

УДК 537.226

Электрическая прочность литой эпоксидной изоляции в квазиоднородных электрических полях

В. Н. Вариводов

ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина», Москва, Россия

Приведены результаты экспериментальных исследований и дан анализ литературных данных по электрической прочности литых эпоксидных компаундов (ЛЭИ) при воздействии квазиоднородных электрических полей применительно к условиям их работы в газонаполненной высоковольтной аппаратуре. Выявлены основные закономерности влияния на электрическую прочность размеров изоляции, конфигурации электрического поля, формы воздействующего напряжения и времени его воздействия.

Эпоксидные компаунды обладают весьма удачным сочетанием электроизоляционных, механических и адгезионных свойств, которые способствуют их применению в газонаполненном высоковольтном оборудовании.

Для изоляторов таких газонаполненных аппаратов как комплектно-распределительные устройства с элегазовой изоляцией используются термореактивные компаунды, изготавливаемые путем литья под вакуумом, поскольку в этом случае электрическая прочность материала максимальна.

Внутри эпоксидного компаунда в изоляторах, как правило, устанавливается металлическая арматура, необходимая как для крепления изоляторов и поддержания токоведущих элементов, так и для формирования требуемого электрического поля.

Для газонаполненного высоковольтного оборудования характерны квазиоднородные электрические поля, позволяющие максимально использовать электроизоляционные свойства применяемых диэлектриков.

Известно, что кратковременная электрическая прочность эпоксидных компаундов при испытаниях напряжением промышленной частоты составляет около 20—40 МВ/м (амплитудное значение) и зависит от типа компаунда, размеров изоляции, степени неоднородности электрического поля, наличия частичных разрядов в толще изоляции, а также условий проведения испытаний [1].

Условия работы ЛЭИ в газонаполненной высоковольтной аппаратуре весьма специфичны, кроме использования внутренней, залитой компаундом металлической арматуры, для нее характерно длительное воздействие высоких напряженностей электрического поля (величиной около 50—70 кВ/см) при квазиоднородном характере этого поля и толщине изоляции от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров.

Экспериментальные исследования и статистический анализ зависимости электрической прочности ЛЭИ с залитой металлической арматурой при изменении толщины изоляции от 1 до 36 мм (а в отдельных случаях до 125 мм) и при различной конфигурации квазиоднородного электрического поля показывают [2], что снижение кратковременной электрической прочности ЛЭИ в таких условиях при увеличении межэлектродного расстояния на порядок не превышает 25 % и обусловлено изменением «активного» объема диэлек-

трика — такой области, где напряженность электрического поля составляет не менее 85 % от максимальной напряженности в промежутке (рис. 1).

Для реальных изоляционных конструкций зависимость электрической прочности литой эпоксидной изоляции от ее размеров лучше всего описывается соотношением [2]:

$$E_{\text{пр}} = (E_{\text{пр.0}} - E_{\text{пр.н}})V^{-1/\beta} [-\ln(1 - P)]^{1/\beta} + E_{\text{пр.н}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{пр.0}}$ — электрическая прочность эпоксидного компаунда с единичным «активным» объемом при вероятности пробоя, равной 0,63;

V — относительное изменение «активного» объема компаунда в выбранной конструкции по сравнению с единичным «активным» объемом;

β — мера дисперсии ($\beta = 2,7$);

P — вероятность пробоя;

$E_{\text{пр.н}}$ — нижний предел электрической прочности.

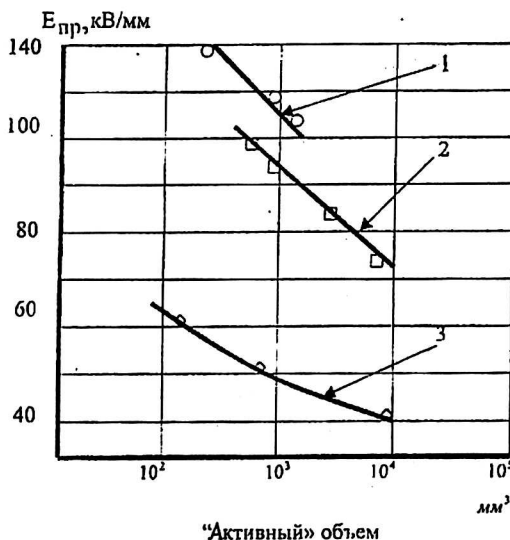


Рис. 1. Зависимость электрической прочности компаунда КЭ-3 от «активного» объема при кратковременном воздействии напряжения:

oo — эксперимент; — — расчет по соотношению (1); 1 — напряжение постоянного тока; 2 — импульсное напряжение; 3 — напряжение промышленной частоты

Значение нижнего предела кратковременной электрической прочности для компаундов, применяемых в газонаполненной высоковольтной аппаратуре, по данным статистического анализа составило 13—15 кВ/мм, как при наличии частичных разрядов небольшой интенсивности (до 10 пКл), так и их отсутствии, а наиболее частое значение электрической прочности оказалось равно для изоляции без частичных разрядов и при «активном» объеме 10^{-3} см^3 — 50—60 кВ/мм [2].

Вследствие определяющего влияния «активного» объема на электрическую прочность литой эпоксидной изоляции в квазиоднородных полях можно сделать вывод, что электрическая прочность ЛЭИ определяется локальными неоднородностями диэлектрика, находящегося в области электрического поля с напряженностью, близкой к максимальной [3].

Литая эпоксидная изоляция может содержать локальные неоднородности различного типа: газовые включения внутри и раковины на поверхности изоляторов; металлические включения как на поверхности, так и внутри диэлектрика; отслоения на границе поверхности металлической арматуры, установленной в теле изолятора, и эпоксидного компаунда; трещины внутри диэлектрика; повышенную неоднородность структуры самого компаунда.

Газовые включения значительно снижают электрическую прочность эпоксидного компаунда, находящегося в квазиоднородном электрическом поле (рис. 2). Механизм влияния частичных разрядов (ЧР) в газовых включениях на электрическую прочность изоляции, видимо, связан с появлением высоких локальных напряженностей поля в диэлектрике.

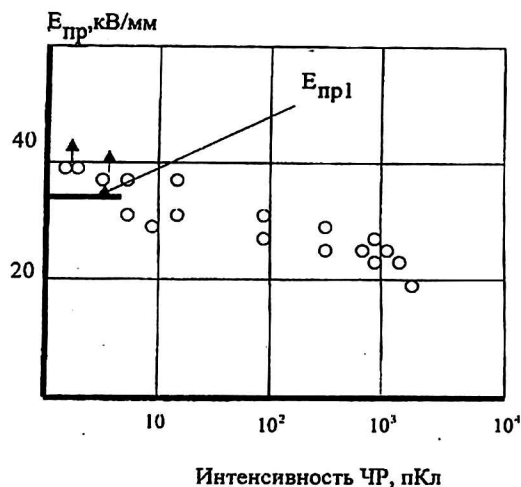


Рис. 2. Зависимость кратковременной электрической прочности ЛЭИ в квазиоднородном электрическом поле при воздействии напряжения промышленной частоты от интенсивности частичных разрядов:

○ — эксперимент; $E_{пр1}$ — электрическая прочность изоляции без ЧР при вероятности пробоя $P = 0,05$

Даже при воздействии кратковременного напряжения среднее пробивное напряжение, по данным исследования большого количества образцов, может снижаться из-за частичных разрядов в газовых включениях на 20—50 %.

Электрическая прочность ЛЭИ при воздействии напряжения постоянного тока и импульсного напряжения также зависит от «активного» объема диэлектрика, причем эта зависимость выражена более явно (см. рис. 1).

Как правило, «кривые жизни» ЛЭИ для средних значений электрической прочности, находящейся в слабо неоднородном электрическом поле при воздействии напряжения промышленной частоты, хорошо аппроксимируются с помощью соотношения [3]

$$E_{\tau} = E_0 \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-1/m}, \quad (2)$$

где τ_0 — время до пробоя изоляции при воздействии электрического поля напряженностью E_0 ;

m — показатель степени, характеризующий скорость старения изоляции, равный 10—16.

Однако было обнаружено (рис. 3), что с увеличением длительности воздействия напряжения более нескольких месяцев, и особенно при малых вероятностях пробоя, наблюдается некоторое расхождение экспериментальных и расчетных данных, которое характеризуется увеличением экспериментально определенного времени до пробоя к рассчитанному по соотношению (2). Это свидетельствует о наличии нижнего предела длительной электрической прочности.

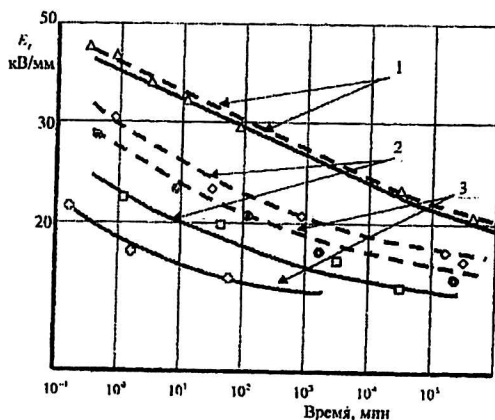
В этом случае наилучшая аппроксимация получается при использовании следующего соотношения, учитывающего как нижний предел длительной электрической прочности E_{τ}^H , так и то, что функция распределения времени до пробоя хорошо описывается экстремальным законом Вейбулла

$$\tau = \tau' \left(\frac{E_0 - E_\tau^H}{E_\tau - E_\tau^H} \right)^m \left(\ln \frac{1}{1-P} \right)^{1/\beta_\tau}, \quad (3)$$

- где E_0 — наиболее частое значение электрической прочности при кратковременном воздействии поля с напряженностью E_0 ;
 E_τ^H — напряженность электрического поля при длительном воздействии напряжения;
 P — вероятность пробоя;
 β — мера дисперсии времени до пробоя.

Рис. 3. Зависимость электрической прочности ЛЭИ от времени воздействия напряжения промышленной частоты:

- — вся выборка образцов;
- — изоляция без ЧР; 1 — вероятность пробоя — 0,5; 2 — вероятность пробоя — 0,1; 3 — вероятность пробоя — 0,05



Расчеты по соотношению (3) дают хорошее совпадение с экспериментальными данными, если нижний предел длительной электрической прочности равен примерно 6–10 кВ/мм (см. рис. 3).

Необходимо отметить, что нижний предел длительной электрической прочности E_τ близок к минимальным значениям напряженности возникновения частичных разрядов для исследованной изоляции (10–13 кВ/мм) при интенсивности этих разрядов на уровне 1–10 пКл, а также нижнему пределу кратковременной электрической прочности.

Первый факт хорошо согласуется с известными представлениями об определяющей роли частичных разрядов в снижении срока службы изоляции по мере увеличения времени воздействия напряжения, а второй — с предположением о том, что электрическая прочность полимерной изоляции прежде всего зависит от величины локальной напряженности поля, в том числе появляющейся в диэлектрике при возникновении каналов частичных разрядов.

Необходимо отметить, что найденная величина нижнего предела длительной электрической прочности является довольно высоким. Однако оно было получено при принятой для оборудования сверхвысокого напряжения специальной химической обработке электродов перед их заливкой для получения высокой адгезии. Поэтому при изменении технологии изготовления изоляции нижний предел электрической прочности может и отличаться от вышеуказанного, но нет оснований считать, что выявленные закономерности в этом случае не будут соблюдаться.

Что касается длительной электрической прочности литой эпоксидной изоляции при воздействии напряжения постоянного тока, то проведенные исследования показывают, что наклон вольт-временных зависимостей в этом случае, по крайней мере, не больше, чем наклон вольтвременных зависимостей при испытаниях на переменном напряжении [2]. Это означает, с учетом более высоких значений электрической прочности эпоксидных компаундов

при кратковременном воздействии напряжения постоянного тока, что даже при пессимистической оценке допустимые напряженности электрического поля при длительном воздействии напряжения постоянного тока примерно в 1,5 раза выше, чем аналогичные параметры при воздействии напряжения переменного тока.

В области малых концентраций газовых включений (менее 10^2 — 10^3 см⁻³) резкое ухудшение электроизоляционных характеристик наблюдается, если газовые включения имеют размер более 300 мкм, причем интенсивность ЧР в этом случае, как правило, превышает 20—50 пКл [4]. Электрическая прочность ЛЭИ с частичными разрядами интенсивностью на уровне 1 пКл практически не отличается от электрической прочности изоляции без частичных разрядов. С увеличением концентрации газовых включений более чем 10^2 см⁻³ даже при интенсивности ЧР менее 50 пКл электрическая прочность ЛЭИ как кратковременная, так и длительная существенно снижаются [4].

Наряду с рабочим напряжением на изоляцию газонаполненной высоковольтной аппаратуры в эксплуатации периодически воздействуют импульсные напряжения. Зависимость импульсной электрической прочности от времени воздействия напряжения хорошо описывается следующим соотношением [5]:

$$E_{\text{имп } \tau} = K_{\text{имп}} K_{\text{кум}} E_{\text{пр}} \left[1 - \left(\frac{E_{\text{раб}}}{E_{\text{пр}}} \right)^m (m+1) \frac{\tau}{\tau_{\text{кр}}} \right]^{\frac{1}{m+1}},$$

- где $E_{\text{раб}}$ — рабочая напряженность электрического поля;
 $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность, определенная без предварительной выдержки под напряжением и путем плавного подъема напряжения в течение времени;
 $K_{\text{кум}}$ — коэффициент куммулятивности;
 $K_{\text{имп}}$ — коэффициент соотношения импульсной электрической прочности изоляции при кратковременном воздействии напряжения промышленной частоты.

Коэффициент импульса ЛЭИ, находящейся в слабонеоднородном электрическом поле, практически одинаков как при воздействии коммутационной, так и грозовой волны и уменьшается при увеличении размеров изоляции от 1,5—1,6 до 1,25.

Сопоставление длительной электрической прочности при воздействии импульсного и рабочего напряжений промышленной частоты показывает, что расчет изоляции может быть осуществлен исходя из электрической прочности при длительном воздействии рабочего напряжения [5].

Влияние температуры и механических нагрузок, если они далеки от предельных (составляют не более 80 % от разрушающих нагрузок), можно считать несущественными [3].

Для изоляции без частичных разрядов расчет ведется следующим образом.

Определяются статистические параметры используемого компаунда $E_{\text{пр}}$, β , $E_{\text{пр.н}}$ при заданном «активном» объеме диэлектрика. Задаваясь требуемой вероятностью пробоя в соответствии с (1) и (3), можно рассчитать допустимую напряженность электрического поля.

Сопоставляя полученное значение с максимальной напряженностью поля в промежутке при воздействии рабочего напряжения, оценивается приемлемость конструкции для обеспечения требуемой надежности изоляторов. При

неудовлетворении этого требования или выявлении излишних запасов размеры изоляции должны быть увеличены или уменьшены, а иногда изменена и вся конструкция.

Если измерение частичных разрядов не проводится, а вероятность их появления достаточна, рабочая напряженность в ЛЭИ в соответствии с результатами проведенных исследований должна составлять не более 1—1,5 кВ/мм, так как именно при этих значениях напряженности электрического поля возможно появление частичных разрядов в наиболее опасных газовых включениях — плоских щелях, расположенных на границе раздела высоковольтных электродов и эпоксидного компаунда.

Для повышения механической прочности эпоксидной изоляции в высоковольтном аппаратостроении чаще всего используется комбинация стеклопластика и эпоксидной смолы, причем отдают предпочтение стекловолокну однонаправленной ориентации. Примером применения такой изоляции являются стеклоэпоксидные вводы внутренней установки.

Стеклопластиковые элементы без проведения дополнительных конструктивных и технологических доработок не удовлетворяют требованиям трекинговости и дугостойкости, в процессе хранения подвержены воздействию атмосферы (например, внутрь стеклопластика может проникать влага), а в процессе эксплуатации стеклопластик может абсорбировать продукты разложения элегаза. Это обусловлено относительно пористой структурой стеклопластиков. Наличие пор также приводит к тому, что, как было показано выше, рабочая напряженность поля в такой изоляции не может быть выше чем 1—1,5 МВ/м.

Для улучшения характеристик стеклопластиковой изоляции иногда применяется фторопластовое или лавсановое покрытие, в этом случае уменьшается влияние внешней среды.

Однако основным направлением повышения механической прочности является применение органопластиков, т. е. композиционных материалов, где в качестве наполнителя применяется не стекло, а полимерные ткани или волокна, имеющие лучшую адгезию со связующим. Наиболее известным за рубежом является кевлар, в котором наполнителем служит одноименное полимерное волокно.

В отечественной технике высоких напряжений все большее применение находит аналогичный по структуре материал со сходными с кевларом электрофизическими и механическими характеристиками — терлон. Как кевлар, так и терлон обладают высокой механической прочностью, отличной адгезией связующего и наполнителя и, соответственно, высокой электрической прочностью. В качестве наполнителя может использоваться и лавсан.

Так как электрическая прочность указанных наполнителей не уступает электрической прочности эпоксидной смолы, то выбор допустимых напряженностей электрического поля может осуществляться на основе разработанной методики для ЛЭИ. В этом случае допустимая напряженность электрического поля в отличие от стеклопластиков может достигать 5—6 МВ/м, т. е. быть в 3—4 раза выше.

Необходимо отметить, что использование различных наполнителей ведет к изменению диэлектрической проницаемости композиционных материалов, что нужно учитывать при расчете максимальных рабочих напряженностей электрического поля.

Л и т е р а т у р а

1. Вариводов В. Н., Демкин А. А., Емельянова Л. И. Зависимость электрической прочности литой эпоксидной изоляции от размеров в слабонеоднородном электрическом поле// Электротехника, Энергоатомиздат, 1983, № 1. С. 33—36.
2. Вариводов В. Н., Демкин А. А. Электрическая прочность эпоксидной изоляции в слабонеоднородном электрическом поле// Электричество. — М.: Энергоатомиздат, 1986. № 9. С. 43—47.
3. Вариводов В. Н., Рахматулин А. В. Исследование влияния технологических факторов на электроизоляционные характеристики литой эпоксидной изоляции// Там же, № 11. С. 69—72.
4. Бортник И. М., Вариводов В. Н., Трубочев С. Г., Шамрай Б. Н. Работоспособность литой эпоксидной изоляции, подверженной воздействию частичных разрядов// Междунар. конф. по высоковольтным электротехническим системам — СИГРЭ: Доклад 15-10, 1982, Париж.
5. Вариводов В. Н., Панов А. А. Расчет литой эпоксидной изоляции газонаполненных высоковольтных устройств переменного напряжения// НТС ЭП. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, конденсаторы, 1977. Вып. 10(78). С. 11—14.

The electrical strength of mold epoxy insulation in quasi-electrical fields

V. N. Varivodov

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

In the article the results of experimental investigations and analysis of reference data at affect of quasi-uniform electrical fields for conditions of high voltage gas — filled apparatus service are shown. The main laws of insulation size, configuration of electrical field, form of applied voltage (and its duration) influence on electrical strength were found.