



УДК 620.192

## ЕМКОСТНОЙ КОНТРОЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОВОДНИКОВ

\*А.В. Матвеев, \*\*Г.А. Пюкке

\*ООО «Газпромтрансгаз Томск»,  
ул. Гастелло, 7, Петропавловск-Камчатский, 683032, Россия, e-mail: [nadzorrpu@mail.ru](mailto:nadzorrpu@mail.ru)

\*\*Камчатский государственный технический университет,  
ул. Владивостокская, 2, Петропавловск-Камчатский, 683017, [geopyukke@yandex.ru](mailto:geopyukke@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается способ неразрушающего контроля изоляции вновь изготавливаемой кабельной продукции на предмет отсутствия дефектов. Исследование производится посредством получения параметров схемы замещения участка изоляции подачей на внутренний проводник и внешнюю поверхность высокочастотного напряжения околорезонансной частоты. Показано, что исследуемый участок при такой компоновке проявляет свойства цилиндрического конденсатора. Емкость данного конденсатора находится в прямой зависимости от величины диэлектрической проницаемости изоляции и следовательно ее качества. Уменьшение величины емкости данного участка является явным признаком наличия дефектов.

**Ключевые слова:** кабель, изоляция, контроль качества, обнаружение дефектов изоляции.

В современной технике проектирования и строительства сетей распределения и потребления электрической энергии имеется тенденция для все более широкого применения самонесущих изолированных проводов. Провода класса СИП не нуждаются в изоляторах, имеют большую безопасность при прокладке через ветви деревьев, по поверхности зданий, не требуют высокой подготовки монтирующего персонала, мало подвержены образованию гололеда и обладают целым рядом других полезных свойств. Этим и обусловлена высокая и все увеличивающаяся популярность проводов этого класса в промышленности. Однако процесс покрытия проводника изоляционным материалом сопряжен с рядом сложностей. Полимер не способен связываться с металлом в единую структуру и как следствие на границе раздела сред прочность соединения крайне мала. Многочисленные механические нагрузки, которыми сопровождается процесс изготовления самонесущего изолированного провода, способны привести к разрушению связи и появлению дефекта в изоляции. Сам полимер также склонен к образованию таких локальных дефектов как пузырьки воздуха, локальные включения и прочие. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о необходимости контроля качества исполнения изоляционного покрытия.

На данный момент существует ряд способов реализации данного контроля. Наиболее распространенным является способ, указанный в патенте за авторством А.Е. Гольдштейна, В.В. Редько и Л.Б. Бурцевой [2]. Суть метода заключена в протягивании изготовленного провода через кольцевой электрод и подаче высокого напряжения на провод и электрод. При этом в местах наличия дефектов изоляции происходит образование частичных разрядов и как следствие появления высокочастотных токовых разрядов.

Существуют также следующие способы диагностики:



1. Г.В. Смирнов, Д.Г. Смирнов [1]. Метод заключен в протягивании провода через коронирующий электрод. В местах наличия нарушений изоляции происходит резкое изменение структуры короны.

2. Г.В. Смирнов, Д.Г. Смирнов [3]. Метод заключается в исследовании зон прогрева изоляции.

3. Г.К. Новиков, А.И. Смирнов, А.С. Жданов, Л.Н. Новикова, Г.В. Маркова [4]. Метод заключается в наложении на поверхность изоляции тонкой алюминиевой фольги и исследовании интенсивности рентгеновского излучения.

Исследовав преимущества и недостатки перечисленных методов, приходим к выводу, что способ контроля по исследованию зон прогрева изоляции недостаточно информативен и неспособен выявлять все возможные дефекты. Все остальные методы сопряжены с подачей на изоляцию напряжения, близкого к напряжению пробоя. Это в той или иной мере снижает качество изоляции. На основании вышеперечисленного можно сделать вывод о необходимости создания иного способа диагностики.

Предлагается производить контроль изоляции путем приложения к внешней поверхности провода кольцевого электрода и подаче на внутренний провод и кольцевой электрод высокочастотного напряжения с напряжением много меньше напряжения пробоя изоляции. При такой схеме, участок изоляции между кольцевым электродом и проводом проявляет свойства цилиндрического конденсатора с емкостью, определяемой по формуле (1).

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{l}{\ln(R_2/R_1)}. \quad (1)$$

Эта формула не является точной, так как не учитывает емкости, создаваемой торцевыми фрагментами ноля конденсатора, которые при условии малой длины измеряемого участка будут играть значительную роль, однако по указанным ниже причинам в данной ситуации может быть использована.

Так как внешний и внутренний диаметр провода является жестко фиксированным параметром, участок с дефектом в изоляции может быть представлен в виде двух последовательно соединенных конденсаторов представляющих собой схему замещения поврежденного участка и соединенным с ними параллельно конденсатора, являющегося схемой замещения неповрежденного участка изоляции. Или же упрощенно в виде двух параллельно соединенных конденсаторов в котором емкость дефектного участка будет представлена одним цилиндрическим конденсатором с однородным диэлектриком эквивалентной диэлектрической проницаемости. Суммарная емкость поврежденного участка может быть определена по формуле (2).

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{l - l_d}{\ln(R_2/R_1)} + 2\pi\epsilon_d\epsilon_0 \frac{l_d}{\ln(R_2/R_1)} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(R_2/R_1)} (\epsilon l - \epsilon l_d + \epsilon_d l_d), \quad (2)$$

где:

$l_d$  – длина дефектного участка,

$\epsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость дефектного участка.

Величина относительного изменения величины емкости по сравнению с емкостью неповрежденного участка выражается формулой (3).

$$\eta = \frac{(\epsilon l - \epsilon l_d + \epsilon_d l_d)}{\epsilon l} = 1 - \frac{l_d}{l} + \frac{\epsilon_d l_d}{\epsilon l}. \quad (3)$$

Из указанных выше зависимостей можно сделать следующие выводы:



– Уменьшение емкости диагностируемого промежутка по сравнению с емкостью остальных участков является явным и однозначным следствием наличия дефекта на данном участке и может быть использовано для диагностики;

– Необходимость в оценке величины емкости промежутка, создаваемого боковыми сегментами ноля цилиндрического конденсатора, отсутствует, так как оценка производится по отношению емкости дефектного участка и неповрежденного. Боковые сегменты поля в поврежденном и неповрежденном участке одинаковы и их влияние лишь несколько снижает чувствительность;

– При таком способе оценки качества изоляции отсутствует необходимость в приложении к изоляции высокого напряжения и следовательно способ не повреждает изоляцию;

– Чувствительность будет наибольшей при длине кольцевого электрода соизмеримой с размерами характерных повреждений в изоляции (при длине, при которой ноле в диагностируемом участке можно считать условно равномерном). Эффективной будет длина, вдвое превышающая внешний диаметр провода.

Используя параметры распространенных марок СИП, можно оценить величину емкости диагностического промежутка по формулам, представленным выше.

СИП-3 с сечением токопроводящей жилы  $35 \text{ мм}^2$  (наименьший по площади поперечного сечения и как следствие имеющий наименьшую емкость вид СИП-3) имеет следующие параметры:

- изоляцию толщиной 1,3 мм.;
- изоляция из полиэтилена с диэлектрической проницаемостью 3,7;
- внутренний провод диаметром 7 мм.

При указанных параметрах емкость изоляции составляет 11,54 пФ. Данная величина является относительно небольшой и для регистрации изменений в ее величине необходимо привести схему замещения к режиму резонанса напряжений. При этом любое малейшее отклонение емкости приведет к выходу из резонансного режима, что легко фиксируется.

Наиболее эффективна для диагностической деятельности резонансная частота в районе 10 МГц. Большая частота приведет к:

- проявлению межвитковых емкостей катушки и индуктивности конденсатора, что внесет сложности в процесс диагностики;
- созданию диагностическим устройством помех работе радиосвязи;
- увеличению необходимой индуктивности диагностического устройства, что в итоге приведет к усложнению конструкции, увеличению чувствительности к помехам и ряду иных факторов.

Меньшая частота приведет к увеличению времени, необходимому для диагностики и как следствие к необходимости замедлить выпуск продукции.

При указанной рекомендуемой резонансной частоте необходимая индуктивность диагностического устройства вычисляется по формуле (4).

$$L = \left( (2\pi f_0 C) \right)^{-1}. \quad (4)$$

Для данного типа провода индуктивность составит 22 мкГн.

Уровень чувствительности устройства определяется отношением величины тока в резонансном режиме к току при величине емкости уменьшенной на коэффициент  $k$ .



Ток в таком контуре определяется соотношением (5)

$$I(k) = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L + (\omega k C)^{-1})^2}}. \quad (5)$$

В неповрежденном участке коэффициент  $k$  равен единице, а выражение  $(\omega L + (\omega k C)^{-1})^2$ , определяющее реактивное сопротивление равно нулю. Общий коэффициент чувствительности  $\eta = I(1)/I(k)$  определяется соотношением (6).

$$\eta = I(1)/I(k) = \sqrt{1 + \frac{1}{R^2} ((\omega C)^{-1} - (k\omega C)^{-1})^2}. \quad (6)$$

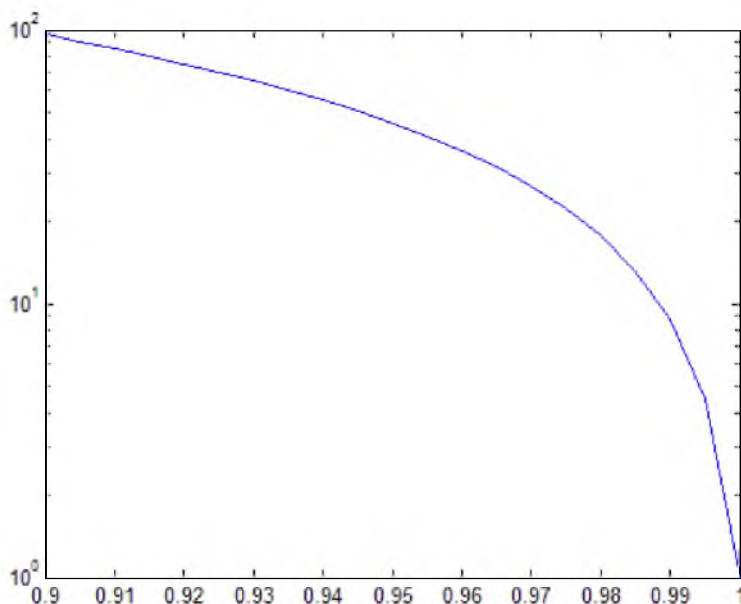


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $\eta$  от  $k$ .

По анализу полученной зависимости можно сделать вывод, что чувствительность находится в обратной непропорциональной зависимости от величины квадрата активного сопротивления и квадрата частоты. При частоте в 10 МГц, емкости диагностического промежутка 11,54 пФ, внутреннем сопротивлении 10 Ом, зависимость коэффициента чувствительности от коэффициента  $k$  будет иметь вид, представленный на рисунке 1. Видно, что даже при изменении емкости всего на 1% ток падает в 7 раз. Это говорит о возможности применения предложенного способа контроля и весьма высокой точности контроля.

### Литература

1. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. // 2014. Устройство контроля дефектов изоляции. Патент РФ №2506601.



2. Гольдштейн А.Е., Редько В.В., Бурцева Л.Б. // 2013 Искровое устройство для контроля дефектов изоляции. Патент РФ №2491562.
3. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. // 2014. Устройство для контроля дефектов изоляции. Патент РФ №2505830.
4. Новиков Г.К., Смирнов А.И., Жданов А.С., Новикова Л.Н., Маркова Г.В. // 2009. Рентгенографическое устройство для проверки качества изоляции кабельной продукции. Патент РФ №2377588.

## CAPACITIVE CONTROL OF PERMITTIVITY INSULATING COATINGS OF CONDUCTORS

\*A.V. Matveev, \*\*G.A. Pukke

ООО «Gazprom transgaz Tomsk», Gastello St., 7, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683032, Russia, e-mail: [nadzorrpu@mail.ru](mailto:nadzorrpu@mail.ru)

Kamchatka State Technical University,  
Vladivostokskaya St., 2, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683017, Russia, e-mail: [geopyukke@yandex.ru](mailto:geopyukke@yandex.ru)

**Abstract.** The method of not destroying control of isolation in again made cable production is examined. Absence of defects is searched. Research is done by means of reception of an equivalent circuit parameters connected with the site of isolation. It is done by submission on an internal explorer and an external surface of a high-frequency voltage with the frequency being closed to resonance frequency. It is shown that the researched site, at such configuration, shows properties of the cylindrical condenser. The capacity of the condenser is at direct dependence on size of dielectric permeability of isolation and, therefore, on its qualities. Reduction of capacity magnitude of the site is the explicit attribute of defects presence.

**Key words:** cable production, isolation, quality assurance, detection of defects of isolation.