

А.В. Беспрозванных, А.В. Рогинский

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Представлена методика розрахунку розподілу електричного поля по поверхні ізоляції і протівокоронного напівпровідного покриття в лобовій частині стрижня високовольтної електричної машини. Отримано в залежності від питомого поверхневого опору напівпровідного покриття розподіл електричного потенціалу по поверхні протівокоронного покриття та ізоляції. Обґрунтовано діапазон значень питомого поверхневого опору протівокоронного покриття для ефективного регулювання електричного поля. Достовірність розрахунків підтверджено експериментальними дослідженнями розподілу потенціалу по поверхні протівокоронного напівпровідного нелінійного покриття уздовж лобової частини зразків стрижнів гідрогенератора на лінійну напругу 20 кВ. Представлено результати експериментальної перевірки стабільності нелінійних властивостей покриттів в процесі тривалого електричного і теплового старіння спеціально виготовлених зразків покриття. Ефективність регулювання електричного поля напівпровідними покриттями підтверджено результатами випробувань зразків стрижнів гідрогенератора СВ 1500/100-12 в початковому стані і після комплексного тривалого впливу електричного поля і температури. Бібл. 14, рис. 6.*

*Ключові слова:* лобова частина стрижня, зовнішні часткові розряди, електричне поле, регулювання електричного поля, протівокоронне напівпровідне покриття, питомий поверхневий опір, розподіл електричного потенціалу, стабільність нелінійних властивостей, тривале електричне і теплове старіння.

*Представлена методика расчета распределения электрического поля по поверхности изоляции и противокоронного полупроводящего покрытия в лобовой части стержня высоковольтной электрической машины. Получено в зависимости от удельного поверхностного сопротивления полупроводящего покрытия распределение электрического потенциала по поверхности противокоронного покрытия и изоляции. Обоснован диапазон значений удельного поверхностного сопротивления противокоронного покрытия для эффективного регулирования электрического поля. Достоверность расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями распределения потенциала по поверхности противокоронного полупроводящего нелинейного покрытия вдоль лобовой части образцов стержней гидрогенератора на линейное напряжение 20 кВ. Представлены результаты экспериментальной проверки стабильности нелинейных свойств покрытий в процессе длительного электрического и теплового старения специально изготовленных образцов покрытия. Эффективность регулирования электрического поля полупроводящими покрытиями подтверждена результатами испытаний образцов стержней гидрогенератора СВ 1500/100-12 в исходном состоянии и после комплексного длительного воздействия электрического поля и температуры. Библ. 14, рис. 6.*

*Ключевые слова:* лобовая часть стержня, внешние частичные разряды, электрическое поле, регулирование электрического поля, противокоронное полупроводящее покрытие, удельное поверхностное сопротивление, распределение электрического потенциала, стабильность нелинейных свойств, длительное электрическое и тепловое старение.

**Введение.** Одной из главных проблем при изготовлении высоковольтных электрических машин является подавление внешних частичных разрядов, возникающих в пазовой части обмотки из-за разности потенциалов между поверхностью изоляции и сердечником статора и в лобовой части из-за резкого скачка напряженности электрического поля в месте выхода обмотки из паза [1-3].

Регулирование электрического поля в изоляции статорной обмотки, обеспечивающего подавление частичных разрядов в воздушных зазорах между поверхностью изоляции и стенками пазов и устранение скользящих разрядов по поверхности изоляции в местах выхода обмоток из паза статора, состоит в применении проводящих и полупроводящих покрытий. Обострение конкуренции и стремление снизить стоимость электрических машин высокого напряжения за счет существенного увеличения электрических и тепловых нагрузок электроизоляционной системы приводят к усложнению работы противокоронных покрытий на поверхности изоляции статорной обмотки и повышению интенсивности разрядных процессов, которые существенно сокращают срок службы изоляции при отказе покрытий [4-9]. В связи с вышесказанным возникает необходимость применения противокоронных покрытий, обеспечивающих эффективное

регулирование электрического поля в процессе эксплуатации высоковольтных электрических машин.

**Целью статьи** является анализ эффективности выравнивания электрического поля по поверхности изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин полупроводящими противокоронными покрытиями.

**Постановка проблемы.** Корпусная изоляция статорной обмотки является наиболее нагруженным элементом, подвергающимся одновременному воздействию электрического поля, температуры и термомеханических напряжений. Особо высокие требования к современному изоляционному системам предъявляются в связи с проектированием и изготовлением мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением. Допустимая рабочая напряженность электрического поля корпусной изоляции (в области плоской стороны стержня) достигает значений (3-3,2) кВ/мм для изоляции, изготовленной методом вакуум-нагнетательной пропитки для проводников с оптимизированной геометрией (с закругленными углами) [2, 3]. Повышение требований к надежности мощных электрических машин привело к необходимости использования при изготовлении статорной корпусной изоляции материалов, характеризующихся повышенной стабильностью физико-химических и электро-

© А.В. Беспрозванных, А.В. Рогинский

изоляционных свойств. Традиционно для этой цели применяются комбинированные слюдосодержащие ленты, в которых в качестве подложки используются стеклотенты, а в качестве диэлектрического барьера – слюдобумаги, пропитанные эпоксиноволачными смолами. Повышение содержания слюды в слюдобумагах обеспечивает существенный рост длительной электрической прочности изоляции [10]. Уровень напряженности электрического поля, при котором работает электрическая изоляция паза стержня, зависит как от номинального напряжения машины, толщины изоляции, так и конфигурации поверхности меди стержня и паза статора. Как правило, современные мощные турбогенераторы имеют пазы и стержни прямоугольной формы. При такой форме электродов максимальные значения напряженности электрического поля [11] имеют место на углах токоведущего стержня (рис. 1, кривая 5: эквипотенциальная поверхность  $\varphi = \pi$ , номер силовой линии равен  $\psi = 0$ ), а изоляция по объему паза нагружается крайне неравномерно. В углу паза, т.е. при  $\varphi = 0$  и  $\psi = 0$ , напряженность электрического поля равна 0 (рис. 1, кривая 3). Степень выравнивания электрического поля в пазу статора характеризуется коэффициентом неравномерности электрического поля  $K$ , равным отношению максимальной напряженности поля  $E_{\max}$ , имеющей место в пазу, к напряженности равномерного поля  $E_{\text{midl}}$ , т.е. при достаточном удалении от угла токоведущего стержня (рис. 1, кривая 1: эквипотенциальная поверхность  $\varphi = \pi/2$  и  $\psi \rightarrow \infty$ ).

Пазовая часть секции статорной обмотки устанавливается в паз сердечника свободно, существующие неровности и разброс в размерах паза сердечника и секции обуславливают наличие некоторого воздушного зазора (не более 1 мм) между поверхностью изоляции и сердечником. Образуется двухслойная изоляционная система: твердая изоляция – газообразный диэлектрик (воздух). Пробой воздушной прослойки (частичный разряд), находящейся в условиях сильного неоднородного электрического поля, произойдет при напряжении, меньше рабочего [11-13].

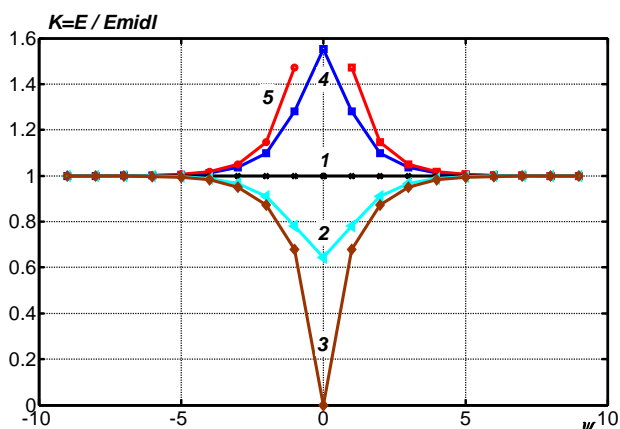


Рис. 1. Коэффициент неравномерности электрического поля  $K$  в пазу статорной обмотки турбогенератора на линейное напряжение 20 кВ: кривая 1 –  $\varphi = \pi/2$  и  $\psi \rightarrow \infty$ ; кривая 2 –  $\varphi = \pi/4$  и  $\psi = 0$ ; кривая 3 –  $\varphi = 0$  и  $\psi = 0$ ; кривая 4 –  $\varphi = 3/4\pi$  и  $\psi = 0$ ; кривая 5 –  $\varphi = \pi$  и  $\psi = 0$

Поверх изоляции стержня наносится полупроводящее покрытие, электрически соединяемое со стенками паза. Такое покрытие с низким значением удель-

ного поверхностного сопротивления («проводящее») обеспечивает контакт во многих точках между покрытием и стенками паза, то есть вся поверхность пазовой части оказывается заземленной. В результате устраняется разность потенциалов между поверхностью изоляции и стенкой паза. Обычно это лента или лак на основе графита. С одной стороны, проводимость покрытия должна быть достаточной, чтобы устранять частичные разряды в пазу, которые развиваются при возникновении разности потенциалов между поверхностью изоляции и статором. С другой – не должна быть меньше определенного уровня, при котором происходит замыкание листов статора, что в свою очередь приводит к появлению вихревых токов и возрастанию потерь. Удельное поверхностное сопротивление пазового покрытия  $\rho_s$  лежит в диапазоне ( $10^2 - 10^4$ ) Ом, что обеспечивает уменьшение вероятности пробоя воздушных зазоров между стержнем и стенкой паза исключаются.

В лобовых частях стержни с изоляцией находятся в газовой среде. Большая часть напряжения падает на газовые промежутки. В этом случае составляющая напряженности электрического поля вдоль поверхности становится меньше критической напряженности начала ионизации воздуха или водорода [11-13]. Пазовое (проводящее) покрытие выходит за пределы паза для устранения коронирования в месте выхода обмотки из паза, где напряженность электрического поля в воздухе достаточно высока для развития разрядных процессов. При отсутствии защитных мер в месте выхода стержня из паза происходит резкий скачок напряженности электрического поля, который может привести к возникновению внешних краевых разрядов (короны и разрядов вдоль поверхности твердой изоляции) на поверхности лобовой части катушки или стержня электрической машины. Для устранения эффекта коронирования необходимо обеспечить плавное распределение электрического потенциала по поверхности изоляции лобовых частей стержней.

**Регулирование электрического поля в лобовой части изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин.** В лобовой части применяют противокоронное покрытие, имеющее большие значения удельного поверхностного сопротивления ( $10^5 - 10^9$ ) Ом [6-8]. В лобовых частях полупроводящий слой накладывается на длине 20-25 см. Для этого используются полупроводящие покрытия, выполненные на основе эмали [6-8], в которых наполнителями являются проводящие порошки: сажа или графит с линейной вольт-амперной характеристикой. Дисперсность сажи или графита существенно влияет на эксплуатационные свойства противокоронной защиты [9].

Наиболее предпочтительными являются нелинейные покрытия с резко выраженной нарастающей зависимостью удельной поверхностной проводимости от напряженности электрического поля (рис. 2).

Покрытие создает участок длиной  $l_s$  с удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s$  (рис. 3), причем поверхностное сопротивление покрытия значительно меньше поверхностного сопротивления изоляции  $\rho_{\text{inss}}$ . Т.к.  $\rho_s \ll \rho_{\text{inss}}$ , то составляющая напряженности элек-

трического поля  $E_{O_s}$  вдоль поверхности изоляции в точке  $O$  уменьшается. Но у конца покрытия (в точке  $K$ ) образуется новая область с резкооднородным полем.

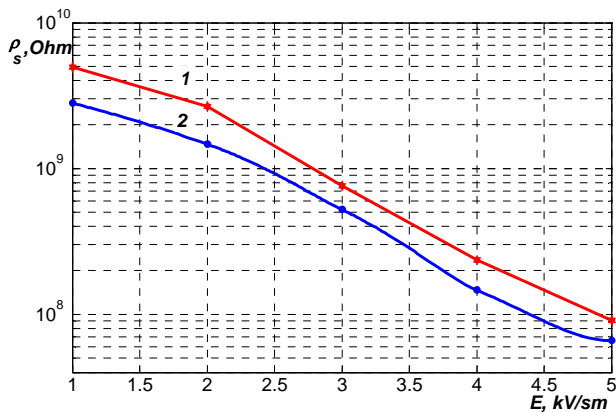


Рис. 2. Экспериментальная зависимость напряженности электрического поля выпрямленной частоты удельного поверхностного сопротивления противокоронного покрытия на основе нелинейного компаунда (кривая 1) и покрытия в виде ленты (кривая 2)

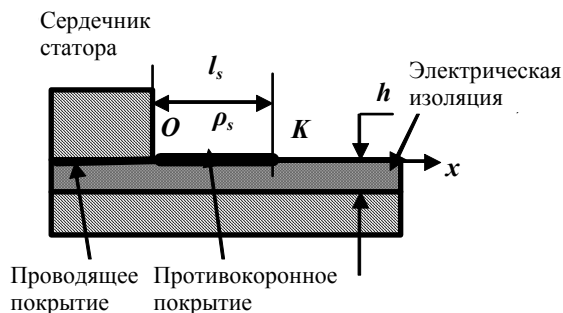


Рис. 3. Схематичное представление фрагмента лобовой части стержня с изоляцией и противокоронным покрытием

В отсутствие полупроводящего покрытия напряженность электрического поля в точке  $O$

$$E_{oo} = U_o \sqrt{\omega \rho_{ins_s} C_s} = U_o \sqrt{\omega \rho_{ins_s} \varepsilon_0 \varepsilon / h}, \quad (1)$$

где  $U_o$  – потенциал (напряжение) в точке  $O$ ;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $C_s = \varepsilon_0 \varepsilon / h$  – емкость изоляции толщиной  $h$  с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ ;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

При наличии полупроводящего покрытия напряженность электрического поля становится равной

$$E_{O_s} = U_o \sqrt{\omega \rho_s \varepsilon_0 \varepsilon / h}, \quad (2)$$

т.е. покрытие обеспечивает снижение  $E_{oo}$  в  $\sqrt{\rho_{ins_s} / \rho_s}$  раз.

Емкостные токи, протекающие по полупроводящему покрытию, вызывают падение напряжения вдоль покрытия, вследствие чего  $E_K$  становится меньше в сравнении с  $E_{oo}$ , т.е. в отсутствие покрытия. Напряженность электрического поля у края покрытия определяется выражением

$$E_K = 2U_o \sqrt{\omega \rho_{ins_s} \varepsilon_0 \varepsilon / h} \exp(-\sqrt{\omega \rho_s \varepsilon_0 \varepsilon / 2h} \cdot l_s). \quad (3)$$

Подбором значений  $l_s$  и  $\rho_s$  можно добиться снижения  $E_{oo}$  и  $E_K$  до допустимых уровней, при которых отсутствуют поверхностные разряды.

Условием для выбора значений удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$  полупроводящего по-

крытия является неравенство  $E_{O_s} \leq E_{Od}$ , которое вместе с выражением (1) для определения напряженности электрического поля в точке  $O$   $E_{oo}$  дает возможность определить верхнюю границу удельного поверхностного сопротивления полупроводящего покрытия

$$\rho_s \leq \frac{E_{Od} h}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon U_{so}^2}, \quad (4)$$

где  $U_{so}$  – расчетное значение напряжения,  $E_{Od}$  – допустимая напряженность в точке  $O$  (в воздухе, при наибольшем рабочем напряжении промышленной частоты), определяемое, например, на основании эмпирического закона Пашена для газообразных диэлектриков [13, 14].

Выбор длины покрытия  $l_s$  определяется из условия

$$l_s \geq \sqrt{\frac{2h}{\omega \rho_s \varepsilon_0 \varepsilon}} \ln \left( \frac{2U_{so}}{E_{Kd}} \sqrt{\frac{\omega \rho_{ins_s} \varepsilon_0 \varepsilon}{h}} \right). \quad (5)$$

Допустимое значение напряженности электрического поля  $E_{Kd}$  в точке  $K$  зависит от толщины изоляции  $h$ , электрофизических характеристик изоляции и полупроводящего покрытия соответственно.

На рис. 4 показано влияние удельного поверхностного сопротивления противокоронного покрытия  $\rho_s$  на распределение потенциала по полупроводящему покрытию (кривые 1, 2 и 3) и по поверхности изоляции (кривые 1', 2' и 3') статорной обмотки высоковольтной электрической машины на линейное напряжение  $U_l = 20$  кВ вдоль лобовой части стержней. Кривые 1 и 1' соответствуют значениям удельного поверхностного сопротивления противокоронного покрытия  $\rho_s = 5 \cdot 10^6$  Ом; кривые 2 и 2' –  $\rho_s = 5 \cdot 10^7$  Ом; кривые 3 и 3' –  $\rho_s = 5 \cdot 10^8$  Ом (рис. 4). Большие значения удельного поверхностного сопротивления полупроводящих слоев приводят к меньшим значениям напряжения на изоляции лобовых частей стержней (сравни кривые 1' и 3' в области малых значений  $l_s$ ). Увеличение удельного поверхностного сопротивления покрытия обуславливает уменьшение длины полупроводящего покрытия.

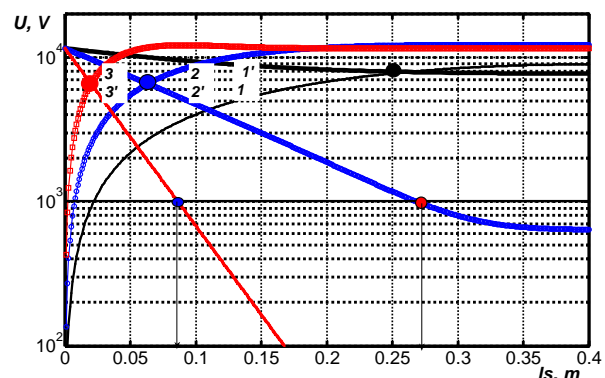


Рис. 4. Распределение потенциала по поверхности противокоронного покрытия (кривые 1, 2 и 3) и изоляции (кривые 1', 2' и 3') соответственно

Увеличение  $\rho_s$  с  $5 \cdot 10^6$  Ом до  $5 \cdot 10^8$  Ом приводит к пересечению кривых распределения потенциала по поверхности противокоронного покрытия и изоляции, т.е. равенству потенциалов, при значительно

меньших, более чем в 25 раз, значениях расстояния  $l_s$  (сравни кривые 1, 1' и 3, 3' на рис. 4). Длина полупроводящего покрытия, обеспечивающая уменьшение потенциала в точке  $K$  не менее, чем в 10 раз относительно максимального значения в точке  $O$ , может быть принята равной 27,5 см и 7 см для покрытий со значениями удельного поверхностного сопротивления  $5 \cdot 10^7$  Ом и  $5 \cdot 10^8$  Ом соответственно (см. кривые 2' и 3' на рис. 4). В таком случае напряжение на поверхности изоляции не превышает 1 кВ. Для полупроводящего покрытия с удельным поверхностным сопротивлением  $5 \cdot 10^6$  Ом эффективность выравнивания электрического поля крайне низкая (см. кривую 1' на рис. 4).

Соответствие между расчетными (кривые 1 и 2) и экспериментальными (точки под №3-6) результатами распределения электрического потенциала по поверхности противокоронного покрытия вдоль лобовой части приведено на рис. 5. В образцах стрежней гидрогенератора СВ 1500/100-12 применено противокоронное покрытие на основе нелинейного компаунда (символы под №3 и 4) и в виде ленты (символы под №5 и 6). Приложенное напряжение выпрямленной частоты соответствует 10,5 кВ (символы под №3 и 5 на рис. 5) и 15,75 кВ (символы под №4 и 6 на рис. 5) соответственно. Модельные зависимости распределения потенциала по полупроводящему покрытию (кривые 1 и 2 на рис. 5) для статорной обмотки высоковольтной электрической машины на линейное напряжение 20 кВ соответствуют удельному поверхностному сопротивлению  $5 \cdot 10^8$  Ом (кривая 1) и  $5 \cdot 10^7$  Ом (кривая 2) соответственно.

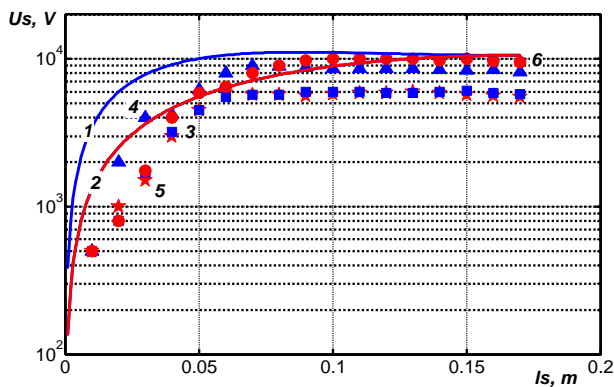


Рис. 5. К достоверности результатов расчета распределения потенциала по поверхности противокоронного покрытия вдоль лобовой части стрежней высоковольтной электрической машины

**Стабильность нелинейных свойств полупроводящих противокоронных покрытий в процессе электрического и теплового старения.** Проверка стабильности нелинейных свойств покрытий проведена по результатам длительного электрического и теплового старения специально изготовленных образцов. Образцы в количестве 10 штук для каждого типа покрытия подвергнуты электрическому старению при напряженности электрического поля 2,5 кВ/см промышленной частоты в течение 220 часов с последующим тепловым старением при температуре 175 °С на протяжении 100 часов. Электрическое старение проведено в два цикла:

первый – 60 часов, второй – 160 часов. В исходном состоянии и после каждого цикла электрического и теплового старения проведены измерения удельного поверхностного сопротивления при выпрямленном испытательном напряжении. На рис. 6 приведена 3D диаграмма динамики изменений удельного поверхностного сопротивления образцов нелинейного противокоронного покрытия в процессе старения ( $\rho_{sa}$ ) относительно исходного, до старения, состояния ( $\rho_s$ ) в зависимости от напряженности электрического поля. Цифры на рис. 6 относятся: к противокоронному покрытию на основе нелинейного компаунда – 1, 2, 3; противокоронному нелинейному покрытию в виде ленты в один слой в полперекрытия – 4, 5, 6 и в два слоя в полперекрытия – 7, 8, 9 после циклов электрического и теплового старения соответственно.

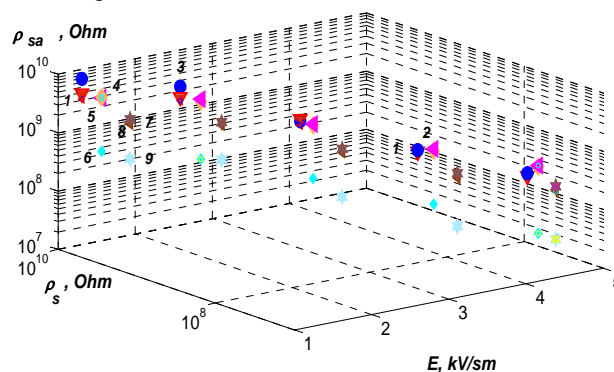


Рис. 6. Динамика изменения удельного поверхностного сопротивления противокоронных полупроводящих покрытий в процессе длительного электрического и теплового старения образцов

Для нелинейного покрытия в виде компаунда отмечается рост удельного поверхностного сопротивления после циклов старения, что связано, очевидно, дополимеризацией компаунда под действием электрического и теплового воздействия, выступающих в роли инициаторов процесса полимеризации. Для нелинейного покрытия в виде ленты после циклов электрического старения также отмечается рост удельного поверхностного сопротивления относительно исходного состояния. После теплового старения – незначительное уменьшение  $\rho_{si}$ . Важно, что во всем диапазоне напряженности электрического поля сохраняется нелинейность удельного поверхностного сопротивления покрытий. Нижняя граница  $\rho_{si}$  после теплового старения соответствует  $10^7$  Ом (см. рис. 6, цифры 3, 6 и 9), что свидетельствует о достаточной эффективности регулирования электрического поля (см. рис. 5, кривые 1 и 2).

Стабильность свойств нелинейных противокоронных полупроводящих покрытий подтверждается результатами испытаний образцов стрежней гидрогенератора СВ 1500/100-12 в исходном состоянии и после комплексного воздействия электрического поля напряжением промышленной частоты, равного  $2,5 \cdot U_l / \sqrt{3}$ , и температуры 120 °С в течение 260 часов. В исходном состоянии: распределением электрического потенциала вдоль нелинейного противокоронного покрытия по длине лобовой части (см. рис. 3). После комплексного воздействия: визуальным отсутствием свечения при подаче испытательного напря-

жения, превышающем номинальное на 50 %; визуальным отсутствием скользящих разрядов при испытании изоляции пазовой части стержней испытательным напряжением, равным  $(3U_i/\sqrt{3+3})$  кВ; внешним видом покрытия; высокими значениями напряжения перекрытия по изоляции.

**Выводы.** Предложена методика для расчета распределения электрического потенциала по поверхности изоляции вдоль лобовой части стержней высоковольтной электрической машины при применении полупроводящих покрытий, обеспечивающих выравнивание напряженности электрического поля и устранение скользящих разрядов.

Получено распределение электрического потенциала по поверхности противокоронного покрытия и изоляции в лобовой части стержня высоковольтной электрической машины при вариациях удельного поверхностного сопротивления полупроводящего покрытия.

Предложенная методика может быть применена для обоснования длины покрытия в лобовой части высоковольтных электрических машин в зависимости от электрофизических характеристик покрытия, электрической изоляции и толщины.

Полученные расчетные данные согласуются с экспериментальными исследованиями распределения потенциала по поверхности противокоронного полупроводящего нелинейного покрытия вдоль лобовой части образцов стержней гидрогенератора на линейное напряжение 20 кВ.

Выполнена экспериментальная проверка стабильности нелинейных свойств специально изготовленных образцов покрытия в процессе длительного электрического и теплового старения, а также образцов стержней гидрогенератора СВ 1500/100-12 в исходном состоянии и после комплексного воздействия электрического поля напряжением 26,25 кВ промышленной частоты и температуры 120 °С в течение 260 часов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grubelnik W., Roberts J., Koerbler B., Marek P. A new approach in insulation systems for rotating machines // *Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, 2005. doi: 10.1109/eiec.2005.1566267.
2. Dal Mult G., Oldrati A., Zuninow F. New insulation systems for upgrading large turbogenerator driven by gas and steam turbines // *Proceedings of 16th International Conference DISEE*. – 2001. – pp. 97-100.
3. *Insulating Systems for High-Voltage Rotating Machines*. – Режим доступа: [https://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1535723465310105/1.02.1\\_HV%20MOTORS\\_EN.pdf](https://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1535723465310105/1.02.1_HV%20MOTORS_EN.pdf).
4. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / В.Г. Огоньков и др.; под ред. В.Г. Огонькова, С.В. Серебрянникова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 304 с.
5. Espino-Cortes F.P., Cherney E.A., Jayaram S. Effectiveness of stress grading coatings on form wound stator coil groundwall insulation under fast rise time pulse voltages // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2005. – vol.20. – no.4. – pp. 844-851. doi: 10.1109/tec.2005.853745.
6. Okamoto T., Yoshiyuki I., Kawahara M., Yamada T., Nakamura S. Development of potential grading layer for high voltage rotating machine // *Conference Record of the 2004 IEEE*

*International Symposium on Electrical Insulation*. doi: 10.1109/elinsl.2004.1380524.

7. Маламуд Р.Е., Багалеи Ю.В. Новая противокоронная эмаль // *Электротехническая промышленность*. – 1963. – №7. – С. 11-15.
8. Маламуд Р.Е., Багалеи Ю.В. Исследование закономерностей получения нелинейных свойств полупроводящих эмалей на основе порошков карбида кремния // *Электричество*. – 1976. – №9. – С. 63-66.
9. Гегенава А.Г. Свойства противокоронного покрытия статорных обмоток электрических машин высокого напряжения // *Электричество*. – 2002. – №9. – С. 64-66.
10. Беспрозванных А.В., Бойко А.Н., Рогинский А.В. Влияние диэлектрического барьера на распределение электрического поля в высоковольтной изоляции электрических машин // *Электротехника і електромеханіка*. – 2018. – №6 – С. 63-67. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.09.
11. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В. Методические указания к решению задач оптимизации конструкций высоковольтных изоляционных промежутков по курсу «Расчет и конструирование изоляции». – Харьков, 1988. – 30 с.
12. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979.
13. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №1. – С. 23-29.
14. Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г., Мирчук И.А., Рогинский А.В. Выявление технологических дефектов в высоковольтной твердой изоляции электроизоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2019. – №4 – С. 53-58. doi: 10.20998/2074-272X.2019.4.08.

#### REFERENCES

1. Grubelnik W., Roberts J., Koerbler B., Marek P. A new approach in insulation systems for rotating machines. *Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, 2005. doi: 10.1109/eiec.2005.1566267.
2. Dal Mult G., Oldrati A., Zuninow F. New insulation systems for upgrading large turbogenerator driven by gas and steam turbines. *Proceedings of 16th International Conference DISEE*, 2001, pp. 97-100.
3. *Insulating Systems for High-Voltage Rotating Machines*. Available at: [https://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1535723465310105/1.02.1\\_HV%20MOTORS\\_EN.pdf](https://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1535723465310105/1.02.1_HV%20MOTORS_EN.pdf) (accessed 15.08.2018).
4. Ogonkov V.G., Serebryannikov S.V. *Elektroizoliatsionnye materialy i sistemy izoliatsii dlia elektricheskikh mashin. V dvukh knigakh. Kn. 2* [Electrical insulation materials and insulation systems for electrical machines. In 2 books. Book 2]. Moscow, Publishing house MEI, 2012. 304 p. (Rus).
5. Espino-Cortes F.P., Cherney E.A., Jayaram S. Effectiveness of stress grading coatings on form wound stator coil groundwall insulation under fast rise time pulse voltages. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, vol.20, no.4, pp. 844-851. doi: 10.1109/tec.2005.853745.
6. Okamoto T., Yoshiyuki I., Kawahara M., Yamada T., Nakamura S. Development of potential grading layer for high voltage rotating machine. *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. doi: 10.1109/elinsl.2004.1380524.
7. Malamud R.E., Bagaley Yu.V. New anti-corona enamel. *Electrotechnical industry*, 1963, no.7, pp. 11-15. (Rus).
8. Malamud R.E., Bagaley Yu.V. Study of the laws of obtaining nonlinear properties of semiconducting enamels based on silicon carbide powders. *Electricity*, 1976, no.9, pp. 63-66. (Rus).
9. Gigenava A.G. Properties of anti-corona coating of stator windings of high voltage electric machines. *Electricity*, 2002, no.9, pp. 64-66. (Rus).



10. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.N., Roginskiy A.V. Effect of a dielectric barrier on the electric field distribution in high-voltage composite insulation of electric machines. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.6, pp. 63-67. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.09.

11. Naboka B.G., Bezprozvannykh A.V. *Metodicheskie ukazaniia k resheniiu zadach optimizatsii konstruktivnykh vysokovol'tnykh izoliatsionnykh promezhukov po kursu «Raschet i konstruirovaniie izoliatsii»* [Methodical instructions to solving structural optimization of high insulation spaces on the course «Calculation and design of isolation»]. Kharkov, 1988. 30 pp. (Rus).

12. Kuchinsky G.S. *Chastichnye razriady v vysokovol'tnykh konstruktivnykh* [Partial discharges in high voltage structures]. Leningrad, Energiia Publ., 1979. (Rus).

13. Bezprozvannykh A.V. High electric field and partial discharges in bundled cables. *Technical electrodynamics*, 2010, no.1, pp. 23-29. (Rus).

14. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G., Mirchuk I.A., Roginskiy A.V. Identification of technological defects in high-voltage solid insulation of electrical insulation structures on the characteristics of partial discharges. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.4, pp. 53-58. doi: 10.20998/2074-272X.2019.4.08.

Поступила (received) 25.10.2019

Безпрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Рогинский Александр Владимирович<sup>2</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 057 7076010,

e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Государственное предприятие «Завод «Электротяжмаш»,  
61089, Харьков, Московский проспект, 299,  
e-mail: roginский.av@gmail.com

G.V. Bezprozvannykh<sup>1</sup>, A.V. Roginskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> SE Plant Electrotyazhmash,  
299, Moskovsky Ave., Kharkiv, 61089, Ukraine.

### Efficiency of application of semiconductive coatings for regulation of electric field in high-voltage insulation of electric machines.

**Introduction.** Intensification of competition and the desire to reduce the cost of high-voltage electric machines due to a significant increase in the electrical and thermal loads of the electrical insulation system complicate the operation of anti-corona coatings on the insulation surface of the stator winding and increase the intensity of discharge processes, which significantly reduce the life of the insulation in case of failure of the coatings. **Purpose.** The analysis of the efficiency of alignment of the electric field along the insulation surface of the stator winding of high-voltage electric machines with semiconductor anti-corona coatings. **Methodology.** A method for calculating the electric potential distribution along the surface of the winding insulation during the use of semiconductive coatings providing alignment decrease the electric field and eliminating the appearance of moving discharges. The reliability of the calculations is confirmed by experimental studies of the potential distribution over the surface of the anti-corona semiconducting non-linear coating along the frontal part of the samples of the rod of the hydrogenerator for a linear voltage of 20 kV. **Practical value.** The proposed methodology for calculating the distribution of the electric field over the surface of the insulation and the anti-corona semiconductive coating can be applied to justify the length of the coating in the frontal part of high-voltage electrical machines depending on the electro-physical characteristics of the coating, electrical insulation, and thickness. The results of an experimental verification of the stability of the nonlinear properties of coatings during prolonged electrical and thermal aging of specially made coating samples are presented. References 14, figures 6.

**Key words:** frontal part of the rod, external partial discharges, electric field, regulation of the electric field, semiconductive coating, surface resistivity, distribution of electric potential, stability of nonlinear properties, long-term electric and thermal aging.