

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 ΔU_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 ΔU_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 ΔU_B напряжение на внешних электродах уменьшится на величину ΔU_X и будет обусловлено протеканием заряда $Q_{чр}$. Тогда условие равенства Q и $Q_{чр}$ дает [3]

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

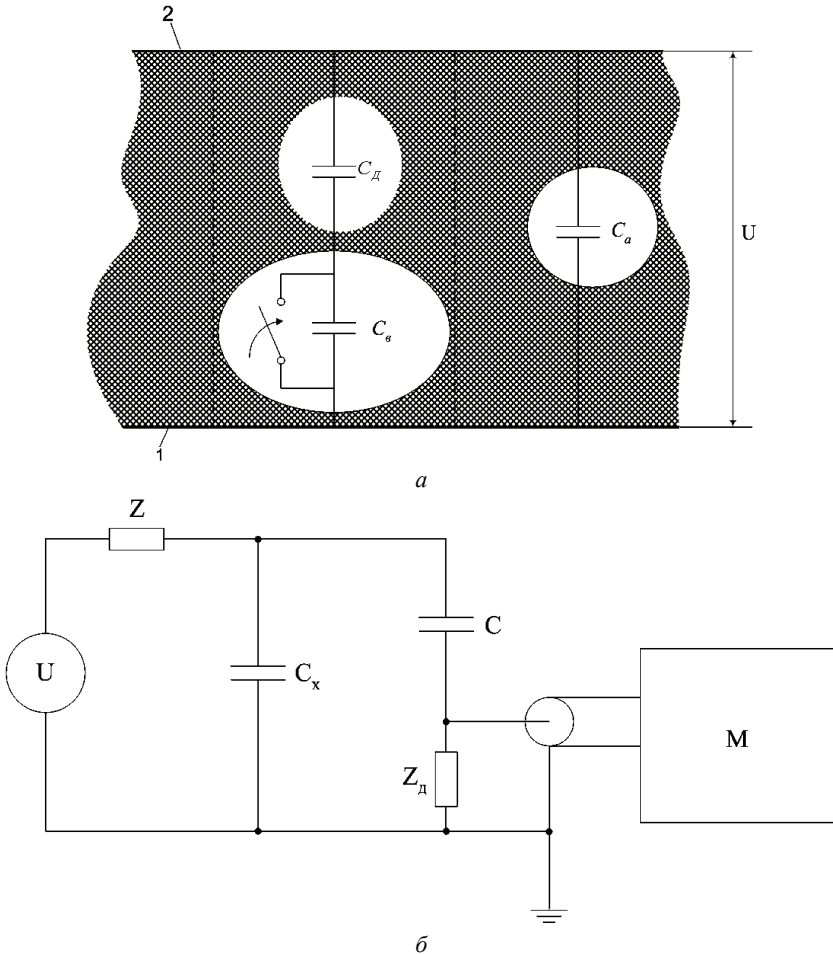


Рисунок 1 – Упрощенные эквивалентные схемы замещения диэлектрика с включением (а) и измерительной цепи измерения ЧР (б): C_B – емкость включения; C_d – емкость диэлектрика, расположенного последовательно с включением; C_A – емкость остальной части диэлектрика; 1,2 – внешние электроды для подачи напряжения;

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_X 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_X , делитель с емкостью высоковольтного плеча C много меньшей C_X и низковольтным плечом Z_d , 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 достаточно 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

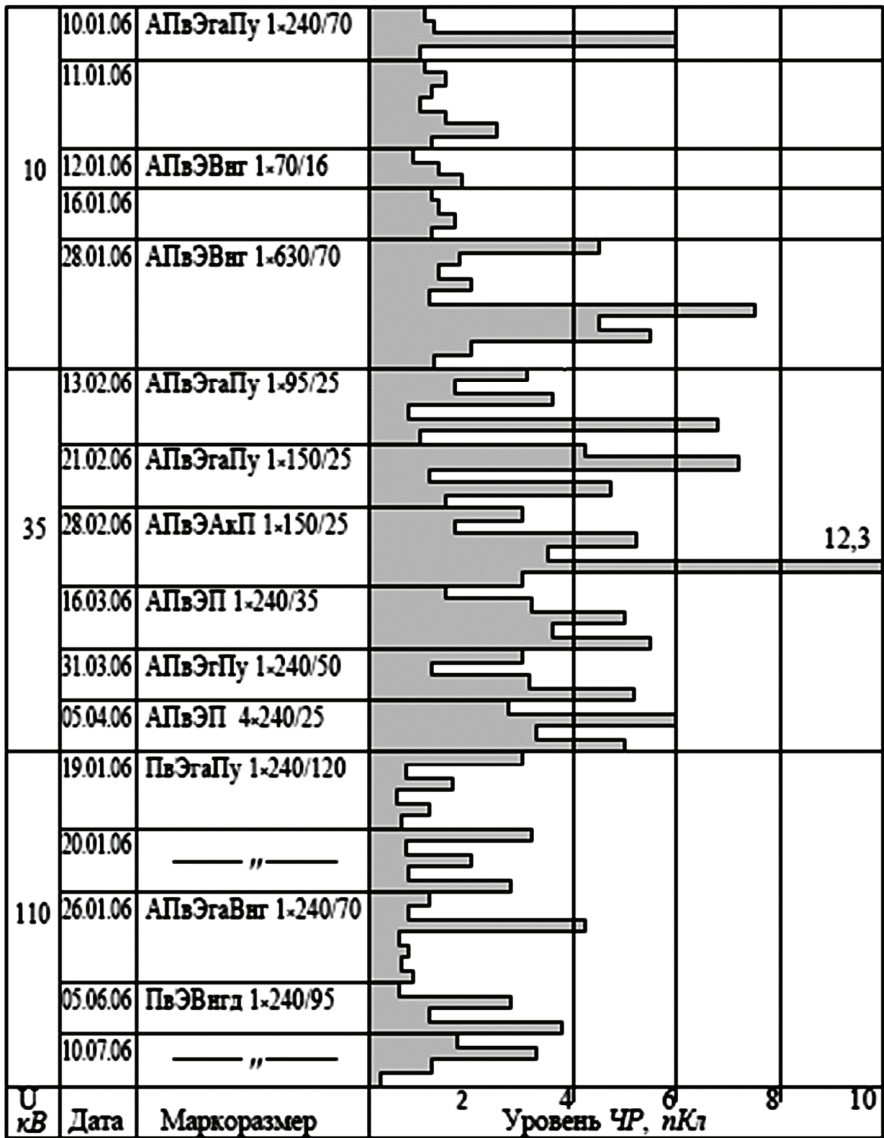


Рисунок 2 – Результаты первичных измерений ЧР в изоляции разработанных отчетственных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

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

Вимірювання рівня часткових розрядів нових типів силових кабелів / В.М. Золотарев, С.Ю. Антонен, В.В. Золотарев, С.В. Бузько, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 36-42. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведені результати досліджень з розробки вимірювань рівня часткових розрядів силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену. Розроблено пристрої для випробувань електричною напругою до 500 кВ силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену. Розглянуто особливості практичного застосування різних методів до виміру часткових розрядів в силових кабелях, які відрізняються великою електричною ємністю. Наведені результати первинних вимірювань рівня часткових розрядів в розроблених ПАТ «Завод Південкабель» кабелях з ізоляцією із зшитого поліетилену на напругу до 300 кВ.

Ключові слова: силовий кабель, зшитий поліетилен, часткові розряди.

УДК 621.315

Измерение уровня частичных разрядов новых типов силовых кабелей / В.М. Золотарев, С.Ю. Антонен, В.В. Золотарев, С.В. Бузько, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 36-42. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

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.

Measurement partial discharges new type power cables / Zolotaryov V.M., Antonetz S.U., Zolotaryov V.V., Buzko S.V., Naumenko A.A. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 36-42. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

The results of researches for measurement partial discharges in XLPE – insulation of power cable are presented. Testing device designed electric voltage up to 500 kV power cables with XLPE insulation. The features of the practical application of various methods to measure partial discharges in power cables, which feature large capacitance. The results of the primary measurement of partial discharges in developed PJSC "Stock company Yuzhicable" cables with XLPE insulation voltage up to 300 kV.

Key words: power cable, XLPE, part discharges.