

УДК 621.3.048

ДАТЧИК ВЫСОКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

© 2019 г. А. В. Голенищев-Кутузов¹, *, В. А. Голенищев-Кутузов¹,
Г. Д. Марданов¹, А. В. Семенников¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Казанский государственный энергетический университет”, Казань, Россия

*E-mail: catpocebe@gmail.com

Предложен бесконтактный способ измерения напряженности и пространственной ориентации высоких электрических полей промышленной частоты, основанный на электрооптическом эффекте с применением фотонного кристалла в качестве датчика. Показана возможность более точного измерения напряженности градиентов электрических полей до $10 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ дистанционным способом на изоляции высоковольтных систем.

DOI: 10.1134/S0367676519010290

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большая необходимость обнаружения электрических полей, генерируемых различными промышленными источниками: высоковольтными трансформаторами, линиями передачи, коммутаторами. Их поля оказывают сильное влияние не только на окружающие электрические и электронные устройства, но и на обслуживающий персонал. Поэтому необходимо бесконтактное обнаружение источников разнообразных электрических полей и степени их влияния на окружающее пространство [1–5]. Более того, локальные перенапряжения в высоковольтных изоляторах, обмотках трансформаторов и кабелях могут свидетельствовать о наличии дефектов, приводящих, в конечном результате, к повреждению или даже разрушению изоляционных элементов. Поэтому весьма важно контролировать локальные перенапряжения в процессе эксплуатации изоляции дистанционно и бесконтактно. Однако до последнего времени подобные способы контроля не нашли широкого применения в высоковольтных системах, хотя уже существуют отдельные попытки их создания [6, 7]. Незавершенность дистанционных методов контроля перенапряжений в высоковольтной изоляции стала главной причиной наших исследований.

Целью наших изысканий было создание способа бесконтактного дистанционного измерения электрических полей на высоковольтных изоляторах различных видов, в котором устранены недостатки предыдущих разработок.

Техническим результатом должно было быть обеспечение возможности определения момента

возникновения преддефектного состояния за счет выявления областей с повышенной напряженностью электрического поля и измерения градиентов напряженности электрического поля в этих областях с последующим выделением дефектов.

В предложенном нами способе [8] бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов локация областей с повышенной напряженностью электрического поля и измерение градиентов напряженности поля осуществляются электрооптическим датчиком контроля напряженности электрического поля по величине коэффициента отражения лазерного пучка от указанного датчика, которая пропорциональна напряженности электрического поля. При этом электрооптический датчик предварительно градуируют путем внесения его в калиброванное переменное электрическое поле. Затем в ходе стеновых измерений для каждого типа высоковольтных изоляторов, которые подлежат диагностике, определяют усредненные значения напряженности переменных электрических полей, соответствующие рабочему высокому напряжению, и предельные границы градиентов напряженности электрических полей, не создающих электрический пробой или перекрытие изоляторов. Затем с использованием электрооптического датчика, размещенного на диэлектрической штанге и соединенного через поляризационный дискриминатор и волоконный световод с лазерным излучателем, а также с фотоприемником, проводят сканирование по поверхности высоковольтного изолятора. Одновременно с помощью определенной компьютерной программы регистрируют пространственное положение электрооптического датчика на

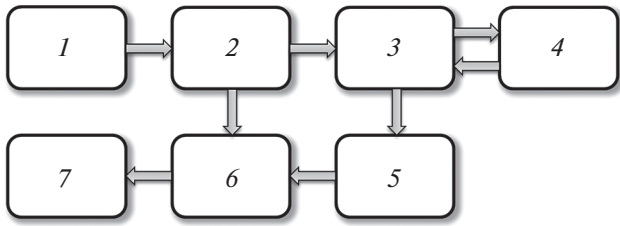


Рис. 1. Принципиальная схема устройства: 1 – лазерный излучатель, 2 – поляризационный дискриминатор, 3 – волоконный световод, 4 – электрооптический датчик, 5 – фотоприемник, 6 – узкополосный усилитель и компаратор, 7 – персональный компьютер.

поверхности изолятора и соответствующую ему напряженность электрического поля; измеряют нормальные и тангенциальные компоненты градиентов напряженности электрического поля. Далее пространственное распределение повышенных нормальных и тангенциальных к поверхности градиентов напряженности электрического поля сравнивают с ранее записанным распределением значений напряженности для эталонного высоковольтного изолятора.

Устройство для бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов (рис. 1) содержит последовательно соединенные лазерный излучатель 1, поляризационный дискриминатор 2, волоконный световод 3 [9], фотоприемник 5, узкополосный усилитель и компаратор 6, компьютер 7, а также электрооптический датчик 4, соединенный с волоконным световодом 3 и фотоприемником 5. В электрооптическом датчике 4 и волоконном световоде 3 отсутствуют металлические элементы, при этом электрооптический датчик 4 выполнен с возможностью размещения непосредственно в переменном электрическом поле.

Электрооптический датчик 4 состоит из сегнетоэлектрического кристалла, на поверхности которого сформирована периодическая доменная структура (ПДС). Для повышения чувствительности и разрешающей способности при локализации градиентов напряженности поля используются резонансные свойства ПДС для данной длины волны лазерного излучателя 1 [10].

Условие максимального отражения (или прохождения) лазерной волны с длиной λ_0 от ПДС в этом случае выполняется при равенстве:

$$\lambda_0 = 2nD(\text{отр.}); \lambda = (2n + 1)D(\text{пр.}),$$

где n – показатель преломления, D – период ПДС.

Электрическое поле напряженностью E , приложенное к ПДС, создает, вследствие линейного электрооптического эффекта (эффект Поккельса), изменение показателя преломления и, следовательно, сдвиг резонансной частоты ПДС,

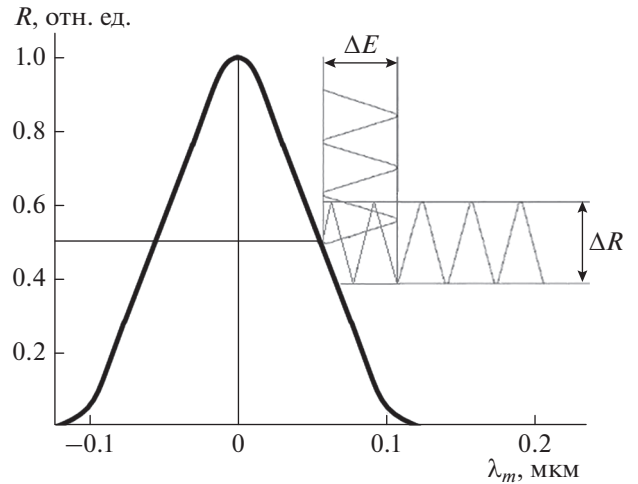


Рис. 2. Зависимость значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны.

что соответствует изменению резонансной длины волны:

$$\lambda_m = (\lambda_0 - \lambda_E) = n^3 r D E,$$

где r – электрооптический коэффициент, λ_E – длина волны в приложенном электрическом поле.

Таким образом, максимальный коэффициент отражения R лазерной волны от ПДС, убывает с увеличением λ_m .

Изменение коэффициента отражения R можно представить в виде:

$$\Delta R = (dR/dE)E.$$

Из этого выражения следует:

$$E = \lambda_m (n^3 r D)^{-1},$$

а значит

$$dR/dE = (dR/d\lambda_m) n^3 r D.$$

В общем виде зависимость значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны можно представить в виде графика (рис. 2). Если длину волны лазерного излучения λ_m настроить на середину склона спектральной кривой отражения, соответствующей значению $R_{max}/2$, то переменное электрическое поле будет создавать соответствующее изменение коэффициента отражения ΔR . Использование практически линейного отрезка $dR/d\lambda_m$ позволяет в линейном масштабе определять значения поля E .

Для подтверждения промышленной применимости предложенного способа бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов был выполнен эксперимент на реальном полимерном изоляторе ЛК70/35 с поврежденным контактом стержень–электрод.

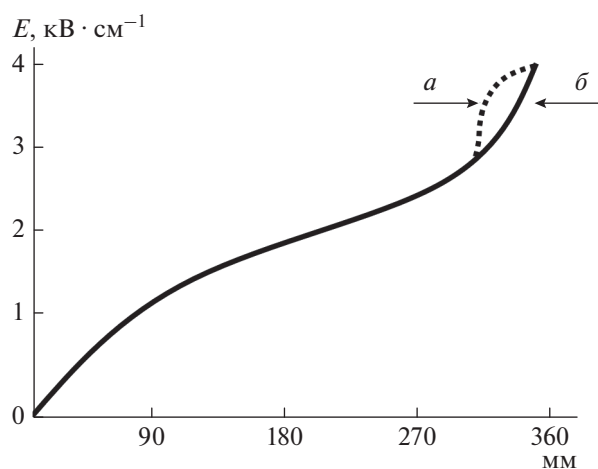


Рис. 3. Распределение напряженности поля между оконцевателями бездефектного (а) и дефектного (б) изоляторов. Изменение поля на дефекте изображено пунктиром.

Наши измерения выполнялись путем сканирования датчиком вдоль стержня изолятора на расстоянии 2.5 м на стенде кафедры “Промышленная электроника и светотехника” КГЭУ. На рис. 3 приведено распределение напряженности электрического поля вдоль образца для бездефектного (а) и дефектного (б) полимерных изоляторов типа ЛК70/35. Некоторое дополнительное увеличение E вблизи оконцевателей обоих образцов объясняется отсутствием специальных экранов для выравнивания поля по всей длине.

Таким образом, использование разработанного датчика позволяет обеспечивать возможность определения момента возникновения преддефектного состояния за счет выявления областей с

повышенной напряженностью электрического поля и измерения градиентов напряженности электрического поля в этих областях с последующим выделением дефектов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-08-00203.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 2008. 496 с.
2. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 2009. 239 с.
3. Слуцкер А.И., Поликарпов Ю.И., Гиляров В.Л. // Техническая физика. 2006. Т. 76. № 12. С. 52.
4. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепл. и детонац. процессы при электрич. пробое тв. диэлектриков. Екатеринбург: ИЭФ РАН, 2000. 257 с.
5. Багаутдинов И.З., Мисбахов Р.Ш., Лизунов И.Н., Фунт А.Н. // Интеллект. энергосист. (Тр. IV Междунар. молодеж. форума). 2016. Т. 1. С. 86.
6. Runde D., Brunken S., Ruter C., Kip D. // Appl. Phys. B. 2007. V. 86. № 1. P. 91.
7. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. Фотонные и фононные кристаллы. М.: Физматлит, 2010. 158 с.
8. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Хуснутдинов Р.А. Способ бесконт. дист. диагн. состояния высоковольтных изоляторов. Патент № 2597962.РФ, 20.09.2016.
9. Васев А.Н., Лизунов И.Н., Ермеев Р.И., Мисбахов Р.Ш. // Кулагинские чт.: техника и технол. производ. процессов (Тр. XVI Междунар. научн.-практич. конф.). 2016. Т. 2. С. 221.
10. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I. et al. // Ferroelectrics. 2012. V. 441. № 1. P. 25.