

**В.М. ЗОЛОТАРЕВ**, д-р техн. наук, ген. директор, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

**С.Ю. АНТОНЕЦ**, инженер, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

**В.В. ЗОЛОТАРЕВ**, канд. техн. наук, директор по внешнеэкон. связям, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

**С.В. БУЗЬКО**, канд. техн. наук, вед. специалист, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

**А.А. НАУМЕНКО**, канд. техн. наук, вед. специалист, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков

## **ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НОВЫХ ТИПОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ**

Приведены результаты исследований по разработке измерений уровня частичных разрядов силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Разработаны устройства испытаний электрическим напряжением до 500 кВ силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Рассмотрены особенности практического применения различных методов к измерению частичных разрядов в силовых кабелях, которые отличаются большой электрической емкостью. Приведены результаты первичных измерений уровня частичных разрядов в разработанных ПАО «Завод Южкабель» кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 300 кВ.

**Ключевые слова:** силовой кабель, сшитый полиэтилен, частичные разряды.

**Анализ литературы.** Возрастающие требования, предъявляемые к каналам передачи электрической мощности привели в последнее время к созданию силовых кабелей с нагревостойкой полиэтиленовой изоляцией на напряжение от 6...10 кВ до 500 кВ [1]. Такие кабели на напряжение до 330 кВ разработаны и выпускаются в Украине ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ». Для обеспечения качества кабелей на этапе приемо-сдаточных испытаний предусматривается контроль уровня частичных разрядов (ЧР) в изоляции. Однако, в силу высокой емкости отрезков кабеля на барабанах далеко не все известные способы [2, 3] измерения ЧР можно применять к такого рода объектам.

**Постановка задачи.** Необходимость сплошного контроля уровня ЧР выпускаемых отечественных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ потребовали создания соответствующего измерительного комплекса. В соответствии с существующими требованиями, на испытуемом объекте емкостью порядка долей микрофарады необходимо обеспечить помехозащищенность измерительного комплекса и регистрацию частичных разрядов с уровнем 1...10 пКл.

**Решение задачи.** Особенностью испытаний современных конструкций

силовых кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения со шшитым полиэтиленом, как уже упоминалось, является необходимость их сплошного поточного контроля электрическим напряжением, измерение уровня частичных разрядов, а для кабелей СВН – также и измерение тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции, что должно обеспечить основной контроль качества их изоляции и ресурс работы в электроэнергетических сетях на протяжении не мене 30 лет. Таким образом вопросы испытаний этих кабелей высоким напряжением и измерения в них уровня частичных разрядов напрямую связаны с их качеством и эксплуатационными показателями. Перейдем к более подробному анализу этих вопросов, с учетом того, что данные объекты испытаний имеют повышенную емкость.

На сегодняшний день существуют следующие основные группы методов регистрации частичных разрядов [2].

1. Химический метод, основанный на применении флуоресцентных ионных датчиков.

2. Оптический метод с применением волоконной оптики для регистрации светового излучения ЧР.

3. Акустический метод, позволяющий регистрировать акустические колебания, возникающие вследствие развития ЧР.

4. Электрический метод, в частности с использованием накладных электродов (Foil electrode method) и детектирования измерительным импедансом (Detection impedance method).

5. Электромагнитный метод улавливания электромагнитных излучений с помощью различных антенн.

Группы методов 1, 2, 3 и 5 или имеют ограниченное применение, как то применение, например, для жидких и газообразных диэлектриков, или вообще относятся к методам обнаружения места возникновения ЧР. Наиболее широко употребительным методом обнаружения ЧР в кабельной изоляции является электрический метод DIM, имеющий высокую чувствительность (порядка долей пикокулон) и хорошо развитую аппаратную базу для измерений в первую очередь уровня ЧР на объектах высоких и сверхвысоких напряжений.

Понятие частичного разряда в изоляции охватывает местные разряды на поверхности или внутри изоляции в виде короны, скользящих разрядов или неполных пробоев отдельных включений. Если представить схему твердого диэлектрика с частичным, например, газовым включением, имеющим емкость  $C_B$  (рис. 1, а), то единичный пробой этого включения будет сопровождаться прохождением через включение некоторого заряда  $Q$ , что приводит к изменению напряжения  $\Delta U_X$  на внешних электродах всего образца емкостью  $C_X$

$$\Delta U_X = Q_{\text{ЧР}}/C_X. \quad (1)$$

Если  $C_A \geq C_B, C_D$ , то заряд  $Q$ , проходящий через включение, равен

$$Q = (C_B + C_D) \Delta U_B, \quad (2)$$

где  $\Delta U_B$  – изменение напряжения на включении.

Сам заряд  $Q$  непосредственно измерить не удастся, так как его прохождение связано с процессами внутри самого диэлектрика.

С другой стороны, при возникновении ЧР и уменьшении напряжения на емкости  $C_B$  на величину  $\Delta U_B$  напряжение на внешних электродах уменьшится на величину  $\Delta U_X$  и будет обусловлено протеканием заряда  $Q_{чр}$ . Тогда условие равенства  $Q$  и  $Q_{чр}$  дает [3]

$$Q_{чр} = \Delta U_x C_x = Q \frac{C_d}{C_d + C_B}. \quad (3)$$

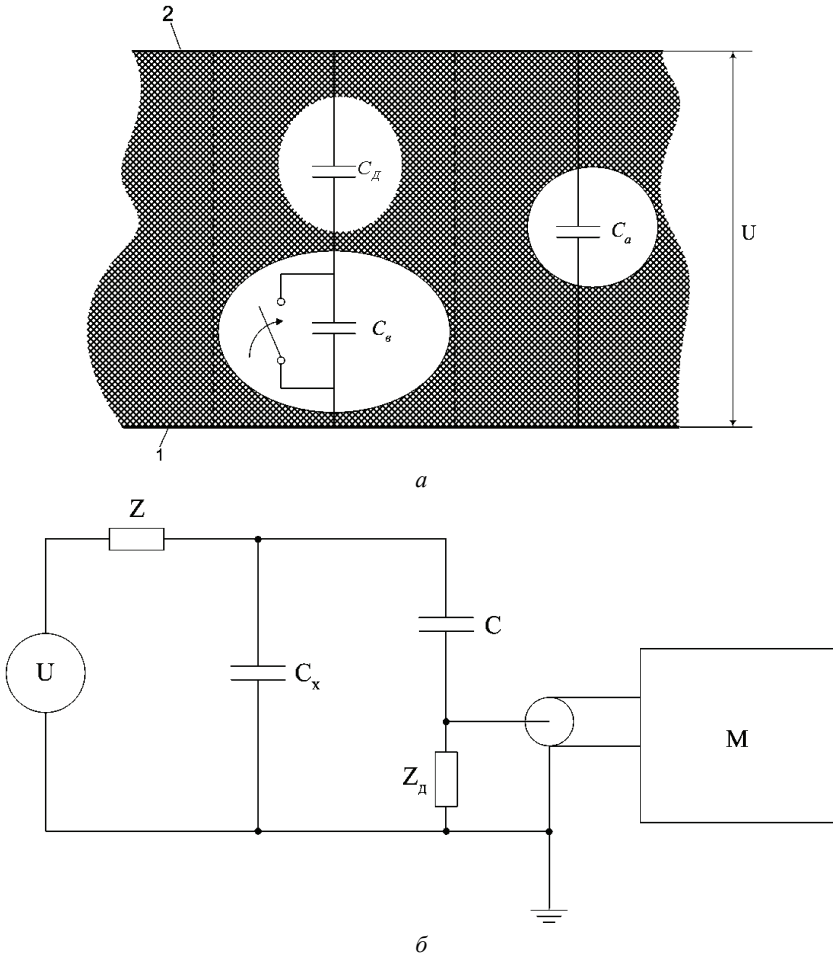


Рисунок 1 – Упрощенные эквивалентные схемы замещения диэлектрика с включением (а) и измерительной цепи измерения ЧР (б):  $C_B$  – емкость включения;  $C_d$  – емкость диэлектрика, расположенного последовательно с включением;  $C_A$  – емкость остальной части диэлектрика; 1,2 – внешние электроды для подачи напряжения;

Величина  $Q_{\text{ЧР}}$  является кажущимся зарядом частичного разряда. Как видно из (3), кажущийся заряд ЧР – это такой заряд, который будучи мгновенно введен между внешними электродами, наложенными на испытуемый объект, вызовет такое же мгновенное изменение напряжения между его выводами, как и заряд  $Q$  реального частичного разряда [3].

Следует заметить, что изменение  $Q_{\text{ЧР}}$  сопряжено с большими техническими трудностями. Так, например, при существующих европейских требованиях в кабелях СН, ВН и СВН уровень ЧР, то есть значение  $Q_{\text{ЧР}}$  не должно превышать значения 10, а иногда и 5 пКл. Тогда, согласно (3), при обычных значениях емкостей кабелей  $C_{\text{Х}}$  порядка долей микрофарады, изменение напряжения на ней будет составлять несколько десятых долей милливольт и оно будет тем ниже, чем выше емкость испытуемого отрезка кабеля, т.е. чем больше его длина. При этом упомянутое изменение напряжения необходимо выделить на фоне испытательного напряжения  $U$  которое для кабелей СВН составляет сотни киловольт. Однако, несмотря на перечисленные трудности, представляется наиболее целесообразным в данном случае применение схемы регистрации уровня ЧР в кабелях с использованием именно ДИМ-метода (рис. 1, б). Такая схема включает в себя источник переменного высокого напряжения  $U$  промышленной частоты, испытуемый объект емкостью  $C_{\text{Х}}$ , делитель с емкостью высоковольтного плеча  $C$  много меньшей  $C_{\text{Х}}$  и низковольтным плечом  $Z_{\text{д}}$ , разделительный высоковольтный фильтр  $Z$  и систему регистрации  $M$  [2].

Особо следует остановиться на выборе испытательной схемы питания высоким напряжением. Трудность здесь состоит в том, что схема с применением высоковольтного трансформатора непосредственно подключенного к испытуемому кабелю емкостью 0,5 мкф, например, при сверхвысоком напряжении 500 кВ и промышленной частоты  $f = 50$  Гц требует мощности трансформатора не менее 39,2 МВА. Такое оборудование в Украине не выпускается. Выпускаемые еще во времена бывшего СССР Московским электротехническим заводом наиболее мощные повышающие испытательные трансформаторы типа ИОМ-100/100 имели напряжение вторичной обмотки всего 100 кВ эфф. и мощность 100 кВА и допускали полную нагрузку при таком напряжении не более 5 мин. Не решает данную задачу, как видно, и применение каскадных схем с использованием испытательных трансформаторов фирмы TUR бывшей ГДР, которые имели достаточное высокое напряжение 600...2250 кВ, но недостаточную для таких испытаний мощность 1,5...3,6 МВА. Поэтому, наиболее приемлемой являются схемы испытаний кабелей ВН и СВН с использованием последовательного резонанса. Ранее такие схемы применялись очень редко и, в основном, для маслонаполненных кабелей, которые вследствие небольших длин (порядка сотен метров) соответственно имели и небольшую емкость, что требовало относительно невысоких мощностей испытательного оборудования.

С освоением производства кабелей СВН с пластмассовой изоляцией, как показывает анализ, применение резонансных схем практически не имеет альтернативы при строительных длинах кабелей порядка километра и более. Для

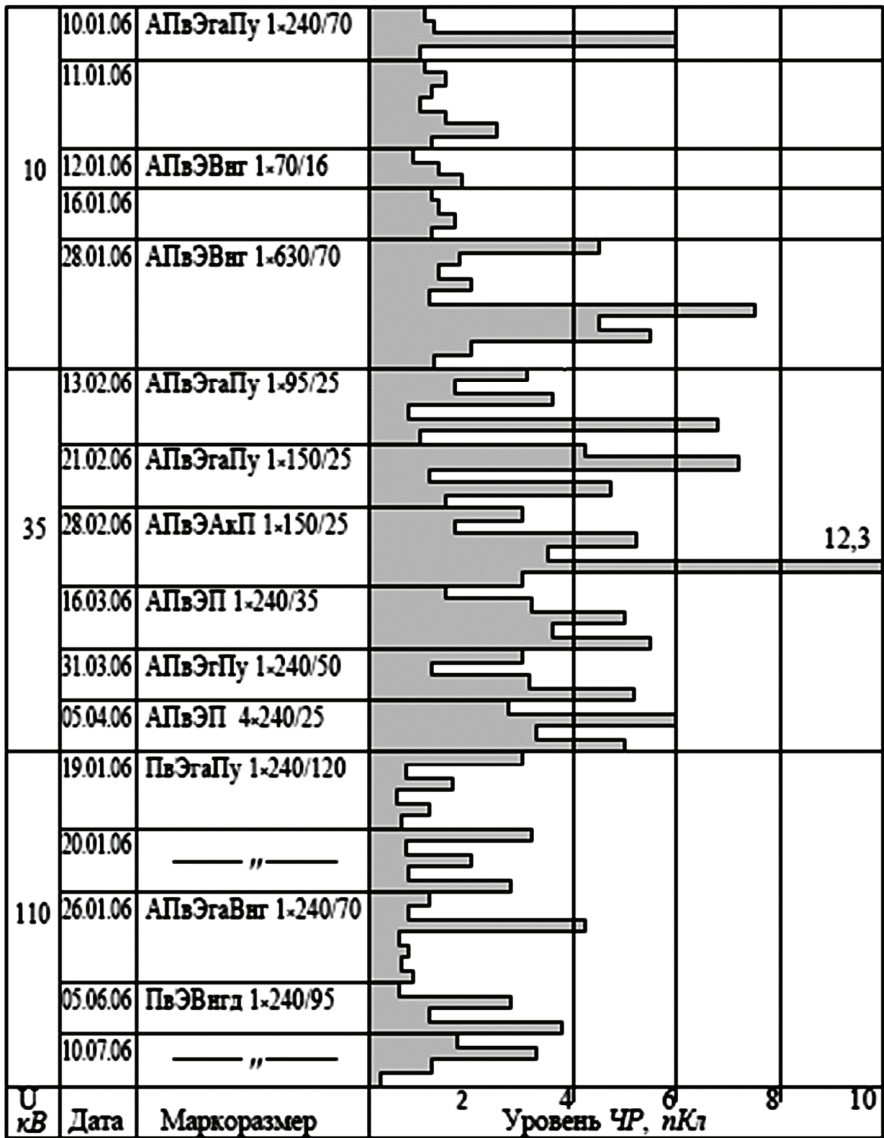


Рисунок 2 – Результаты первичных измерений ЧР в изоляции разработанных отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

испытаний было выбрано оборудование зарубежных фирм HIGHVOLT (ФРГ), HIPOTRONICS (США) и др. Они, как правило, предлагают ряды номинальных параметров испытательного и измерительного оборудования. Была решена задача определения параметров испытательной и измерительной схемы применительно к типоразмерам выпускаемых кабельным предприятием силовых кабелей, подлежащих поточным испытаниям высоким напряжением и определения уровня частичных разрядов на этом напряжении, а также определения тангенса угла диэлектрических потерь кабелей сверхвысокого напряжения.

В целом обеспечение поточных испытаний кабелей ВН и СВН электрическим напряжением с одновременным измерением уровня ЧР, а на напряжении более 150 кВ – также и измерения угла диэлектрических потерь, потребовало создания испытательного высоковольтного комплекса мощностью от единиц до десятков мегавольтампер. На таких высоких напряжениях становятся существенными весьма малые токи, что требует, помимо всего прочего, также и установления зависимостей распределения электрического поля в многослойном неидеальном диэлектрике, из которого сделана изоляция, для расчета тангенса угла диэлектрических потерь.

Был выполнен анализ резонансной схемы замещения с учетом собственных параметров возбуждающего трансформатора, реактора, высоковольтного фильтра низких частот и испытуемого отрезка кабеля. Показано, что напряжение возбуждения растет при этом с уменьшением рабочего зазора реактора, что является следствием снижения добротности контура, в том числе и из-за увеличения активных потерь в элементах, например, в концевой муфте для подключения кабеля. Испытания коротких отрезков кабеля обеспечивались за счет введения в схему дополнительной емкости с малым уровнем ЧР. Результаты исследований были положены в основу разработки методик приемосдаточных испытаний.

В соответствии с результатами проведенных исследований был построен испытательный комплекс для испытаний кабелей напряжением до 500 кВ, измерения уровня частичных разрядов и тангенса угла диэлектрических потерь кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Результаты первичных измерений частичных разрядов в изоляции отечественных образцов экранированных кабелей при напряжении 10, 35 и 110 кВ приведены на рис. 2. Из него видно, что только в одном из 73 барабанов кабеля уровень частичных разрядов превысил допустимое значение 10 пКл.

**Выводы.** Наиболее приемлемым для измерения уровня ЧР в экранированных кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена с высоким значением емкости (порядка долей микрофарады) является метод их детектирования с помощью делителя напряжения. В разработанном на этой основе измерительном комплексе удалось достичь собственного уровня шумов менее 1 пКл, что позволило провести измерения ЧР с допустимым уровнем до 10 пКл.

**Список литературы. 1.** Мецанов Г.И. Кабели на напряжение 10...500 кВ // Кабели и провода. – М.: 2008. – С. 32-38. **2.** Masayuki H. Crossequipment evaluations of partial discharge measurement // IEEE Trans. On dielectric and electrical Insulation. – 2008. – V. 15, № 2. – PP. 505-517. **3.** Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 528 С.

**Bibliography (transliterated): 1.** Meschanov G.I. Kabeli na napryazhenie 10...500 kV Kabeli i provoda. – M.: 2008. – 32-38. **2.** Masayuki H. Crossequipment evaluations of partial discharge measurement IEEE Trans. On dielectric and electrical Insulation. – 2008. – V. 15, № 2. – 505-517. **3.** Kuchinskij G.S. Chastichnye razryady v vysokovol'tnyh konstrukciyah. – L.: Energiya, 1979. – 528.

*Надійшла (received) 03.04.2014*

УДК 621.315

**В.М. ЗОЛОТАРЕВ**, д-р техн. наук, ген. директор, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

**Т.Ю. АНТОНЕЦ**, инженер, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

**В.П. КАРПУШЕНКО**, канд. экон. наук, , советник гендиректора, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

**А.А. НАУМЕНКО**, канд. техн. наук, вед. специалист, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков

## **ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ТИПЫ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ КАБЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ» И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ**

Приведены основные направления разработок пожаробезопасных кабелей и проводов, а также требования к ним по пожарной безопасности. Разработаны кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена не распространяющие горение с низким дымогазовыделением, не содержащие галогенов; огнестойкие кабели, содержащие барьер из смоляной ленты, выдерживающие температуру не менее 700С. Выпускаемая ПАО «Завод Южкабель» кабельная продукция соответствует требованиям украинских стандартов по пожарной безопасности.

**Ключевые слова:** силовые кабели, сшитый полиэтилен, пожаробезопасность.

**Анализ источников.** Все более широкое использование кабельной продукции для распределения электроэнергии ставит сегодня на одно из первых мест проблему ее пожарной безопасности. Установлено, что 50% пожаров возникает из-за неисправности кабелей и проводов. В последнее время этому вопросу, как за рубежом [1, 2], так и в Украине уделяется большое внимание и, особенно, в части требований, предъявляемых к пожаробезопасности кабелей и проводов [3].

© В.М. Золотарев, Т.Ю. Антоненц, В.П. Карпушенко, А.А. Науменко, 2014