

УДК 621.3.048.8

**ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ СОЗДАНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МЕТОДАМИ 3D-ПЕЧАТИ**

Ляхов М.С.,

студент гр. ЭТА-241, 2 курс

Научный руководитель: Егоров И.С.

к.т.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово**Введение**

Изоляторы, как ключевой элемент любого электрооборудования, должны удовлетворять широкому списку требований, которые определяются функциональными задачами электрооборудования и условиями его эксплуатации.

Традиционные способы изготовления изоляторов из диэлектрических материалов: закалённого стекла, фарфора полимеров и их сочетаний – обеспечивают достаточную электрическую прочность, но обладают рядом индивидуальных ограничений: хрупкость, сложность изготовления нестандартных профилей, высокая стоимость оснастки и т.д. [1].

Литьё термореактивных полимеров – один из наиболее распространённых методов, особенно для производства изоляторов, втулок, корпусов трансформаторов и распределительных устройств. В качестве исходных материалов используются эпоксидные, силиконовые или полиуретановые смолы, обладающие высокой электрической прочностью (>20 кВ/мм), низким $\text{tg } \delta$ ($<0,01$) и высокой адгезией к металлическим вставкам. Процесс включает заливку вакуумированной смеси в форму с последующей полимеризацией при повышенной температуре. Однако недостатками являются длительный цикл производства, необходимость изготовления дорогостоящей многоцветной оснастки и сложность реализации сложных внутренних геометрий [1].

Прессование (горячее и холодное) применяется преимущественно для термопластов и композитов на основе целлюлозы, например электротехнический картон или стеклотекстолит. Горячее прессование термопластов (ABS, PTFE, PE) позволяет получать компоненты с хорошей механической прочностью и стабильными диэлектрическими свойствами, но требует точного контроля температуры и давления. В случае керамических изоляторов – например, на основе Al_2O_3 или титанатов – используется метод холодного изостатического прессования с последующим спеканием при температурах свыше 1400°C . Такие изоляторы обладают исключительно высокой электрической прочностью и термостойкостью, однако их хрупкость, высокая стоимость и энергоёмкость производства ограничивают применение в лёгких или миниатюрных устройствах [4].

Формование из целлюлозной массы (paper pulp moulding или pressboard manufacturing) традиционно применяется в энергетике для изготовления изоляционных прокладок, барьеров и втулок трансформаторов. Целлюлозные материалы отличаются высокой гигроскопичностью и требуют обязательной пропитки маслом или эпоксидными составами для повышения диэлектрической прочности. Несмотря на экологичность и хорошую механическую амортизацию, такие материалы уступают синтетическим полимерам в стабильности при переменной влажности и высокой частоте [1].

Нанесение покрытий (например, электрофоретическое осаждение, погружное или распылительное нанесение эмалей и лаков) используется для обеспечения поверхностной изоляции проводников, печатных плат и статоров электродвигателей. Преимущества – тонкий слой, сохранение габаритов и возможность локального нанесения. Однако такие покрытия редко применяются как основная изоляция в высоковольтных системах, где требуется объёмная электроизоляционная способность.

Общим недостатком всех перечисленных методов является низкая адаптивность к индивидуальному или мелкосерийному производству. Разработка новой формы или оснастки может занять недели и стоит достаточно дорого, что неприемлемо для научных лабораторий, стартапов или быстрого прототипирования новых разработок. Кроме того, традиционные технологии практически не позволяют реализовать градиентные или многослойные диэлектрики с пространственно изменяющейся диэлектрической проницаемостью – структуры, востребованные в современных метаматериалах и градиентных линзах [2].

Таким образом, несмотря на высокую надёжность и соответствие стандартам, традиционные методы производства изоляции становятся менее конкурентоспособными для требований индивидуализации, миниатюризации и функциональной сложности электроизоляционных компонентов малых тиражей. Это создаёт объективные предпосылки для применения аддитивных технологий, способных обеспечить геометрическую свободу, быстрое прототипирование и материал-функциональную настраиваемость без необходимости дорогостоящего оборудования.

Послойное формирование позволяет создавать изоляторы с геометрически оптимизированными формами: ребрами, внутренними каналами для отвода влаги и даже функционально-градиентной диэлектрической проницаемостью [2]. Однако широкому внедрению 3D-печатных изоляторов мешают ряд известных проблем: микропоры, межслойные зазоры, шероховатость поверхности и отсутствие стандартизированных методик оценки характеристик изоляции [1]. Неоднородности становятся очагами концентрации электрического поля и инициируют частичные разряды даже при номинальных напряжениях. Как показано в работе [7], слоистая структура FDM-печатных изделий снижает пробивное напряжение на 15–30% по сравнению с литьевыми аналогами. Оценить влияние на электрические характеристики изоляторов возможно с использованием современных программных комплексов расчёта полей, например, ELCUT [10] который методом конечных элементов позволяет оценить напря-

женность электрического поля в изоляторе с учётом его геометрии, материала и типичных дефектов печати: пор, зазоров, локальных изменений диэлектрической проницаемости. Таким образом, имеется возможность сравнить изготовленный методом 3D-печати изолятор с аналогом, изготовленным традиционным способом (литьем, механической обработкой), и по результатам сравнения оптимизировать конструкцию для изготовления конкретных образцов изоляторов.

Задачами настоящей работы ставятся: обзор современных подходов к 3D-печати изоляторов, соответствие их требованиям энергетики к изоляторам электрооборудования, анализ влияния технологических дефектов печати на электрические характеристики изоляторов на основе численного моделирования электрических полей и, как результат, обоснование перспективности применения 3D-печати для изготовления изоляторов.

Особенности аддитивных технологий для изготовления изоляторов электрооборудования

Выбор метода аддитивного производства напрямую определяет не только геометрическую точность и свойства поверхности готового изолятора, но и его электрические, механические и эксплуатационные характеристики. Для задач создания изоляторов наибольший интерес представляют технологии, способные обеспечить низкую пористость, высокую плотность структуры, гладкую поверхность и возможность использования функциональных композитов.

Основные методы 3D-печати.

FDM/FFF (экструзия термопласта). Метод FDM остаётся наиболее доступным и широко распространённым благодаря низкой стоимости оборудования и простоте эксплуатации. Он позволяет использовать термопласты – ABS, ASA, PC – а также их композиты с наполнителями (ZnO , Al_2O_3), что позволяет повысить трекинговую стойкость и подавление частичных разрядов [7].

Однако у FDM есть принципиальные ограничения для высоковольтных применений:

- слоистая структура приводит к неравномерности механических и диэлектрических свойств;
- межслойные зазоры (толщиной до 20–50 мкм) и внутренние поры создают очаги концентрации электрического поля;
- шероховатость боковой поверхности ($\approx 120\text{--}130$ мкм) снижает гидрофобность и способствует образованию проводящих путей при увлажнении.

Несмотря на это, FDM выбор может быть оправдан при прототипировании специализированных изоляторов, например: для реконструкции изоляторов электрооборудования, где важна скорость изготовления и сложная геометрическая форма; для мелкосерийного производства; для производства твердотельных изоляторов, погруженных в масляный объем.

SLA/DLP (фотополимеризация). Технологии на основе фотополимеризации обеспечивают значительно более высокое качество поверхности (разрешение до 25–50 мкм) и почти безпоровую структуру. Это делает их перспектив-

ными для высоковольтных изоляторов, где даже микронные дефекты могут инициировать частичные разряды.

Особое преимущество SLA – возможность создания градиентных структур. В работе [2] авторы продемонстрировали, как за счёт послойного варьирования концентрации BaTiO_3 в фотосмолу можно выровнять распределение электрического поля у фланцев изолятора и снизить напряжённость на 15–18%.

SLS (селективное лазерное спекание) хорошо зарекомендовал себя для изготовления прочных корпусов из нейлона, но контроль над диэлектрическими свойствами в этом методе затруднён. Введение керамических наполнителей в порошковую смесь технически возможно, но редко используется для функциональных изоляторов.

Material Jetting позволяет печатать многоматериальные структуры с плавным градиентом, что теоретически открывает возможности для «умных» изоляторов. Однако стоимость оборудования и крайне ограниченный выбор диэлектрических фотополимеров делают этот метод затрудненным для энергетики.

Binder Jetting подходит для печати керамики, но требует последующего высокотемпературного спекания, что ведёт к усадке, деформации и образованию микротрещин – факторов, критичных для электрической прочности.

Таким образом, для задач, связанных с изоляторами электрооборудования, наиболее перспективными являются FDM (для быстрого прототипирования и индивидуальных решений) и SLA/DLP (для образцов изоляторов с повышенными требованиями к полемому распределению и долговечности). Выбор конкретного метода должен основываться на балансе между технологичностью, стоимостью, геометрической сложностью и требованиями к надёжности в условиях длительной эксплуатации под номинальным напряжением.

Оценка влияния условий 3D- печати на характеристики изоляторов

Разработка аддитивно изготовленных изоляторов для электрооборудования в условиях условной геометрической свободы технических решений требует не только теоретического обоснования их выбора, но и оптимизации принятых решений в современных программах расчёта электрических полей с последующей экспериментальной верификацией их характеристик в условиях, приближённых к реальной эксплуатации. В рамках настоящего исследования проведено численное моделирование распределения электрического поля в дефектах диэлектрика в программе расчёта полей методом конечных элементов ELCUT [10]. К расчёту принят простой опорный изолятор цилиндрической формы расположенный в однородном электрическом поле с внесенным дефектом структуры (Рисунок 1а).

В модели заданы диэлектрические свойства материала изолятора и газовой среды. Оценивалась напряжённость поля на границе раздела фаз согласно двум сценариям: однородная структура без дефектов (Рисунок 1) и структура с типичными дефектами FDM в воздухе: внутренние поры (100–300 мкм) и межслойные зазоры (20–50 мкм) (Рисунок 2);

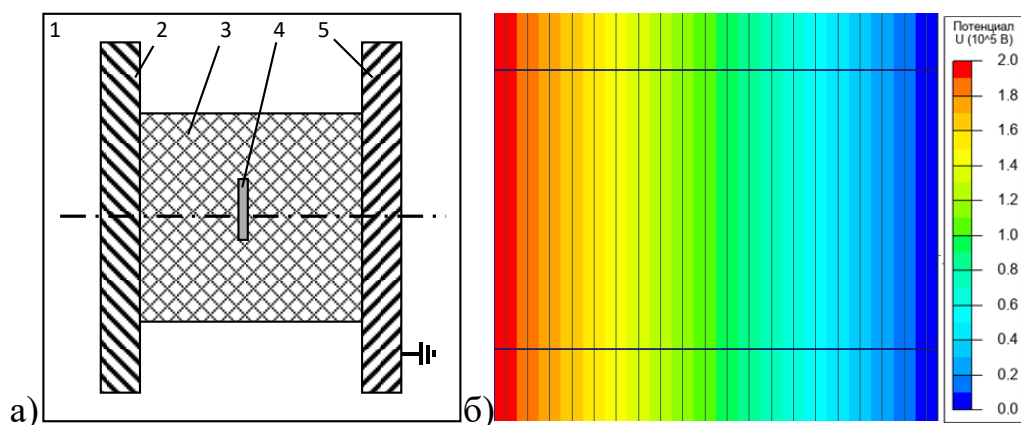


Рисунок 1. Схема численного моделирования (а). Цветовая картина распределения потенциала в теле изолятора при отсутствии дефектов (б): Разность потенциалов 200кВ, изопотенциальные линии 10 кВ. 1- газовая среда, границы области моделирования; 2- потенциальный электрод; 3- цилиндрический изолятор; 4- дефект изолятора; 5- заземленный электрод.

Потенциал электрического поля в изоляторе без дефектов распределен согласно общепринятым представлениям теории электрической прочности материалов (Рисунок 1б). Результаты моделирования изолятора с дефектом позволяют не только оценить потенциальную электрическую прочность, но и сформировать требования к допустимому уровню дефектов и точности печати.

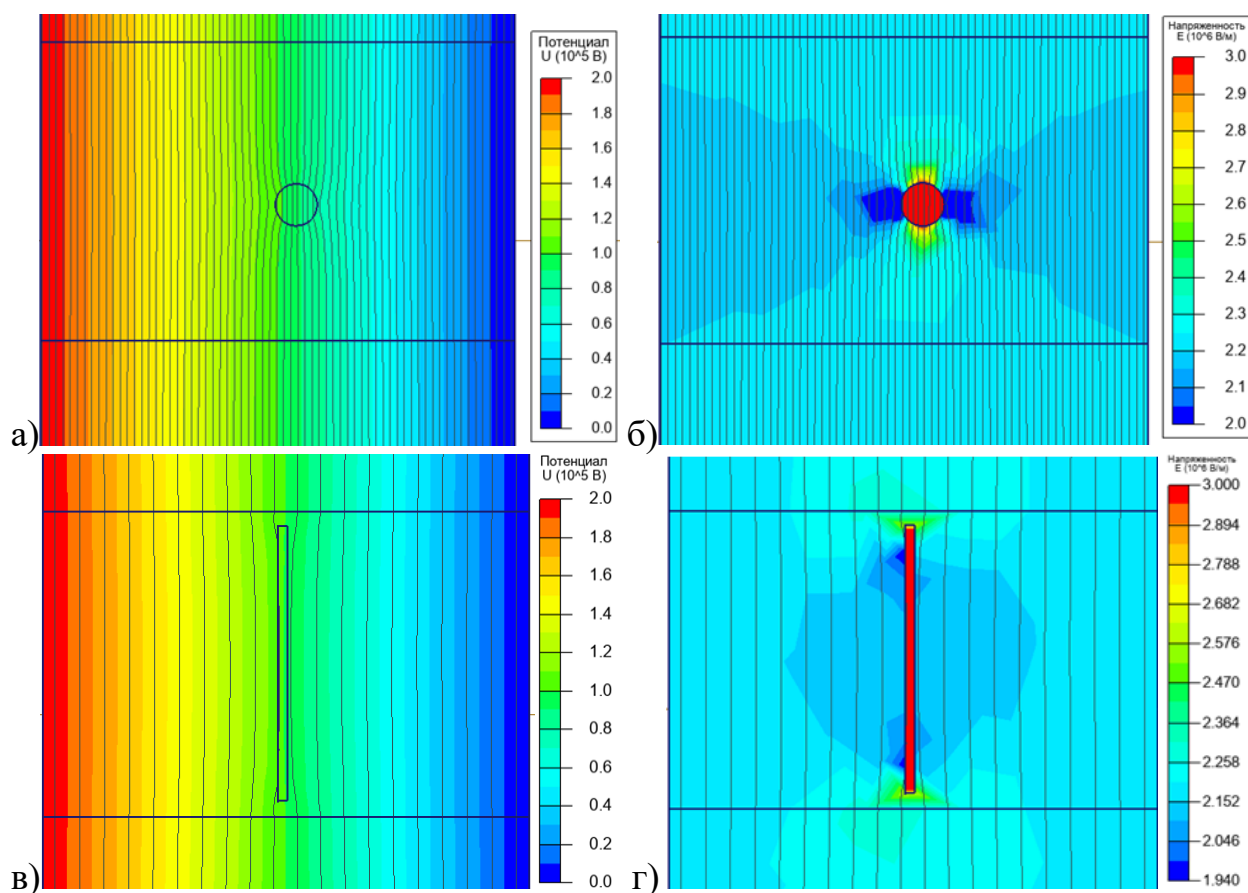


Рисунок 2. Цветовая карта распределения потенциала (а, в) и напряженности электрического поля (б, г) в изоляторе с типичными дефектами FDM в воздухе: внутренние поры (а, б) и межслойные зазоры (в, г). Схема численного моделирования (а). Цветовая картина распределения потенциала в теле изолятора при отсутствии дефектов (б).

На Рисунке 2 приведены результаты расчёта для изолятора с типичными дефектами при печати в воздухе, поэтому цветовая карта напряженности электрического поля верхней границей имеет значение электрической прочности воздушного промежутка в однородном поле (30 кВ/см). На границе раздела наблюдаются искажения электрического поля, выраженные в локальном повышении напряженности, вплоть до значений, близких к пробивной прочности материала. Таким образом, области Рисунка 2б и г обозначенные красным являются потенциальными местами развития частичного пробоя, незавершенного пробоя при воздействиях повышенных напряжений, что далее может выразиться в перекрытии всего изолятора.

Заполнение межслойных зазоров SF_6 в процессе печати (например, за счёт герметичной камеры с подачей газа), значительно повысит общую стойкость структуры к пробую (Рисунок 3). Технологически, такая модификация принтера выглядит выполнимой и не требует специального оборудования.

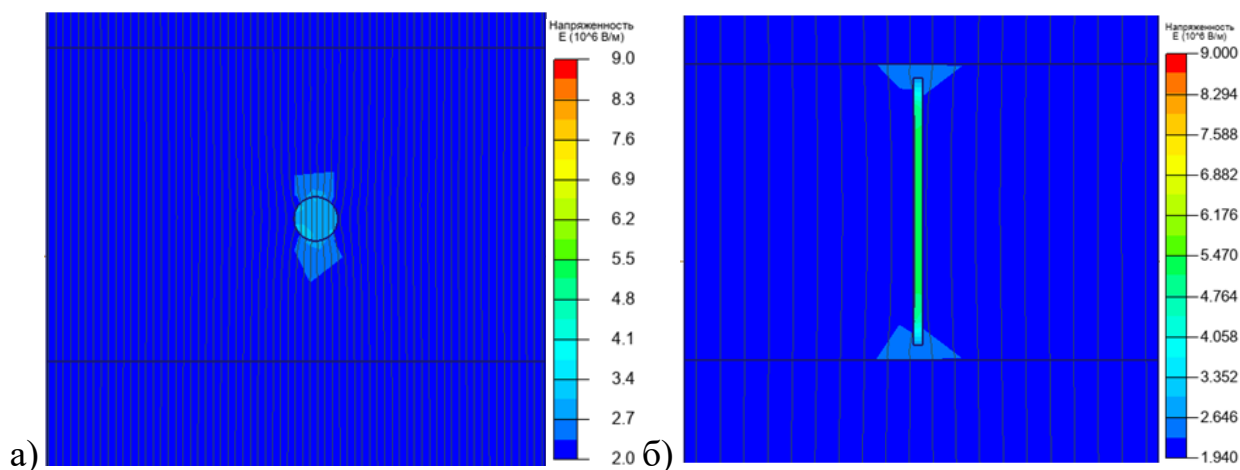


Рисунок 3. Цветовая карта распределения напряженности электрического поля в изоляторе с типичными дефектами FDM в элегазе: внутренние поры (а) и межслойные зазоры (б).

Следует отметить необходимость обработки поверхности изделия для сохранения герметичности объема изолятора в условиях эксплуатации. Кроме того, шероховатость боковой поверхности FDM-печатных изделий без обработки составляет $\approx 120\text{--}130$ мкм, что негативно влияет на гидрофобность и способствует образованию проводящих путей при увлажнении. Для её снижения возможно применение следующих методов:

- химическая полировка – обработка парами растворителей (ацетон для ABS, этилацетат для ASA). Позволяет снизить шероховатость до 20–30 мкм, но требует строгого контроля времени экспозиции во избежание деформации, не обеспечивает гарантированной герметизации;
- нанесение грунтовочного слоя – тонкий слой эпоксидной композиции, заполняющий микронеровности и повышающий адгезию последующих покрытий;
- гидрофобное покрытие – нанесение кремний органических составов, имитирующих поверхность современных композитных изоляторов. Данный метод подходит для мест с повышенной влажностью.

Заключение

В работе проанализированы основные возможности и ограничения методов 3D печати изоляторов для электрооборудования. Моделирование электрических полей с типичными дефектами напечатанных изоляторов показало возможность превышения напряженности электрического поля над электрической прочностью газовой среды дефекта (воздуха), что может привести к пробое изолятора. В качестве решения рассмотрено изменение среды нахождения дефекта на газ с более высокой электрической прочностью (элегаз) с последующей обработкой поверхности изделия, что является технологически доступным перспективным способом повышения электрической прочности изолятора изготовленного методом 3D-печати.

Список литературы:

- 1) Additive Manufacturing in High Voltage Equipment: State of the Art and Future Perspectives / CIGRE Technical Brochure 822. Paris: CIGRE, 2022.
- 2) Zhong L., Liu Y., Wang X. et al. Multi-material and parameter-controllable stereolithography 3D printing of graded permittivity composites for high voltage insulators // Virtual and Physical Prototyping. 2023.
- 3) Divakaran N., Suresh K. V., Rajan K. S. et al. Material extrusion-based 3D printed capacitor optimization: Enhancing performance with ZnO and Cu-CNT reinforced ABS composites // Applied Materials Today. 2024.
- 4) Kadim E. J., Hoziefa A. H., Al-Maaitah M. et al. Nanoparticles Application in High Voltage Insulation Systems // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2021.
- 5) Akin F., Arikan O. Analysis of Solid Insulating Materials Breakdown Voltages Under Different Voltage Types // Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2022.
- 6) Li S., Sanz Izquierdo B., Gao S., Chen Z. Analysis of 3D Printed Dielectric Resonator Antenna Arrays for Millimeter-Wave 5G Applications // Applied Sciences. 2024.
- 7) Uydur C. C. Assessment of Dielectric Strength for 3D Printed Solid Materials in Terms of Insulation Coordination // Applied Sciences. 2024.
- 8) Igathinathane C., Paliwal J., Columbus F. P. et al. Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ // Computers and Electronics in Agriculture. 2008.
- 9) Zhou Y. Research on development and problems of 3D printing technology under intelligent background // Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation and Automation (ICICTA). 2019.
- 10) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://elcut.ru/>