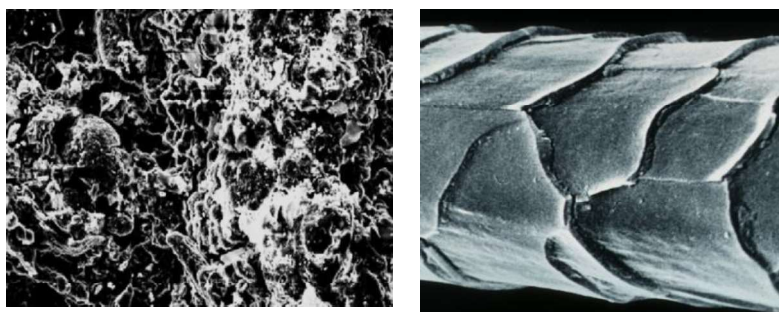


Рис. 6. Поверхности диэлектриков под электронным микроскопом с характерным микрорельефом: эпоксидный компаунд (а); волокно шерсти (б)

Fig. 6. Dielectric surfaces under an electron microscope with a characteristic microrelief: epoxy compound(a), wool fiber (b)

Таким образом, максимальная поверхностная плотность зарядов $\sigma_{S_{\text{макс}} \text{ практ}} = 1,38 \text{ мКл/м}^2$ была получена для образца компаунда на основе эпоксидной смолы с кварцевым наполнителем (рабочее название «Кварц 2023») больших размеров (100x100 см) в процессе его трибоэлектризации при контакте с синтетической тканью. Накопление зарядов СЭ на поверхности образца до больших значений было ограничено разрядными процессами в воздушном промежутке между поверхностями материалов.

Расчет распределения напряженности электрического поля в шинопроводе с литой изоляцией при полученной в экспериментах максимальной поверхностной плотности заряда $\sigma_{S_{\text{макс}} \text{ практ}} = 1,38 \text{ мКл/м}^2$ представлен на рисунках 26 и 36. Максимальное значение напряженности электрического поля составляет 0,32 кВ/мм, что на порядок меньше пробивной прочности $E_{\text{пр}} = 3 \text{ кВ/мм}$ чисто воздушного промежутка в однородном электрическом поле, что свидетельствует о низкой вероятности перекрытия изоляции между шинами.

IV. Проведение экспериментов по возникновению поверхностных разрядов

Целью следующего эксперимента было исследование возможности возникновения разрядов СЭ на поверхности диэлектрика при его зарядке в поле коронного разряда. Пример возникновения поверхностных разрядов СЭ приведен на рис. 7.



Рис. 7. Предполагаемый результат разветвленных разрядов СЭ в виде «дерева» на поверхности диэлектрика

Fig. 7. Presumed result of branched static electricity discharges in the form of a “tree” on the dielectric surface

Эксперименты проводились на образце «Кварц-2023», так как по результатам предыдущих исследований он наэлектризовался до наибольшей поверхностной плотности заряда. На коронирующий электрод (коротрон), расположенный над поверхностью образца на высоте 1 см, подавалось и далее плавно поднималось высокое напряжение отрицательной полярности от установки СКАТ-70М. При этом торцевая кромка образца заземлялась с помощью полоски фольги (рис. 8). Процесс образования разрядов регистрировался фотоаппаратом в режиме видеосъемки с частотой 120 кадр/с.

Во время плавного подъема напряжения от 0 до 70 кВ и после его выдержки на максимальном уровне в течение 180 с разрядов СЭ на поверхности образца зарегистрировано не было. При максимальном значении напряжения зарядный ток составлял 100 мкА, этому значению при площади образца «Кварц-2023» 1 м² соответствует средняя плотность тока электризации $j = 100 \text{ мкА/м}^2$. Данное значение является предельным при трибоэлектризации материалов и соответствует пробивной плотности тока электризации в воздухе $j_{\text{пред}} = 100 \text{ мкА/м}^2$ [10], что свидетельствует о корректности методики проведения эксперимента. На последнем этапе проведены испытания по определению пробивной прочности макета шинпровода 1 кВ с литой эпоксидной изоляцией с наполнителем из кремния при отсутствии и при наличии на ее поверхности зарядов СЭ.

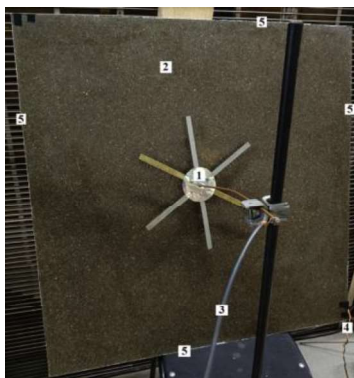


Рис. 8. Схема электризации образца «Кварц 2023» в поле коронного разряда:
 1 – коротрон, 2 – образец, 3 – высоковольтный провод от установки СКАТ-70М,
 4 – заземляющий проводник, 5 – заземленная полоска фольги

Fig. 8. Scheme of electrification of the “Quartz 2023” sample in a corona discharge field:
 1 – corotron, 2 – sample, 3 – high-voltage conductor from the SKAT-70M installation, 4 – grounding conductor, 5 – grounded foil strip

Для каждого варианта проводилась серия из 5 опытов, и определялось среднее значение напряжения перекрытия. Заряды осаждались путем натираания изоляции между шинами лентой из синтетической ткани. Напряжение подавалось на крайнюю шину шинпровода, при этом остальные шины были заземлены. При плавном подъеме напряжения регистрировалось значение напряжения, при котором происходило перекрытие изоляции между шинами. Факт перекрытия определялся срабатыванием защиты установки СКАТ-70М и регистрировался фотоаппаратом в режиме видеосъемки при частоте 120 кадр/с (рис. 9).

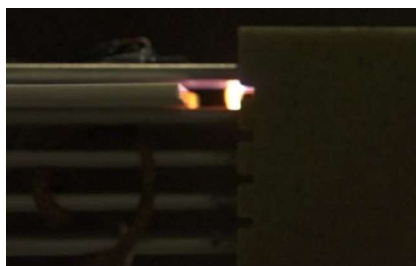


Рис. 9. Перекрытие литой эпоксидной изоляции с наполнителем из кремния между шинами макета шинпровода 1 кВ

Fig. 9. Flashover of cast epoxy insulation with a silicon filler between the busbars of a 1 kV busduct mock-up

Эксперименты показали, что наличие зарядов СЭ на поверхности эпоксидной изоляции с наполнителем из кремния снижает напряжение перекрытия изоляции между шинами шинпровода 1 кВ с 18,5 до 17 кВ.

V. Выводы

Проведены исследования электростатических свойств разрабатываемых композиционных материалов на основе эпоксидной смолы с различными наполнителями для оценки их способности накапливать на своей поверхности заряды СЭ. Установлено, что образцы изоляции являются хорошими диэлектриками, способными накапливать и длительное время сохранять на своей поверхности заряды СЭ. Постоянная времени диссипации зарядов СЭ находится в диапазоне $\tau_{\text{расч}} = 26 \dots 1680$ с. Наименьшие значения $\tau_{\text{расч}}$ у образцов с наполнителем из резины и силикона, а наибольшие – у образцов «ART», «Слюда» и «Вермикулит».

Экспериментальные исследования трибоэлектризации образцов небольших размеров ($d = 10$ см) в контакте с шерстяной и синтетической тканями показали, что поверхностная плотность зарядов находится в диапазоне $\sigma_{\text{Sмакс}} = 0,16 \dots 0,53$ мкКл/м². Для образца «Кварц 2023» размером 1х1 м при различных способах электризации достигнута максимальная поверхностная плотность зарядов $\sigma_{\text{Sмакс практ}} = 1,38$ мкКл/м² при трибоэлектризации в контакте с синтетической тканью. Полученные экспериментальные значения меньше на порядок предельного теоретически возможного значения $\sigma_{\text{Sмакс}} = 26,5$ мкКл/м², что связано с рекомбинацией зарядов двойного электрического слоя за счет токов газоразрядных процессов в воздушном промежутке между разделяющимися поверхностями диэлектриков.

Проведены расчеты распределения напряженности электрического поля в шинпроводе с литой изоляцией для максимальной поверхностной плотности заряда $\sigma_{\text{Sмакс практ}} = 1,38$ мкКл/м², полученной при проведении экспериментов. Максимальное значение напряженности электрического поля в изоляционной конструкции составило 0,32 кВ/мм, что свидетельствует о низкой вероятности перекрытия изоляции между шинами.

Исследована возможность возникновения разрядов СЭ вдоль поверхности образца «Кварц 2023» (1х1 м) при его зарядке в поле коронного разряда отрицательной полярности. При зарядном напряжении коротрона 70 кВ и средней плотности электризации $j = 100$ мкА/м² разрядов, обусловленных наличием тангенциальной составляющей напряженности электрического поля E_{τ} , не образуется.

Проведены испытания по определению пробивной прочности макета шинпровода 1 кВ с литой эпоксидной изоляцией с наполнителем из кремния при отсутствии и при наличии на его поверхности зарядов СЭ. Эксперименты показали, что при наличии зарядов СЭ на поверхности изоляции напряжение перекрытия изоляции между шинами снижается с 18,5 до 17 кВ,

Рекомендовано дальнейшее проведения исследований по электризации образцов литой полимерной изоляции с различными наполнителями и испытаний по определению пробивной прочности шинопроводов. Необходимо верифицировать результаты полученных экспериментов по электризации литой полимерной изоляции для реальных условий ее эксплуатации, так как они могут существенно отличаться от лабораторных условий в части состава и видов пыли на промышленных предприятиях.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0004).

© Жуликов С.С., 2026

© Ковалев Д.И., 2026

© Нестеренко А.А., 2026

© Кругликов Д.А., 2026

Поступила в редакцию 20.03.2026

Принята к публикации 24.04.2026

Received 20.03.2026

Accepted 24.04.2026

Библиографический список

- [1] Lacks D.J., Sankaran R.M. Contact electrification of insulating materials // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. № 44 (45). DOI: 10.1088/0022-3727/44/45/453001
- [2] Diaz A.F., Felix-Navarro R.M. A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties // Journal of Electrostatics. 2004. № 4 (62). P. 277-290. DOI: 10.1016/j.elstat.2004.05.005
- [3] Lowell J., Rose-Innes A.C. Contact electrification // Advances in Physics. 1980. № 29 (6). P. 947-1023. DOI: 10.1080/00018738000101466
- [4] Harper W.R. Contact and frictional electrification. Oxford: Clarendon Press, 1967. – 369 p.
- [5] Жуликов С.С. Способы ограничения зарядов статического электричества на операторе при обслуживании оборудования объектов энергетики // Энергоэксперт. 2014. № 2. С. 58-61.
- [6] Глазунов П.С., Жуликов С.С., Абдельшафи И.М.А. Методика ограничения накопления зарядов статического электричества на операторе при обслуживании автоматизированных систем управления технологическим процессом // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 10. С. 11.
- [7] ГОСТ 6433.2-71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрических сопротивлений при постоянном напряжении. Введ. 1972-07-01. М.: Издательство Стандартов, 1978. – 24 с.

- [8] IEC 61340-2-1:2015. Электростатика. Часть 2-1. Методы измерений. Способность материалов и изделий рассеивать статический электрический заряд. – Женева: Международная электротехническая комиссия, 2015.
- [9] Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 93 с.
- [10] Попов Б.Г., Веревкин В.Н., Бондарь В.А., Горшков В.И. Статическое электричество в химической промышленности. Ленинград: «Химия». Ленингр. отделение, 1977. – 238 с.

References

- [1] D.J. Lacks and R.M. Sankaran, "Contact electrification of insulating materials", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 44, no. 45, Oct. 2011. DOI: 10.1088/0022-3727/44/45/453001
- [2] A.F. Diaz and R.M. Felix-Navarro, "A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties", Journal of Electrostatics, vol. 4, no. 62, pp. 277-290, Nov. 2004. DOI: 10.1016/j.elstat.2004.05.005
- [3] J. Lowell and A.C. Rose-Innes, "Contact electrification", Advances in Physics, vol. 29, no. 6, pp. 947-1023, 1980. DOI: 10.1080/00018738000101466
- [4] W.R. Harper, Contact and frictional electrification. Oxford: Clarendon Press, 1967.
- [5] S.S. Zhulikov, "Methods for limiting static electricity charges on operators during maintenance of power engineering equipment", Energoexpert, no. 2, pp. 58-61, 2014.
- [6] P.S. Glazunov, S.S. Zhulikov and I.M.A. Abdelshafi, "Metodika ogranicheniya nakopleniya zaryadov staticheskogo elektrichestva na opereatore pri obsluzhivanii avtomatizirovannyh sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami [Method for limiting the accumulation of static electricity charges on an operator during maintenance of automated process control systems]", Journal of Radioelectronics, no. 10, pp. 11, 2017 (in Russian).
- [7] Solid electrical insulating materials. Methods for evaluation of electrical resistance at d. c. voltages, GOST 6433.2-71, Nov. 1978.
- [8] IEC 61340-2-1:2015. Electrostatics – Part 2-1: Measurement methods – Ability of materials and products to dissipate static electric charge. — Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015.
- [9] B.K. Maksimov and A.A. Obukh, Staticheskoe elektrichestvo v promyshlennosti i zashchita ot nego [Static Electricity in Industry and Protection Against It]. Moscow: Energoatomizdat, 2000 (in Russian).
- [10] B.G. Popov, V.N. Verevkin, V.A. Bondar and V.I. Gorshkov, Staticheskoe elektrichestvo v himicheskoy promyshlennosti [Static electricity in the chemical industry]. Leningrad: «Himiya». Leningr. otd-nie ["Chemistry". Leningr. Department], 1977 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Сергей Сергеевич Жуликов, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Дмитрий Игоревич Ковалев, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Александр Алексеевич Нестеренко, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Дмитрий Александрович Кругликов, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Sergey S. Zhulikov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow, Russian Federation.

Dmitry I. Kovalev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow, Russian Federation.

Aleksandr A. Nesterenko, research engineer of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow, Russian Federation.

Dmitry A. Kruglikov, research engineer of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow, Russian Federation.