

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ И ОБОСНОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ДИАГНОСТИКИ ПО ЧАСТИЧНЫМ РАЗРЯДАМ ИЗОЛЯЦИИ ЭКРАНИРОВАННЫХ ВИТЫХ ПАР

Виконано аналіз електростатичного поля витой екранованої пари кабелю при різних видах випробувальної напруги: симетричній різнополярній, однополярній і несиметричній. Вибір напруги впливає на місцезонації найбільш вірогідного місця виникнення часткового розряду, фазові характеристики яких застосовуються для технічної діагностики ізоляції.

Виконано аналіз електростатичного поля витой екранованої пари кабелю при різних видах испытательного напряжения: симметричное разнополярное, однополярное и несимметричное. Выбор напряжения влияет на местоположение наиболее вероятного места возникновения частичных разрядов, фазовые характеристики которых используются для технической диагностики изоляции.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин старения высоковольтной полимерной изоляции являются *частичные разряды* (ЧР) – пробои воздушных включений в твердой изоляции. Частичный разряд представляет собой пробой небольшой *части* изоляционного промежутка. Он сопровождается скачкообразным снижением напряжения на изоляции всего на 0,1 – 1 мВ, что трудно заметить на фоне высокого рабочего напряжения. Единичный разряд не представляет особой опасности, т.к. приводит к разрушению весьма малого объема изоляции. Однако на переменном напряжении ЧР могут возникать каждый полупериод, в результате их частота составит свыше 100 Гц. В изоляции высоковольтных кабелей воздушные включения недопустимы, т.к. в них могут развиваться частичные разряды при нормальных условиях эксплуатации или перенапряжениях. ЧР приводят к быстрой деградации полимерной изоляции, т.к. под действием разрядов в полимерах развиваются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя. Развитие дендритов приводит к пробое изоляции.

Частичные разряды приводят к возникновению во внешней электрической цепи коротких импульсов тока (длительностью менее 1 мкс) и переносу электрического заряда q . Этот заряд называется *кажущимся*, его можно измерить. Так, в силовых кабелях с вулканизированной полиэтиленовой изоляцией кажущийся заряд не должен превышать 10 пКл. *Истинный* заряд, протекающий при ЧР во включении и приводящий к разрушению изоляции, недоступен для прямых измерений. Он много больше кажущегося заряда.

Частичные разряды принято характеризовать рядом параметров: напряжение начала ЧР $U_{нчр}$; кажущаяся амплитуда ЧР; частота импульсов ЧР; фазовые характеристики.

Измерение характеристик ЧР – эффективный способ оценки качества высоковольтной изоляции. Сейчас освоено измерение не только кажущегося заряда, но и напряжения начала частичных разрядов, частоты импульсов ЧР, их распределения по фазе переменного напряжения. Оказалось, что эти характеристики позволяют определить характер дефекта изоляции и даже его расположение [1, 2].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

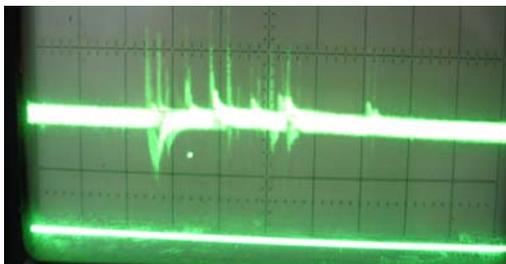
Оценка технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса полимерной изоляции низковольтных слаботочных кабелей специального назначения (контрольных, управления, связи), эксплуатирующихся в гермозоне АЭС, авиационной и космической технике, опирается на измерение структурно чувствительных к процессам старения показателей диэлектрика. Одним из таких показателей является напряжение начала частичных разрядов (рис. 1) [3].

При этом следует учесть, что в толще твердой высоковольтной изоляции воздушные включения являются *статическими* дефектами, которые при испытательных напряжениях полностью активизируются – как по толщине, так и по площади, что позволяет полностью оценить степень их опасности. В слаботочных многожильных кабелях воздушные зазоры – нормальное явление (не дефект). Пробой зазоров происходит не в области контакта изолированных жил, а несколько дальше – по тому отрезку силовой линии, падение напряжения на котором раньше всего достигает пробивного. Накопление же продуктов разложения изоляции идет именно в области контакта изолированных жил – в микрокапилляре, образованном соприкасающимися цилиндрическими поверхностями изолированных жил. Обнаружение низкомолекулярных продуктов в многожильных кабелях по характеристикам ЧР возможно, если после их активизации испытательное напряжение *снизить* до минимальной величины, чтобы активная зона приблизилась к области накопления продуктов разложения изоляции (рис. 1) [3]. На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов частичных разрядов в новом (рис. 1,а,б) и состаренном (с трещинами в изоляции и окислами меди на поверхности изоляции – рис. 1,в,г) образцах многожильного контрольного кабеля гермозоны КпоСГ-14×2,5с вулканизированной полиэтиленовой изоляцией. Чувствительность по вертикали – 20 пКл/дел.

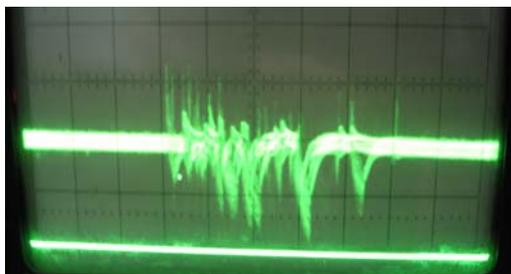
Более перспективным для диагностики состояния изоляции слаботочных кабелей являются фазовые характеристики импульсов частичных разрядов, т.е. распределение импульсов ЧР по фазе испытательного напряжения. Признаком повышенной поверхностной проводимости диэлектрика за счет накопления низко-

молекулярных продуктов является смещение фазы ЧР к моменту максимума испытательного напряжения, в то время как признаком высокого поверхностного сопротивления является возникновение ЧР вблизи момента перехода напряжения через ноль.

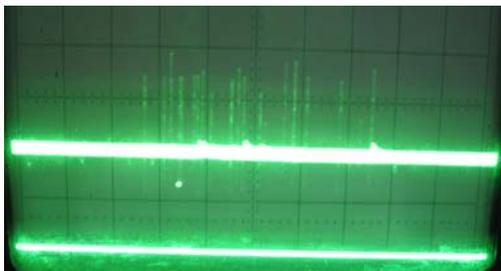
Цель статьи – анализ возможностей избирательного возбуждения воздушных включений трех типов: между жилами (I); между изолированной жилой и оболочкой (II); вблизи жилы (III) в экранированной витой паре кабеля.



а – жила №1 нового кабеля – против всех остальных и металлической свинцовой оболочки при испытательном напряжении $U = 3,2$ кВ; напряжение начала частичных разрядов $U_{нчр} = 2,8$ кВ



б – жила №2 нового кабеля – против всех остальных и металлической свинцовой оболочки при испытательном напряжении $U = 4,5$ кВ; напряжение начала частичных разрядов $U_{нчр} = 4,4$ кВ



в – жила №1 состаренного кабеля – против всех остальных и металлической свинцовой оболочки при испытательном напряжении $U = 2,5$ кВ; напряжение начала частичных разрядов $U_{нчр} = 2,3$ кВ



г – жила №2 – против всех остальных и оболочки при испытательном напряжении $U = 2,5$ кВ; напряжение начала частичных разрядов $U_{нчр} = 2,0$ кВ

Рис. 1

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЯ

В понятие "витая пара" вкладывается скрученные с определенным шагом изолированные проводники для обеспечения требуемой помехозащищенности: чем меньше шаг скрутки, тем выше помехозащищенность. Экранированные витые пары имеют лучшие характеристики по защите от внешних электромагнитных помех, что особенно важно для кабелей специального назначения.

Конструкция экранированной витой пары показана на рис. 2,а. Она содержит две изолированные жилы, оболочку и экран по оболочке. Материалы изоляции жил и оболочки могут быть различными. Например, изоляция жил выполнена из полиэтилена, а оболочка – из поливинилхлоридного пластиката. Поэтому в расчетной модели учтем различие диэлектрических проницаемостей межфазного заполнения (ϵ_1), изоляции жил (ϵ_2) и оболочки (ϵ_3).

Шаг скрутки витых пар обычно на порядок превышает поперечные размеры кабеля. Поэтому поле кабеля можно считать одинаковым в каждом поперечном сечении, т.е. плоскопараллельным, если ось кабеля прямолинейна, либо осесимметричным [4], если ось испытуемого образца изогнута по окружности.

Расчет выполним методом вторичных зарядов [5, 6], т.е. от расчетов поля в исходной задаче (рис. 2,а) перейдем к расчету поля в вакууме (рис. 2,б). Расчетная модель (рис. 2,б) содержит поверхности, совпадающие с границами раздела сред исходной задачи. На них следует расположить заряды (так называемые, вторичные заряды) и подобрать их плотности σ (Кл/м²) так, чтобы:

а) на поверхностях, отражающих электроды, достигались заданные *потенциалы*;

б) на поверхностях, отражающих границы раздела диэлектрических сред, выполнялись *условия равенства* нормальных составляющих вектора электрического смещения. Тогда поле модели будет идентично полю исходной задачи.

Примем следующий порядок нумерации участков:

а) на электродах – участки 1, 2 – поверхности жил и 3 – поверхность металлического экрана;

б) на границах раздела диэлектрических сред – участки 4, 5 – поверхности изолированных жил; 6 – внутренняя поверхность полимерной оболочки.

Возможное воздушное включение (рис. 2,б, позиция 7) примем осесимметричным с жилой.

Узлы, относящиеся к электродам, пронумеруем сначала (узлы с номерами от 1 до N_e), а затем – остальные N_d узлов, расположенные на границах раздела диэлектрических сред. Их номера будут от $N_e + 1$ до $N = N_e + N_d$.

Считаем, что испытуемый отрезок кабеля изогнут по форме окружности радиуса R_0 (именно в таком виде он помещается в испытательную камеру). Тогда поле отрезка кабеля – осесимметричное [7]. Система соответствующих линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) может быть представлена в виде:

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (1)$$

где \bar{A} – квадратная матрица коэффициентов, элементы которой a_{ij} находятся по формулам [6, 7]

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4R_j \cdot K(k_{ij}) \cdot \Delta l_j}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} \quad \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \operatorname{Ln}\left(\frac{16R_j e}{\Delta l_j}\right) \cdot \Delta l_j \quad \forall i = j \end{cases} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} i = 1 \div N_e,$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2\epsilon_0} \quad \forall i = j \\ -\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} (n_R \cdot dE'_R + n_Z \cdot dE'_Z) \quad \forall i \neq j \end{cases} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} i = N_e + 1 \div N,$$

dE'_R, dE'_Z – компоненты вектора напряженности, создаваемые единичным зарядом (плотностью 1 Кл/м²); i, j – индексы точек, где ищутся характеристики поля (i) и расположены заряды (j); dE_R, dE_Z – радиальная и осевая компоненты вектора напряженности поля, создаваемого в точке Q кольцевым зарядом из точки M

$$dE_R = \frac{\sigma(M) \cdot dl_M}{4\pi\epsilon_0 R_Q} \sqrt{\frac{R_M}{R_Q}} k^2 \left\{ \frac{k}{2} K(k) \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) - K'(k) \left[1 - \frac{k^2}{2} \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) \right] \right\},$$

$$dE_Z = \frac{\sigma(M) \cdot dl_M}{4\pi\epsilon_0 R_Q} \cdot \frac{k^3 (Z_Q - Z_M)}{2\sqrt{R_Q R_M}} [K(k) + k \cdot K'(k)],$$

$K'(k)$ – производная полного эллиптического интеграла по параметру k , $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода;

$$k = \sqrt{\frac{4R_Q R_M}{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}};$$

R_Q, Z_Q – цилиндрические координаты точки Q , в которой ищется потенциал; R_M, Z_M – цилиндрические координаты точки M , в которой расположен заряд; ϵ_0 – электрическая постоянная; $\bar{\sigma}$ – матрица-столбец неизвестных плотностей вторичных зарядов; \bar{U} – матрица-столбец, первые N_e членов которой отражают заданные потенциалы узлов, лежащих на электродах, а остальные – равны нулю.

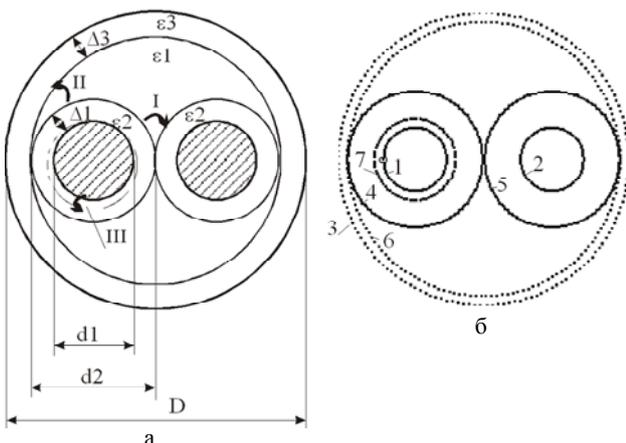


Рис. 2

Численно решая СЛАУ (1), найдем плотности искомых вторичных зарядов, а затем и напряженности поля:

а) для поверхностей электродов

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

б) для границ раздела диэлектрических сред (нормальная составляющая напряженности)

$$E_i = \frac{\sigma_i}{2\epsilon_0} \left(1 \pm \frac{1}{\alpha} \right), \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}$.

В (3) знак "+" выбирается при нахождении поля со стороны *положительного* направления нормали к границе раздела сред, а "-" – со стороны *отрицательного* направления. Обычно интересует напряженность поля в среде с *меньшей* диэлектрической проницаемостью, т.е. в воздухе. Здесь она выше, к тому же именно эта среда имеет меньшую электрическую прочность. В дальнейшем находилась напряженность поля именно в воздушных прослойках, а поскольку векторы нормалей всех круговых границ раздела сред были ориентированы единообразно – наружу, то и потребовалось введения двух знаков в (3): первый знак выбирался, когда воздушная прослойка оказывалась снаружи круговой границы, второй, – когда внутри.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрим кабель с отдельно экранированными витыми парами с полиэтиленовой изоляцией. Диаметр жилы 0,7 мм, толщина изоляции жилы 0,4 мм. Витая пара покрыта скрепляющей лавсановой (полиэтилентерефталатной) лентой (примем толщину этой изоляции 0,1 мм), поверх которой нанесен металлический экран. Диэлектрические проницаемости сред примем равными: $\epsilon_1 = 1$; $\epsilon_2 = 2,2$ и $\epsilon_3 = 3,5$. Испытательное напряжение частоты 50 Гц кабеля 3 кВ.

Экранированная витая пара (рис. 2,а) содержит, три электрода: две жилы и экран. Это позволяет создавать разные структуры поля (рис. 3): симметричные – разнополярную (а) и однополярную (б), а также несимметричную (в).

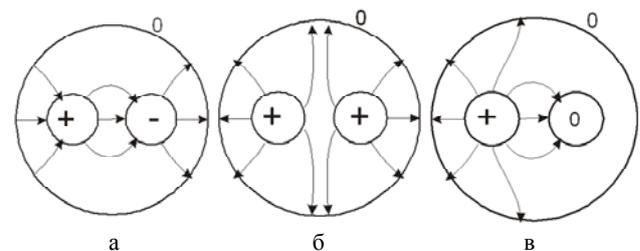


Рис. 3

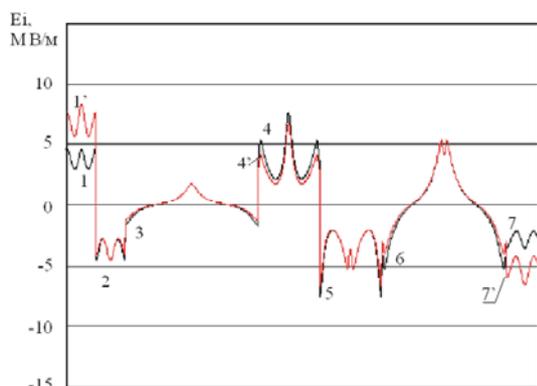
На рис. 4 приведены результаты расчетов поля (в виде разверток напряженности поля по длине образующих) при трех способах нагрузки: симметричным разнополярным напряжением (рис. 4,а), симметричным однополярным (рис. 4,б) и несимметричным напряжением (рис. 4,в). Представлено два варианта моделей: без включения вблизи жилы и с включением (в последнем случае номера участков даны со штрихами).

Как видно из рис. 4, напряженность поля в *воздушных зазорах* между жилами и металлическим экраном (участки 4, 5 и 6) выше, чем *внутри диэлектрика* вблизи поверхностей жил (участки 1, 2) или экрана (участок 3).

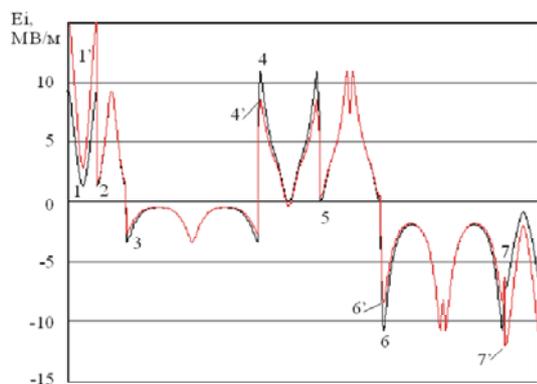
При симметричном разнополярном напряжении напряженность поля ниже, чем при других видах напряжения: 8 против 11 МВ/м.

При симметричном разнополярном напряжении (рис. 4,а) напряженность поля наибольшая в зазоре между жилами: 8 МВ/м (участок 4, его середина). В зазоре между изолированной жилой и оболочкой она в 1,4 раза меньше – 5,5 МВ/м (участок 6). Следовательно, при таком напряжении ЧР начнутся раньше всего в воздушных включениях типа I – между изолированными жилами.

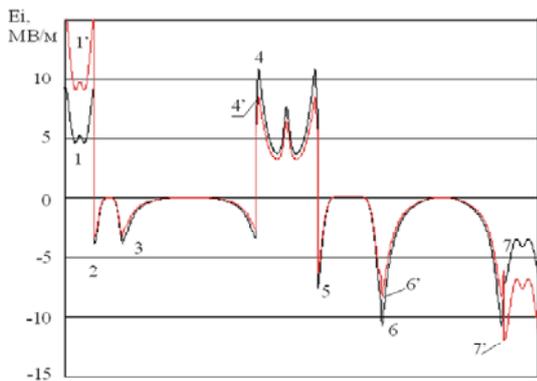
При симметричном однополярном напряжении (рис. 4,б) сильнее всего нагружаются зазоры между изолированной жилой и оболочкой (начало участка 4, начало участка 6) – 11 МВ/м. Напряженность поля в зазоре между жилами при этом снижается почти до нуля. Следовательно, такой вид испытательного напряжения позволяет активизировать частичные разряды, прежде всего, во включениях типа II – между изолированной жилой и скрепляющей лентой.



а



б



в

Рис. 4

При несимметричном напряжении (рис. 4,в) сильнее всего нагружается воздушный зазор также типа II, но вблизи потенциальной жилы – жилы, находящейся под высоким потенциалом (см. начало участка 4, начало участка 6). Здесь напряженность 11 МВ/м, а на поверхности заземленной жилы – в 1,37 раза ниже – 8 МВ/м. Такой вид испытательного напряжения позволяет локализовать частичные разряды вблизи потенциальной жилы.

Наличие воздушного зазора вблизи жилы меняет характер распределения поля (сравни участки 1' и 4' с 1 и 4). Максимум напряженности поля теперь сосредотачивается на жиле, причем при всех вариантах подачи испытательного напряжения. Воздушная прослойка III может образоваться при чрезмерно быстром охлаждении изоляции после экструдера. Напряженность поля в ней почти в ϵ_2/ϵ_1 раз превысит напряженность поля в диэлектрике (в нашем примере $\epsilon_2/\epsilon_1 = 2,2$). Такая прослойка активизируется первой при любом виде испытательного напряжения.

Принимая пробивную напряженность воздуха при нормальных условиях $E_{пр} = 30 \text{ кВ/см} = 3 \text{ МВ/м}$ (амплитудное значение), оценим напряжение начала частичных разрядов (нижний порог значения):

$$U_{нчр} = 3 \text{ кВ ампл.} \times (3 \text{ МВ/м}) / (11 \text{ МВ/м}) = 0,8 \text{ кВ ампл.} = 0,6 \text{ кВ эфф.}$$

Соответствующие расчеты и измерения показывают близкие значения напряжения начала ЧР [3].

ВЫВОДЫ

1. Уровень испытательных напряжений витых экранированных пар превышает напряжение начала ЧР, поэтому характеристики последних можно использовать для технической диагностики компонентов изоляции кабеля.

2. Выбором вида испытательного напряжения можно избирательно активизировать ЧР-ы в участках I – между изолированными жилами и II – между изолированной жилой и скрепляющей лентой конструкции кабеля. Тем самым появляется возможность избирательной диагностики состояния отдельных компонентов изоляции кабеля, если она не содержит включений типа III – вблизи жилы. В противном случае первыми активизируются именно такие включения.

3. Обоснование уровня и вида испытательного напряжения может быть выполнено на основе расчета электростатического поля конструкции. При этом следует учитывать влияние неоднородности диэлектрика. Минимальное напряжение начала ЧР оценивается из условия достижения напряженности поля в воздушных прослойках кабеля пробивного значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техніка і електрофізика високих напруг / за ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. Харків: НТУ "ХПІ", Торнадо, 2005. – 930 с.
2. Беспрозванных А.В. Способы представления дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов в твердой изоляции // Технічна електродинаміка. – 2011. – №4. – С. 12-19.

3. Безпрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях // Технічна електродинаміка. – 2010. – №1. – С. 23-29.
4. Колечицкий Е.С. Численный метод расчета осесимметричных электростатических полей // Электричество. - 1972. - №7. – С. 57-61.
5. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975. – 295 с.
6. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей. – К: ИСДО, 1995. – 120 с.
7. Безпрозванных А.В., Кессаев А.Г. Вычислительные эксперименты для расчета напряженности осесимметричного электростатического поля в кусочно-однородной изоляции со сферическими включениями // Електротехніка і електромеханіка. –2014. – № 5. – С.67-72.

REFERENCES: 1. Brzhezyc'kyj V.O., Myhajlov V.M. *Tekhnika i elektrofizyka vysokikh napruh* [Technics and Electrophysics of High Voltages]. Kharkov, Tornado Publ., 2005. 930 p. 2. Bezprozvannykh A.V. Ways of representation of differential peak spectra of pulses of partial discharges in solid insulation. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, 2011, no.4., pp. 12-19. 3. Bezprozvannykh A.V. High electric field and partial discharges in bundled cables. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, 2010, no.1, pp. 23-29. 4. Kolehitsky E.S. Numerical method to calculate axisymmetric electrostatic fields. *Elektrichestvo – Electricity*, 1972, no.7, pp. 57-61. 5. Tozoni O.V. *Metod vtorichnykh istochnikov v elektrotekhnike* [Method of secondary sources in electrical engineering]. Moscow, Energy Publ., 1975. 295 p. 6. Naboka B.G. *Rascheti elektrostatičeskikh polei v elektroizoljatsionnoi tekhnike: uchebnoe posobie dlja studentov elektroenergetičeskikh spetsial'nostei* [Settlements electrostatic fields

in the insulating technique: a textbook for students of electric power specialties]. Kiev, IEDL Publ., 1995. 120 p. 7. Bezprozvannykh A.V., Kyessaev A.G. Computing experiments for calculation of electrostatic axisymmetric field in piecewise-homogeneous insulation with spherical inclusions. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.5, pp. 67-72.

Поступила (received) 20.10.2014

*Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
Кессаев Александр Геннадиевич¹, аспирант,
¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076010,
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua*

*A.V. Bezprozvannykh¹, A.G. Kyessaev¹
¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

Analysis of field structure and justification of voltages of diagnostics by partial discharges of shielded twisted pairs insulation.

An analysis of the electrostatic field of a cable twisted shielded pair for various types of test voltage: symmetric bipolar, unipolar and asymmetric is carried out. Voltage selection affects the location of the most probable place of arising of the partial discharges, phase characteristics of which are used for technical diagnostics of insulation.

Key words – partial discharge, electrostatic field, twisted shielded pair, test voltage, symmetric bipolar, unipolar and asymmetric, selective diagnostics.