

УДК 621.315

А.С. ФЕДЯЙ

## ПРОХОДНЫЕ ЕМКОСТИ В КАБЕЛЯХ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ВИТЫМИ ПАРАМИ

Особливістю конструкції контрольних кабелів з екранованими витими парами є гнучкий дротяний екран, накладений на симетричну пару ізованих жил, поверх скріплюючої плівки. В зазори, утворені дротами екрану може проникати слабке електричне поле. Вимірюючи прохідні ємності між парами можна отримати інформацію про стан міжекранного простору контрольного кабелю. Величини прохідних ємностей є настільки малими, що коректне їх вимірювання можливо здійснити тільки сукупним методом.

**Ключові слова:** Прохідна ємність, екранована вита пара, дротяний екран, оплетення, міжекранний простір.

Особенностью конструкции контрольных кабелей с экранированными витыми парами является гибкий проволочный экран, наложенный на симметричную пару изолированных жил поверх скрепляющей пленки. В зазоры, образованные проволоками экрана может проникать слабое электрическое поле. Измеряя проходные емкости между парами можно получить информацию о состоянии межэкранного пространства контрольного кабеля. Величины проходных емкостей настолько малы, что корректное их измерение возможно осуществить только совокупным методом.

**Ключевые слова:** Проходная емкость, экранированная витая пара, проволочный экран, оплетка, межэкранное пространство.

The design feature of control cables with shielded twisted pairs is a flexible wire screen imposed on a symmetric pair of insulated wire on top of the fastening tapes. Between the wires of the screen there are gaps through which can penetrate a weak electric field. Measuring the so-called feedthrough capacitance between the pairs you can get information about the state of the space between the screens of control cables. For the assessment of the values feedthrough capacitance made mathematical modeling of the two shielded twisted pairs electric fields, which takes into account the surface density of the screen. The field strength between the pairs in the so-called scope of weak field reaches 10 kV/m, the feedthrough capacitance does not exceed a few hundredths picofarads per meter of cable length. So small values is possible to correctly measure by the aggregate method.

**Keywords:** Feedthrough capacitance, shielded twisted pair, wire screen, the space between the screens.

**Введение.** Экранирование витых пар контрольных кабелей может быть выполнено отдельными проволоками или прядями проволок. Витые пары кабелей КПЭТИ экранированы оплеткой из прядей медных луженых проволок (рис. 1). Пряди одного направления пересекаются с прядями другого направления, образуя участки с двойной плотностью экрана и свободные участки – зазоры (рис. 2). Через эти зазоры силовые линии электрического поля могут проникать из одной пары во внешнее пространство между экранированными витыми парами (межэкранное пространство) и далее через экран соседней пары во внутреннее пространство другой пары. Таким образом, измеряя так называемые проходные емкости между соседними парами, можно получить информацию о состоянии межэкранного пространства.



Рис. 1 - Экраны пар контрольного кабеля КПЭТИ 7×2×0,7.

Величины проходных емкостей зависят от плотности оплетки, которая характеризуется коэффициентом поверхностной плотности экрана  $k_e$ , представляющим собой отношение площади по-

верхности, покрытой оплетающим материалом, к общей площади поверхности, на которую наложена проволока [3].

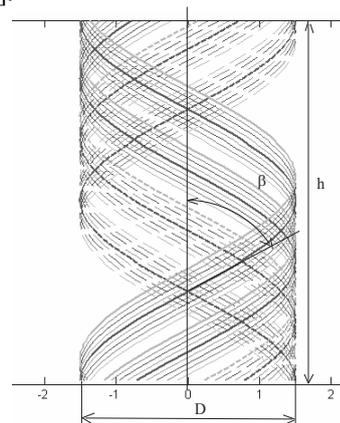


Рис. 2 - Модель проволочного экрана из прядей одного (сплошные) и другого (пунктирные линии) направления. Указаны угол оплетки ( $\beta$ ), шаг оплетки ( $h$ ) и диаметр под оплеткой ( $D$ ).

Коэффициент поверхностной плотности оплетки определяется известным соотношением:

$$k_e = k_1 + k_2 - k_1 k_2,$$

$$k_1 = \frac{d_1 n_1 a_1}{h \cdot \cos(\beta)},$$

$$k_2 = \frac{d_2 n_2 a_2}{h \cdot \cos(\beta)},$$

$$\beta = \arctg \frac{h}{\pi(D + \Delta)},$$

где  $d_1, d_2$  - диаметры проволок одного и друго-

© А. С. Федяй, 2017

го направлений оплетки;  $n_1, n_2$  - количества проволок в прядях одного и другого направлений;  $a_1, a_2$  - количества прядей одного и другого направлений оплетки;  $h$  - шаг оплетки;  $\beta$  - угол оплетки;  $D$  - диаметр под оплеткой;  $\Delta$  - толщина оплетки.

Для образца контрольного кабеля КПЭТИ 7×2×0,7 (рис. 1), в котором симметричную пару оплетают 6 прядей в двух направлениях по 5 проволок в пряди, диаметр проволоки оплетки равен 0,15 мм, угол оплетки составляет 60°. При такой геометрии коэффициент поверхностной плотности экрана равен 0,8. Однако степень экранирования других кабелей может отличаться и, в зависимости от особенностей конструкции и условий эксплуатации, коэффициент поверхностной плотности экрана может лежать в интервале 0,7–0,9. Соответственно, будут отличаться и величины проходных емкостей.

Для оценки изменения величин проходных емкостей в зависимости от плотности экрана рассчитаем поле двух соседних витых пар (рис. 3). Между прядями проволок экранов имеются зазоры, через которые осуществляется взаимодействие соседних пар, то есть, часть силовых линий потенциальной жилы проникает сквозь экраны и попадает на жилы соседней пары.

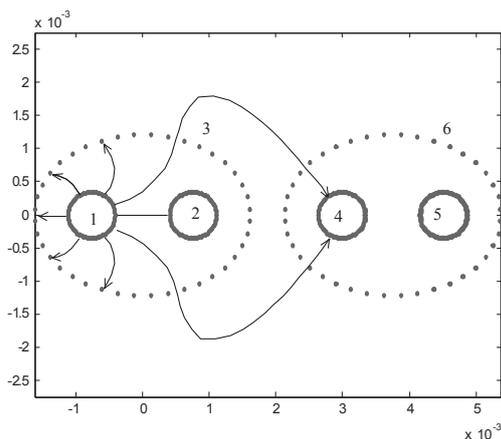


Рис. 3 - Схема расположения узлов в модели для расчета проходной емкости между экранированными витыми парами: 1, 2 – жилы первой экранированной витой пары; 3 – экран жил первой пары; 4, 5 – жилы второй (соседней) пары; 6 – экран соседней пары.

Расчет поля методом вторичных зарядов [1, 2] сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений:

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U},$$

где  $\bar{\sigma}$  - матрица-столбец плотностей вторичных зарядов;

$\bar{U}$  - матрица-столбец, потенциалов узлов расчетной модели;

$\bar{A}$  - квадратная матрица коэффициентов  $a_{ij}$ , значения которых для электродов рассчитываются по формулам:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j & \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{\Delta l_j / (2e)} \cdot \Delta l_j & \forall i = j \end{cases} \quad (1)$$

где  $i$  - номер узла, в котором определяются характеристики поля;

$j$  - номер узла, в котором расположен заряд;

$r_{ij}$  - расстояние между точками  $i$  и  $j$ ;

$r_{0j}$  - расстояние от точки  $j$  до точки с нулевым потенциалом;

$\Delta l_j$  - длина отрезка образующей с центром в точке  $j$ ;

$e$  - основание натуральных логарифмов ( $e \approx 2,71828\dots$ );

$\epsilon_0$  - электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

В расчетной модели сплошные линии плоскопараллельных электродов разбиты на отрезки длиной  $\Delta l_j$  с центром в точке  $j$ , то есть линейные заряды, образующие плоскопараллельные тела, представляют собой полоски длиной  $\Delta l_j$ . Для узлов, относящихся к экранам, в формулу введен множитель  $k_e$ . Тогда геометрическая длина каждого участка образующей экранов пар  $\Delta l_j$  уменьшается в  $k_e$  раз.

Упрощенный оценочный расчет величин проходных емкостей, выполненный при указанных допущениях с учетом того, что диэлектриком является воздух, приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Величины собственных и проходных емкостей витых пар, пФ/м при разных значениях коэффициента поверхностной плотности экрана.

$k_e$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$
0,8	127	17,8	109	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
0,6	126	18,0	107	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$
0,4	124	18,2	105	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-1}$

$C_{11}, C_{12}, C_{13}$  - собственные емкости потенциальной жилы, потенциальной жилы относительно парной и потенциальной жилы на экран соответственно составляют десятки и сотни пикофарад на метр.  $C_{14}, C_{15}, C_{16}$  - проходные емкости потенциальной жилы относительно жил соседней пары и потенциальной жилы относительно экрана соседней пары составляют сотые и тысячные доли пикофарада на метр длины кабеля. Они существенно отличаются от собственных емкостей и сильно зависят от коэффициента поверхностной плотности экрана.

Расчетные напряженности поля внутри экранированной витой пары достигают 5 МВ/м (так называемая область сильного поля). Напряженности поля между парами (так называемая область слабого поля) достигают 1–10 кВ/м, что в тысячи раз меньше, чем в области сильного поля. Расчетные напряженности также сильно зависят от коэффициента плотности экрана (рис. 4).

Приближенные оценки величин проходных емкостей указывают на их наличие в кабелях с проводочным экраном даже при взаимном расположении пар, указанном на рисунке 3. Если принять во

внимание то, что соседние пары в кабеле могут располагаться одна над другой, как показано на рисунке 5, расстояния между ними будут меньше, чем в предыдущей модели, взаимодействие будет выше, величины проходных емкостей увеличатся.

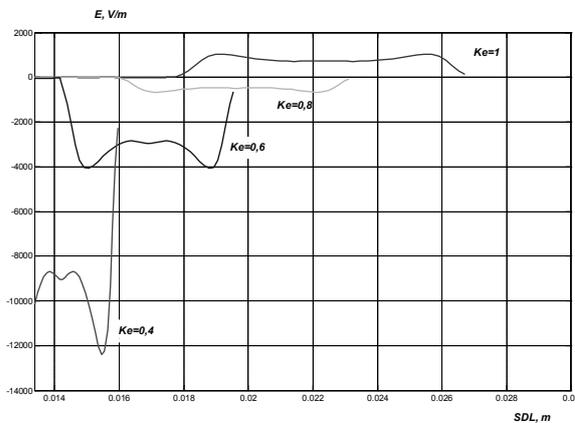


Рис. 4 - Развертки напряженности поля между экранированными витыми парами при различных коэффициентах плотности экрана.

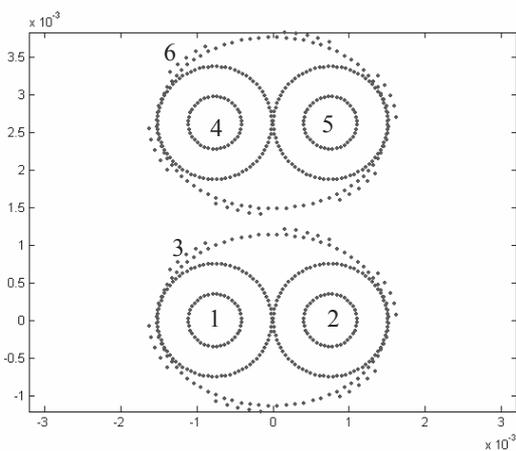


Рис. 5 - Схема расположения узлов в модели для расчета проходной емкости между экранированными витыми парами: 1,2 – жилы; 3 – экран жил; 4,5 – жилы соседней пары; 6 – экран соседней пары.

В уточненной расчетной модели при взаимном расположении пар одна над другой учтены диэлектрические проницаемости изоляции из сшитого полиэтилена и скрепляющей полиимидной пленки, наложенной под экраном. Также уточнена конструкция экрана, который представлен теперь шестью прядями проволок в каждой. Изменяя количество проволок в пряди можно менять коэффициент поверхностной плотности экрана. Для реализации расчета уточненной модели принято допущение, что для проволочных экранов в выражении (1) длина элементарного отрезка образующей  $\Delta l_j$  равна диаметру проволоки  $d_j$ .

Результаты расчета собственных и проходных емкостей уточненной модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Величины собственных и проходных емкостей витых пар, пФ/м в уточненной модели при разных значениях коэффициента поверхностной плотности экрана.

$k_e$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$
0,8	110	17,9	94	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,8
0,6	108	18,0	90	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	2,7
0,4	105	18,3	82	$0,16 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	6,4

Сравнительный анализ двух расчетных моделей (табл. 1 и табл. 2) показывает, что с внесением уточнений собственные емкости изменились незначительно, а проходные емкости увеличились на один - два порядка, что связано с уменьшением доли воздушной компоненты в трубках электрического поля, достигающих жил соседней пары, из-за уменьшения расстояния между парами.

Таким образом, расчет показывает, что даже в случае максимально близкого взаимного расположения пар, даже при малых коэффициентах плотности экрана емкости между парами, так называемые проходные емкости, на 3-5 порядков меньше так называемых собственных емкостей. Величины проходных емкостей не превышают сотых долей пикофарад на метр длины кабеля. Такие величины крайне сложно измерить. Поэтому, при измерении проходных емкостей следует пользоваться методикой совокупных измерений [5].

В качестве объектов измерений выбраны образцы контрольных кабелей КПЭТИнг 7x2x0,7, отобранные с кабельных трасс АЭС, где они находились в эксплуатации от 13 до 24 лет. Сердечники кабелей состоят из 7 витых пар, взаимное расположение которых удовлетворяет закону правильной повивной скрутки (одна пара в центре, шесть пар - в наружном повиве), то есть, максимально плотно прилегают друг к другу. Кабели имеют оболочки из негорючего поливинилхлоридного пластиката. После длительной эксплуатации кабели были подвержены дополнительному тепловому старению различной продолжительности, затем в течение одного года находились во влажном помещении. Для двух образцов была проведена серия измерений собственных и проходных емкостей, а также тангенсов углов диэлектрических потерь соответствующих изоляционных промежутков. Результаты прямых и совокупных измерений [3] представлены в виде  $C_{1-g}$  диаграммы (рис. 6).

Прямые измерения параметров межэкранного пространства проводились по схеме «одна из жил экранированной витой пары центрального повива против каждой из жил соседних пар, находящихся во внешнем повиве» (группа  $C_{1-g}$  на рисунке 6). Величины проходных емкостей оказались больше расчетных и достигли 1,8-2,3 пФ. Такой порядок величин соответствует емкости коммутационных проводов измерительного прибора. Следовательно, величина емкости межэкранного промежутка не заметна на фоне емкости измерительных проводов коммутатора.

Увеличение емкости измерения достигается применением совокупной схемы подключения. Результаты совокупных измерений параметров межэкранного пространства показаны на рисунке 6 группой  $C_{p-all}$  (жилы одной из пар против всех остальных жил). Величины емкостей этой группы на порядок больше паразитных емкостей соединения, поэтому их влияние на измеряемые величины не велико.

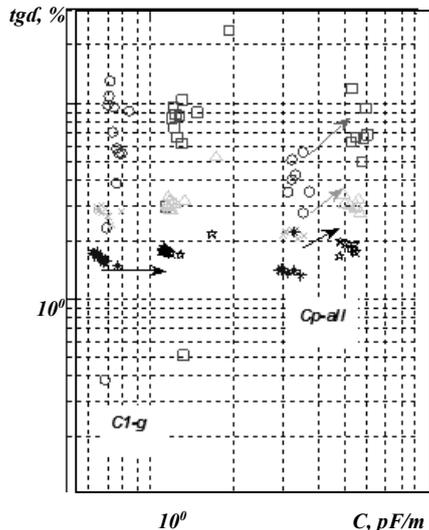


Рис. 6 -  $C$ - $tg\delta$  диаграмма образцов кабелей КПЭТИнг 7х2х0,7: «о», «х», «\*» - параметры образца № 1 на частотах 0,1 кГц, 1 кГц и 10 кГц соответственно; «□», «Δ», «\*» - параметры образца № 2 на частотах 0,1 кГц, 1 кГц и 10 кГц соответственно.

Таким образом, измерение проходных емкостей возможно осуществить только методом совокупных измерений. По их значениям, а так же, по величинам тангенсов углов диэлектрических потерь можно судить о состоянии межэкранного пространства. Тангенсы углов диэлектрических потерь в группе  $C_{p-all}$  для обоих образцов поднялись выше 1 %, что свидетельствует о наличии влаги в пространстве между парами. Однако значения  $tg\delta$  межэкранного пространства в этой группе емкостей выше у образца кабеля № 2. Можно предположить, что этот образец увлажнен сильнее. Подтверждают данное предположение признаки старения, обнаруженные на оболочке: изменение цвета, конденсация влаги на поверхности оболочки, чего не наблюдалось у образца № 1. Следовательно, через состаренную оболочку внутрь конструкции проникает влага и скапливается в межэкранном пространстве. Это явление можно обнаружить путем измерения тангенсов углов диэлектрических потерь соответствующих промежутков методом совокупных измерений.

**Выводы.** 1. При наличии в кабелях с экранированными витыми парами проволочных экранов пар существует возможность проникновения части зондирующего поля в свободное пространство между экранами. Это открывает возможность измерения параметров  $C$  и  $tg\delta$  указанного промежутка для анализа его состояния.

2. Рассчитав напряженность поля между экранированными парами и внутри них, можно сделать выводы о существенном их отличии (в тысячи раз). Соответственно, отличаются и проходные емкости между экранированными парами в сравнении с собственными емкостями пар. Вследствие малой величины проходных емкостей, прямые их измерения затруднительны, поэтому для измерения параметров  $C$  и  $tg\delta$  следует применять методику совокупных измерений.

3. Измерения проходных емкостей и тангенсов углов диэлектрических потерь соответствующих промежутков методом совокупных измерений (жилы одной из пар против всех остальных жил) позволяют сделать выводы о состоянии межэкранного пространства кабеля. Сравнительный анализ параметров двух образцов показал сильное увлажнение одного из них, оболочка которого оказалась состарена.

**Список литературы:** 1. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1-3, 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с., ил. 2. Набока Б. Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: Учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей. – Киев: ИС-ИО, 1995. – 120 с. 3. Набока Б. Г., Беспрозванных А. В., Штангей А. С. Параметры частичных емкостей как индикатор состояния контрольных кабелей АЭС // Электротехника и Электромеханика. - №3 – 2005, с. 80–82. 4. Леонов В. М., Пешков И. Б., Рязанов И. Б., Холодный С. Д. Основы кабельной техники. / – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432с. 5. Штангей А. С. Обследование многожильных кабелей методом совокупных измерений. Выбор оптимальных планов с помощью чисел обусловленности // Вестник НТУ «ХПИ», вып. 22. : НТУ «ХПИ». – 2004. – С. 117–120.

**Bibliography.** 1. Demirchyan K. S., Neyman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 3-h t. Uchebnik dlya vuzov. Tom 1-3, 4-e izd. – SPb.: Piter, 2003. – 463 p., il. 2. Naboka B. G. Raschetyi elektrostatičeskikh polej v elektroizolyatsionnoj tehnikе: Uchebnoe posobie dlya studentov elektroenergetičeskikh spetsialnostey. – Kiev: ISIO, 1995. – 120 s. 3. Naboka B. G., Besprozvannyh A. V., Shtangej A. S. Parametry chastichnyh emkostej kak indikator sostojanija kontrol'nyh kabelej AJeS. // Jelektrotehnika i Jelektromehaniка. - №3 – 2005, p. 80–82. 4. Leonov V. M., Peshkov I. B., Ryzanov I. B., Holodnyiy S. D. Osnovy kabelnoy tehniki. – M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006. – 432p. 5. Shtangej A.S. Obsledovanie mnogozhilnyh kabeley metodom sovokupnyh izmereniy. Vyibor optimalnyh planov s pomoschyu chisel obuslovlennosti // Vestnik NTU «HPI», vyip. 22. : NTU «HPI». – 2004. – pp. 117–120.

Поступила (received) 04.02.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Прходные емкости в кабелях с экранированными витыми парами / Г. С. Федяй** // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 64 – 68. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Прходные емкости в кабелях с экранированными витыми парами / А. С. Федяй** // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 64 – 68. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Feedthrough capacitance in cables with shielded twisted pairs // Н. Fedyay**, Bulletin of NTU "KhPI". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. - No 31 (1253). – P. 64 – 68. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Федяй Ганна Сергіївна** - кандидат технічних наук, Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний інститут», доцент кафедри «Електроізоляційна і кабельна техніка», (050) 8102733, [hanna.fedyay@gmail.com](mailto:hanna.fedyay@gmail.com)

**Федяй Анна Сергеевна** - кандидат технических наук, Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника», (050) 8102733, [hanna.fedyay@gmail.com](mailto:hanna.fedyay@gmail.com)

**Fedyay Anna Sergeevna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Docent of department "Electrical insulation and cable technique", (050) 8102733, [hanna.fedyay@gmail.com](mailto:hanna.fedyay@gmail.com)