

ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Д.В. Голубев, С.А. Елфимов,

А.А. Нестеренко, Р.М. Матвиенко

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, Россия

В данном докладе рассматриваются аспекты разработки и оптимизации изоляционных конструкций для высоковольтного электротехнического оборудования с применением твердой полимерной изоляции (ТПИ). Исследование направлено на анализ физико-химических параметров современных изоляционных материалов и конструкций, а также влияние различных факторов на их электрическую прочность и надежность.

Основное внимание уделено определению минимально допустимых толщин изоляционных слоев для обеспечения надежной работы оборудования при различных уровнях напряжения, влиянию частичных разрядов на электрическую прочность и долговечность изоляции, а также методам их контроля и предотвращения.

Представлены результаты экспериментальных исследований, которые позволяют более точно проектировать изоляционные конструкции и оптимизировать их параметры для улучшения эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: *эпоксидные компаунды, твердая полимерная изоляция, электрическая прочность, частичные разряды, высоковольтное оборудование, изоляционные конструкции.*

В последние десятилетия наблюдается значительный рост использования распределенной энергетики, что требует внедрения современных технологий и материалов для повышения надежности и эффективности энергетического оборудования. Одним из ключевых аспектов в этой области является разработка и применение новых типов изоляционных материалов, способных обеспечить высокую электрическую прочность и долговечность оборудования. Одним из перспективных материалов для изоляции оборудования распределенной энергетики является твердая полимерная изоляция, в частности, эпоксидные компаунды [1–3].

Эпоксидные компаунды широко применяются благодаря их высоким механическим и диэлектрическим характеристикам, устойчивости к воздействию внешних факторов и возможности адаптации под конкретные требования. Однако для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик важно учитывать различные факторы, влияющие на электрическую прочность этих материалов.

Электрическая прочность различной ТПИ может существенно отличаться и обычно при кратковременном воздействии напряжения промышленной частоты и температуре

20 °С обычно лежит в диапазоне 15–40 кВ/мм (при стандартном определении электрической прочности в слабонеоднородном электрическом поле) [4; 5].

Следует отметить, что электрическую прочность определяют не только неоднородности на молекулярном уровне, но и неоднородности изоляции на микроуровне (например, частицы наполнителя) и даже на макроуровне – газовые включения (поры, трещины и отслоения) [7; 8].

Причем определяющим для электрической прочности является то, насколько велики внутренние термомеханические напряжения вблизи той или иной неоднородности, в том числе около залитых металлических элементов, формирующие некую дополнительную внешнюю силу, воздействующую на межмолекулярные связи.

Таким образом, повышения электрической прочности литой изоляции можно достичь путем подбора смол и компаундов с увеличенной энергией диссоциации химической связи и низким уровнем локальных термомеханических напряжений в материале. Поэтому одним из важнейших направлений повышения электрической прочности литой изоляции является выбор типа, размера и структуры наполнителей эпоксидной изоляции.

Электрическая прочность эпоксидной изоляции повышается при использовании наполнителя с частицами nano размера (от 7 до 80 нанометров), а при использовании частиц микро размера (т.е. порядка одного микрона) электрическую прочность можно повысить за счет улучшения объемной дисперсии (Рисунок 1) [9].

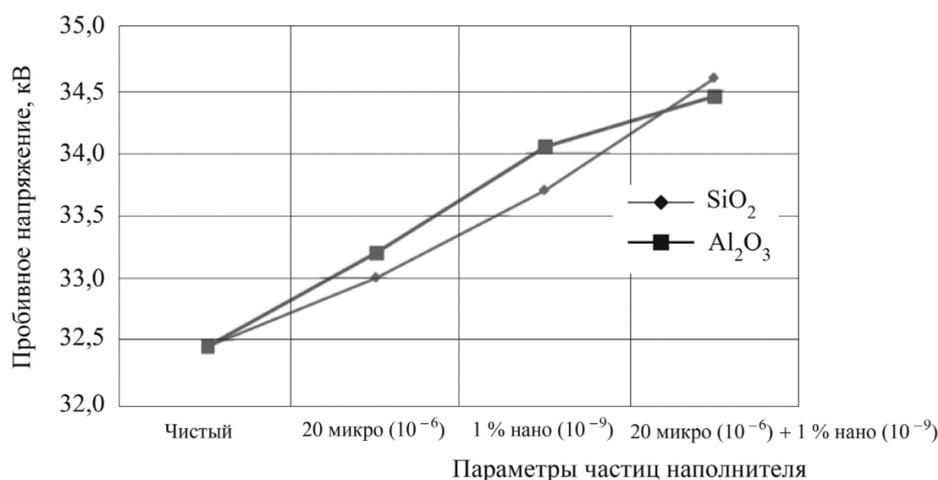


Рисунок 1. – Зависимость пробивного напряжения образцов ТПИ толщиной 1мм от наличия наполнителя, его типа и размера частиц наполнителя

Принято считать, что повышение электрической прочности и других параметров эпоксидных компаундов при уменьшении размеров частиц наполнителя связано с увеличением поверхности взаимодействия частиц наполнителя и эпоксидной смолы [10].

Для обеспечения необходимой электрической прочности и надежности изоляции важно не только правильно подбирать материалы и наполнители, но и учитывать оптимальную толщину изоляции в зависимости от условий эксплуатации и типа электрического поля. Особенно это актуально для оборудования распределенной энергетики, где необходимо учитывать влияние частичных разрядов и термомеханических напряжений на долговременную электрическую прочность материала [10; 11].

Толщина ТПИ определяется, как правило, исходя из условия равенства максимальной напряженности в этой изоляции (в слабонеоднородном электрическом поле эта напряженность выбирается как максимальная локальная напряженность, а в резконеоднородном электрическом поле – как средняя напряженность) допустимой напряженности поля.

Для приближенных расчетов изоляции при максимальной рабочей температуре 125 °С в резко неоднородном электрическом поле электрическую прочность независимо от толщины принимают для компаундов марки ЭЗК-1 – =2,5 кВ/мм, а для ЭЗК-31 – =2,2–2,4 кВ/мм. В равномерном электрическом поле при температуре до 125 °С длительная электрическая прочность для компаунда марки ЭЗК-31 равна 6–7 кВ/мм. В электроизоляционной конструкции рекомендуется подбирать такую степень неоднородности электрического поля, чтобы величина максимальной напряженности поля не превышала 10 кВ/мм.

В резконеоднородном электрическом поле средние допустимые напряженности электрического поля составляют примерно 1–2 кВ/мм практически независимо от толщины ТПИ. Допустимые напряженности электрического поля в литой эпоксидной изоляции, находящейся в слабонеоднородном электрическом поле и без частичных разрядов составляют около 7–9 кВ/мм (максимальное локальное действующее значение).

Была проведена оценка необходимой толщины ТПИ комплектно-распределительного устройства с литой изоляцией (КРУТ) – рисунок 2.



Рисунок 2. – Оценка толщины литой эпоксидной изоляции в КРУ с твердой изоляцией 10–35 кВ (пофазное исполнение)

Если в ТПИ возможно появление частичных разрядов с интенсивностью более 10–20 пКл, то рабочая допустимая напряженность электрического поля снижается почти в два раза, поскольку каналы возникающих частичных разрядов формируют области повышенных электрических и термомеханических напряженностей.

В любом случае напряженность электрического поля в такой изоляции с возможным появлением частичных разрядов не должна быть выше, чем допустимая напряженность изоляции, находящейся в резконеоднородном электрическом поле.

Толщина ТПИ в токопроводах является одним из ключевых факторов обеспечения не только требуемой электрической прочности, но и необходимого теплового режима, а значит – и номинального тока.

При оценке минимально допустимой толщины изоляции наряду с электроизоляционными характеристиками компаундов следует учитывать условия работы твердой изоляции в токопроводах:

- резконеоднородные электрические поля на номинальное напряжение 6–20 кВ;
- слабонеоднородные электрические поля на напряжение 20–110 кВ;
- достаточно большие объемы твердого диэлектрика;
- высокие рабочие температуры, связанными с протеканием значительного рабочего тока и тока короткого замыкания, а также усложненным теплоотводом;
- необходимость исключения частичных разрядов интенсивностью более 10 пКл в токопроводах на номинальное напряжение 35–110 кВ.

Определяющими при выборе толщины литой изоляции в токопроводах являются длительные воздействия напряжения.

Допустимая электрическая прочность литой эпоксидной изоляции в резконеоднородном электрическом поле токопроводов можно оценить как 1 кВ/мм (действующее значение). Это означает, что толщина фазной изоляции токопроводов на напряжение 10 кВ должна составлять не менее 6 мм, а на напряжение 20 кВ – не менее 12 мм.

Допустимая максимальная напряженность электрического поля на поверхности токоведущих элементов при больших «активных» объемах ТПИ и в слабонеоднородных электрических полях составляет около 5–7 кВ/мм (амплитудное значение). Оценки фазной изоляции в этом случае для токопроводов на напряжение 35 кВ дают значение 8 мм, а для токопроводов 110 кВ – около 20 мм (при диаметре токоведущей медной жилы 35 мм). Расчеты проведены для изоляции без частичных разрядов интенсивностью более 10 пКл.

Необходимо отметить, что частичные разряды могут возникать уже в процессе эксплуатации оборудования, поэтому выбор толщины литой эпоксидной изоляции по условию слабонеоднородного электрического поля и отсутствия ЧР может проводиться, если предполагается контроль ЧР в эксплуатации.

Сводные данные оценки минимально допустимой толщины литой эпоксидной изоляции приведены на рисунке 3.

Показатели расчета толщины ТПИ для токопроводов демонстрируют закономерное увеличение с ростом класса номинального напряжения. Это объясняется необходимостью обеспечения достаточной изоляции для предотвращения пробоя при высоких напряжениях. Толщина ТПИ в токопроводах Duresca также увеличивается с ростом напряжения, но значения немного выше, чем у расчетной линии. Это связано с дополнительными мерами безопасности. Расчет толщины ТПИ для комплектно-распределительных устройств показывает схожие тенденции с расчетом для токопроводов, но значения несколько ниже. Это может свидетельствовать о различиях в конструктивных особенностях и условиях эксплуатации данных устройств. Толщина ТПИ в силовых кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена также увеличивается с ростом напряжения. Значения

находятся между показателями для токопроводов и комплектно-распределительных устройств.

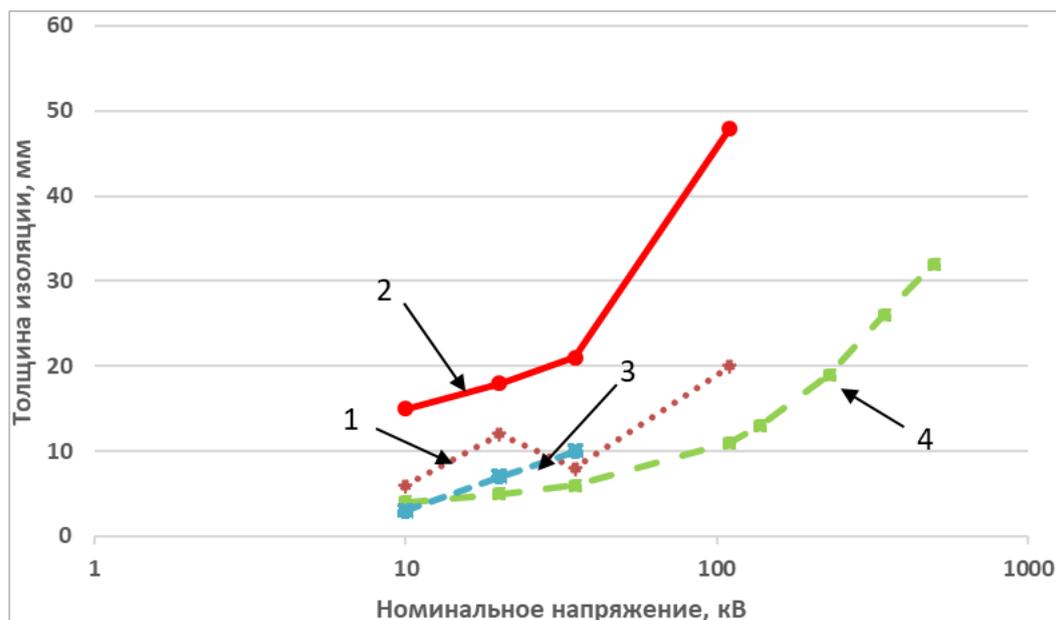


Рисунок 2. – Зависимость толщины литой эпоксидной изоляции в токопроводах (линия 1 – расчет, линия 2 – токопроводы Duresca), комплектно-распределительных устройств с твердой изоляцией (линия 3 – расчет), сшитого полиэтилена в силовых кабелях (линия 4) на различные классы номинального напряжения

Заключение. Представленные расчеты минимально допустимой толщины литой эпоксидной изоляции позволяют более точно проектировать изоляционные конструкции, учитывая как электрическое поле, так и эксплуатационные условия.

В заключение, разработка и применение современных эпоксидных компаундов с учетом особенностей электрического поля и контроля частичных разрядов позволяет значительно повысить надежность и долговечность высоковольтного электротехнического оборудования.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0017).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mayer. D. «Profile extrusion of/with thermoplastic elastomers» / TPE Magazine. June 2009. S. 26–31.
2. К.И. Черняк, "Эпоксидные компаунды и их применение", Судпромгиз, Л, 1963.
3. В. Журавлев, «Заливка и пропитка в электротехнике и электронике. Новейшие технологии для российской промышленности», Новости электротехники, № 5(113)-6(114), 2018.
4. Вариводов В.Н., «Внутренняя изоляция газонаполненного оборудования сверхвысокого и ультравысокого напряжения», Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2000.
5. Вариводов В.Н. «Зависимость электрической прочности литой эпоксидной изоляции от размеров в слабонеоднородном электрическом поле» / Вариводов В.Н., Демкин А.А., Емельянова Л.И. – Энергоатомиздат, «Электротехника», 1983 г., № 1 – С. 33–36.

6. Sato J. Solid insulated switchgear and investigation of its mechanical and electrical reliability / Sato J. [et al.] – Electrical Engineering in Japan. – 2011. – Т. 174. – №. 4. – С. 28–36.
7. Энциклопедия по машиностроению XXL. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mashxxl.info>. – Дата доступа: 27.08.2024
8. Вариводов В. Н. Технологические аспекты применения литой полимерной изоляции для высоковольтных распределительных устройств и шинопроводов / В. Н. Вариводов, Д. И. Ковалев, С. С. Жуликов [и др.] // Электрические станции. – 2020. – № 10(1071). – С. 31–39.
9. Воробьев Г.А. Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие / Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю. Д. Королев [и др.]. – Томск: Издательство ТПУ, 2003.
10. Vouyovitch, L. “Dielectric Breakdown of Epoxy-Based Composites: Relative Influence of Physical and Chemical Aging” / L. Vouyovitch, N.D. Alberola, L. Flandin et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – vol. 13. – no. 2. – P. 282–292. – 2006.
11. Sato, J. “Solid Insulated Switchgear and Investigation of its Mechanical and Electrical Reliability” / J. Sato, K. Susumu, S. Osamu et al. Electrical Engineering in Japan. – vol. 174. – 2011. – no. 4. – P. 28–36.