

Ю.В.КРАВЧЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»;
О.В.ПОКЛАДОВ, НТУ «ХПИ»;
В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук, проф., НТУ «ХПИ»

РЕСУРС МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Проведені ресурсні випробування для визначення тривалої електричної міцності багатошарової поліетиленової ізоляції під впливом імпульсів високої напруги наносекундного діапазону (тривалістю порядку сотень наносекунд)

The resource researches for determine of longtime electric strength of multilayer polyethylene insulation by the high-voltage nanosecond pulses influence are made.

Уменьшение длительности импульсов позволяет существенно расширить функциональные возможности технологических устройств, работа которых основана на использовании высоковольтного импульсного разряда [1,2]. Получение импульсов напряжения с коротким фронтом нарастания и длительностью в генераторах импульсов высокого напряжения (ГИН) сопряжено с необходимостью снижения индуктивности между прямым и обратным токопроводами. Одним из возможных решений поставленной задачи является применение твердой изоляции, обладающей повышенной по сравнению с воздухом электрической прочностью, которая закладывается между прямым и обратным токопроводами. Тем самым, достигается снижение индуктивности между ними, за счет значительного сокращения расстояния между токопроводами (по сравнению с использованием воздушного изоляционного зазора).

Применительно к ГИН, построенным по схеме Фитча-Говелла [3,4], целесообразно конструктивное исполнение прямого и обратного токопроводов в виде плоских симметрично расположенных шин с закругленными краями. В качестве твердой изоляции, используемой для создания диэлектрического промежутка повышенной электрической прочности между токопроводами, наиболее предпочтительной к применению, благодаря высокой электрической и механической прочности, высокому удельному сопротивлению и малому (порядка 0,00015-0,0002) тангенсу угла диэлектрических потерь, является многослойная пленочная полиэтиленовая изоляция [5]. Использование многослойной изоляции дает возможность увеличения до 1,5 раз рабочей напряженности поля по сравнению с аналогичной монолитной [6].

Цель работы. Определение длительной электрической прочности много-

слоистой полиэтиленовой изоляции при воздействии высоковольтных импульсов наносекундного диапазона (длительностью порядка сотен наносекунд).

Постановка задачи. Необходимо провести ресурсные испытания полиэтиленовой изоляции, которая должна быть обернута вокруг электродов (пластин с закругленными краями, находящимися под разностью потенциалов), для имитации конструктивного исполнения реального обратного и прямого токопроводов ГИН. Выбор способа закладки пленочного диэлектрика для изоляции токопроводов друг от друга осуществлен на основании данных по теоретическому исследованию данной задачи, приведенных в [7]. Данные по расчету поля свидетельствуют, что применение оборачивания пленочной изоляции вокруг электродов (рис. 1, а) позволяет существенно улучшить распределение электрического поля на поверхности электрода и снизить неоднородность поля по сравнению со случаем закладки пленочной изоляции в виде плоских полос (рис. 1, б), не защищающих края электродов. Снижение относительной максимальной напряженности поля достигают до 2 раз. Таким образом, применение подобного способа закладки изоляции должно обеспечить существенный рост ресурса многослойной пленочной изоляции по сравнению с экспериментальными данными полученными в [5].

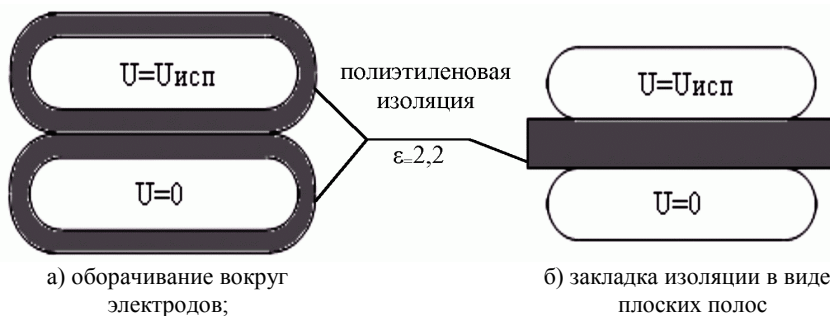


Рисунок 1 – Способы закладки изоляции между прямым и обратным токопроводом ГИН

Методика проведения эксперимента. Объект испытания выполнен из электродов и обернутой вокруг них полиэтиленовой изоляции. Электроды представляют собой стальные пластины толщиной 3 мм и шириной 40 мм, с радиусом закругления кромки края 0,5 мм. Вокруг каждого из электродов обернуто по 24 слоя полиэтиленовой пленки с толщиной слоя 100 мкм. Таким образом, суммарное расстояние между электродами составило $2 \times 24 \times 100 = 4,8$ мм. Площадь соприкосновения электродов при проведении данного эксперимента была равна $\approx 160 \times 40 = 6400$ мм².

Электрическая схема испытательной установки представлена на рис. 2.

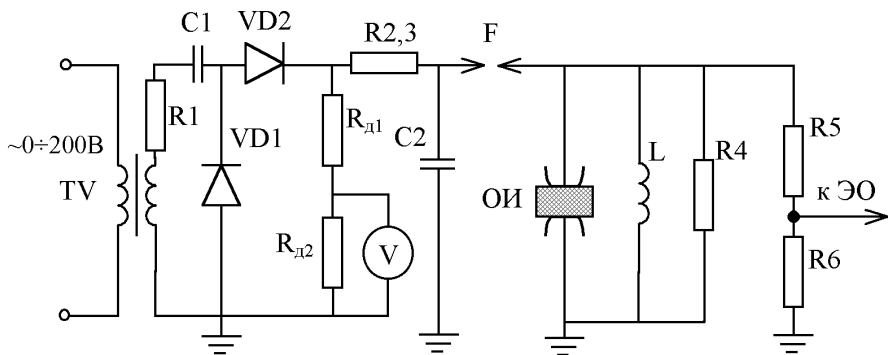


Рисунок 2 – Электрическая схема испытательной установки

Основными узлами испытательной установки являются повышающий трансформатор напряжения TV с коэффициентом трансформации равным 500, регулировка первичного напряжения которого производится с помощью однофазного тиристорного регулятора с диапазоном регулирования от 0 до 200 В; токоограничивающих резисторов $R_1 = 120 \text{ кОм}$, $R_{2,3} = 30 \text{ МОм}$; схема удвоения напряжения, представленная двумя конденсаторами $C_1 = 0,25 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 1,3 \text{ нФ}$ и двумя высоковольтными диодами VD1 и VD2, с помощью которой удастся повысить напряжения от 65 кВ до 120-130 кВ; разрядника F, срабатывающего в неуправляемом режиме (самоход) при определенной разности напряжения на электродах разрядника, зависящей от величины выставяемого воздушного зазора; испытательного объекта ИО (двух электродов обернутых слоями испытуемой полиэтиленовой изоляции); делителя напряжения $R_{д1}$, $R_{д2}$ с коэффициентом деления, равным 4000; формирующей линии состоящая из индуктивности $L = 15 \text{ мкГн}$ и 6-ти резисторов с суммарным сопротивлением $R_4 = 166,7 \text{ Ом}$. Для подключения электронного осциллографа (ЭО) использован также омический делитель напряжения, состоящий из резисторов $R_5 = 4 \text{ кОм}$ и $R_6 = 0,4 \text{ Ом}$ (коэффициент деления составил 1000).

Внешний вид испытательной установки представлен на рис. 3

Испытания проводились путем подачи на испытуемые образцы изоляции колебательных импульсов напряжения с частотой следования импульсов $5 \div 15 \text{ Гц}$. Частота следования ограничивалась временем нарастания напряжения на испытываемом объекте и условиями развития разрядных процессов в промежутке неуправляемого шарового разрядника F. Осциллограмма импульса напряжения приведена на рис. 4. Амплитуда импульсов напряжения в процессе проведения эксперимента составила 120-180 кВ.

Анализ осциллограмм (рис. 4) показывает, что длительность фронта импульса на уровне 0,1-0,9 составляет $\approx 100 \text{ нс}$, период колебаний – $\approx 600 \text{ нс}$, декремент колебаний – 2.

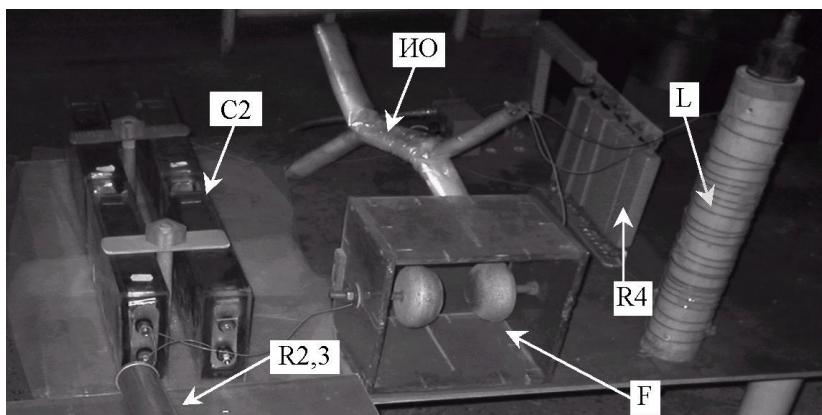


Рисунок 3 – Внешний вид испытательной установки

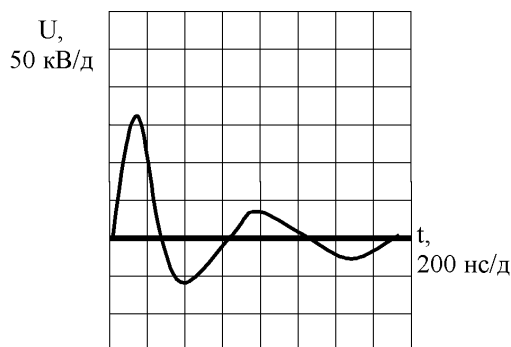


Рисунок 4 – Осциллограмма колебательного импульса, подаваемого на испытуемый объект

Результаты испытаний. При проведении ресурсных испытаний возникла проблема перегрева токоограничивающих резисторов R3 (КЭВ-40). Вследствие чего, испытания проводились в режиме 1 час работы – 30 минут перерыв. В ходе технологического перерыва проводилось принудительное охлаждение токоограничивающих резисторов, которые за время работы установки нагревались до 70 °С.

Также в ходе испытаний варьировалось расстояние между полусферами разрядника. Тем самым, изменялся уровень испытательного напряжения и частота следования импульсов. Данные параметры для каждого из периодов испытаний отслеживались при помощи электронного осциллографа ЭО и вольтметра V (рис. 2), позволяющего установить величину действующего напряжения, прикладываемого к испытуемому объекту.

Результаты ресурсных испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний полиэтиленовой многослойной изоляции на ресурс импульсами наносекундного диапазона

Амплитудное значение испытательного напряжения, кВ	Средняя напряженность поля в диэлектрике, кВ/мм	Частота следования импульсов, Гц	Длительность испытаний, мин.	Наработка, импульсов
150	31,25	8	18	8640
135	28,125	10	12	7200
120	25	12	65	46800
120	25	13	67	52260
120	25	17	65	66300
120	25	18	46	49680
120	25	20	70	84000
120	25	21	65	81900
120	25	20	70	84000
120	25	20	65	78000
120	25	20	62	74400
120	25	22	70	92400
120	25	21	70	88200
120	25	22	45	59400
120	25	20	60	72000
140	29,17	14	60	50400
150	31,25	12	25	15960
160	33,33	8	55	26400
160	33,33	8	70	33600
160	33,33	8	70	33600
160	33,33	8	60	28800
160	33,33	8	60	28800
160	33,33	7,4	65	28860
160	33,33	7,8	65	30420
160	33,33	5	15	4500
160	33,33	7,7	65	30030
160	33,33	7,4	50	22200
170	35,42	7,2	35	15120
175	36,46	5	17	5100
180	37,5	2,5	7	1050
170	35,42	6	12	4320
Итого: $\approx 6.700.000$ импульсов*				

* – при пересчете на средний уровень напряженности в диэлектрике 25 кВ/мм

Пересчет значения наработки испытуемой пленочной изоляции к уровню напряженности 25 кВ/мм производился, исходя из значения показателя степени в «формуле жизни» для данного вида изоляции определенного в [5] и составляющего $n = 9,72$. Таким образом, пересчет наработки производился по формуле:

$$M_{25} = \left(\frac{E_i}{25} \right)^{9,72} \cdot M_i, \quad (1)$$

где E_i , M_i – напряженность поля и значение наработки испытуемого объекта для i -того эксперимента, соответственно.

Итоговое значение ресурса полиэтиленовой пленки при средней напряженности электрического поля 25 кВ/мм составляет порядка $6,7 \times 10^6$ импульсов, что более чем в 10 раз превышает аналогичный параметр, определенный для многослойной полиэтиленовой изоляции в [5]. Таким образом, получено экспериментальное подтверждение существенного влияния способа закладки твердой изоляции между прямым и обратным токопроводами ГИН на ресурсные характеристики данной изоляции, что ранее было теоретически показано в [7] с позиции расчета электрического поля. Результаты теоретических экспериментальных исследований использованы при разработке высоковольтных импульсных генераторов, в частности при создании МГИТ, для получения импульса тока 2 МА с длительностью фронта импульса 650 нс [8]. В конструкции МГИТ использована полиэтиленовая изоляция толщиной 60 мм, набранная из слоев пленки с толщиной каждого слоя 120 мкм. С помощью этой изоляции прямой и обратный токопроводы каждого из 12 модулей МГИТ изолированы друг от друга варианту, изображенному на рис. 1, а.

Выводы

- 1 Проведенные ресурсные испытания многослойной полиэтиленовой изоляции при воздействии высоковольтных импульсов напряжения с наносекундным фронтом показали, что ресурс конструкции, выполненной по рис. 1, а более, чем в 10 раз превышает ресурс конструкции, выполненной по вар. 1, б.
- 2 Увеличение ресурса более чем на порядок подтверждает выводы работы [7] о влиянии распределения электрического поля на ресурс при разных способах выполнения изоляции, когда напряженность электрического поля в газовых прослойках отличается в 1,2-2,5 раза в зависимости от радиуса закругления электрода.

Список литературы: 1. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М., Советское радио, 1974. – 255 с. 2. *Бойко Н.И.* Технологии, основанные на воздействии сильных импульсных электрических полей // *Технічна електродинаміка.* – 2002. – Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Т. 6. – С. 94-99. 3. *Kovalchuk B.M., Kim A.A., Kumpjak E.V.,*

Zoi N.V., Zorin V.B. 10 Stage LTD for E – beam diode // Proc. of the 13-th QEE QNT. Pulsed Power Conf. USA. – 2002. – P. 1488-1490. **4.** *Sinserny P.S., S.K. Lam, Richard Miller, Terry Tucker, Lurry Sunders* // Proc of the 14th IEEE International pulsed power conference. Dallas, Texas USA. – 2003. – P. 615-618. **5.** *Бойко Н.И., Евдошенко Л.И., Покладов О.В., Рудаков В.В., Тур А.Н.* Длительная электрическая прочность полиэтиленовой слоистой изоляции при воздействии импульсов наносекундной длительности // Вісник НТУ«ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ«ХП». – 2003. – № 1, т. 1. – С. 142-147. **6.** *Ушаков В.Я.* Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. – М., Энергоиздат, 1988. – 152 с. **7.** *Рудаков В.В., Покладов О.В., Кравченко Ю.В.* Расчет электрического поля системы плоских электродов с твердым диэлектриком // Електротехніка і електро-механіка. – 2006. – № 4. – С. 72-75. **8.** *Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, и др.* Низкоиндуктивная секция генератора мощных высоковольтных импульсов по схеме Фитча // Приборы и техника эксперимента. – М., 2005. – № 4. – С. 57-65.

Поступила в редколлегию 12.03.2009.