

8. Kuhlín H. Handbook of physics. Per. with Nam. - B.: Mir, 1982. - 520 p.  
 9. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., V.E. Shaternikova Methods and instrumentation control elektromahnytnoho promyshlennyyh products. - Moscow: Energoatomizdat, 1983. - 262 p.  
 10. Instrumentation for nerazrushayuscheho control of materials and products. Directory / Ed. V.V.Klyueva. .1. - Moscow: Mashinostroenie, 1976. - 391 p.  
 11. Stentsel I.I. Automation of technological processes of chemical industries: Training. Guide. - K.: ISDO. , 1995. - 360 p.

Рецензія/Peer review : 26.1.2014 р.

Надрукована/Printed : 8.4.2014 р.  
Рецензент: Троцишин І.В., д.т.н., проф.

УДК 621.315.616:535.562

О.В. БОНДАРЕНКО, А.И. РЯБУШЕЙ, И.И. РЯБУШЕЙ  
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ КОМБИНИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИЛ КАБЕЛЯ ТИПА КСПП-1×4×1,2

*Произведен расчет эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции токоведущих жил и рабочей емкости цепи кабеля КСПП-1×4×1,2. Показана зависимость этих параметров от диэлектрической проницаемости полиэтилена изоляции жил, находящейся в пределах от 1,9 до 2,4, и от свободного объема сердечника кабеля.*

*Ключевые слова: кабель, токоведущие жилы, диэлектрическая проницаемость, рабочая емкость, полиэтиленовая изоляция.*

O.V. BONDARENKO, A.I. RIABUSHEI  
Odessa National Academy of Telecommunication Named After A.S. Popov

### PERMITTIVITY OF COMBINED CONDUCTORS INSULATION FOR КСПП-1×4×1,2 CABLE TYPE

*Abstract – Calculated the equivalent permittivity of conductors insulation and working capacity for cable КСПП-1×4×1,2. Was shown the dependence of these parameters on the permittivity of polyethylene of conductors insulation which is in the range of from 1,9 to 2,4, and on the free volume inside the cable core.*

*Keywords: cable, conductors, permittivity, working capacity, polyethylene insulation.*

#### Введение

При определении первичных либо вторичных параметров передачи цепи симметричного кабеля используемого на сетях абонентского доступа, часто сталкиваются с тем, что их расчет затрудняется, так как нельзя использовать точные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции жил, что приводит к погрешностям и неточным данным этих параметров. Эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции токоведущих жил цепи  $\epsilon_{\text{эжв}}$ , в значительной степени, влияет на емкость цепи  $C$ , которая в свою очередь влияет на коэффициенты затухания  $\alpha$ , фазы  $\beta$  и волновое сопротивление цепи  $Z_B$ .

Как известно,  $\epsilon_{\text{эжв}}$  зависит от диэлектрической проницаемости материала, который используется в качестве изоляции проводника и от показателя его объемного значения. Также значительную и немаловажную роль в ее значении, играет свободное пространство сердечника кабеля, заполненное воздухом, объем которого точно определить достаточно сложно.

#### Анализ исследований и публикаций

Как показал анализ исследований, приведенных в [1, 2], расчет объема свободного пространства сердечника кабеля у разных авторов отличается, что в свою очередь приводит к погрешностям при расчетах эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции токоведущих жил и рабочей емкости цепи кабеля.

#### Цель работы

Целью данной работы является показать зависимость эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции токоведущих жил и рабочей емкости цепи от качества полиэтилена и от свободного пространства сердечника кабеля КСПП-1×4×1,2, используя формулы различных авторов.

#### Расчет эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции токоведущих жил $\epsilon_{\text{эжв}}$ и рабочей емкости цепи $C_p$ для кабеля типа КСПП-1×4×1,2

Следуя [1] рассмотрим способ определения объема полиэтилена (ПЭ) изоляции и объема воздуха внутри сердечника кабеля типа КСПП-1×4×1,2 (рис. 1). Формулы для расчета площади диэлектриков из этой работы представляются в виде:

$$V_1 = \pi \cdot l \left[ n(d_0 + \delta_{\text{из}}) \cdot \delta_{\text{из}} + (D_c + \delta_{\text{пси}}) \cdot \delta_{\text{пси}} \right], \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{4}(D_c^2 - n \cdot d_1^2) \cdot l, \quad (2)$$

где  $V_1, V_2$  - объемные значения ПЭ изоляции и воздуха соответственно,  $\text{см}^3$ ;  $l$  - отрезок кабеля, для которого рассчитывается объем диэлектрика,  $\text{см}$ ;  $n$  - число жил в кабеле;  $d_0$  - диаметр голой жилы,  $\text{мм}$ ;  $\delta_{\text{из}}$  - толщина изоляции жил,  $\text{мм}$ ;  $d_1$  - диаметр изолированной жилы,  $\text{мм}$ ;  $D_c$  - диаметр сердечника кабеля по скрутке,  $\text{мм}$ ;  $\delta_{\text{пси}}$  - толщина поясной изоляции,  $\text{мм}$ .

Таким образом, при  $l = 100 \text{ см}$ ,  $n = 4$ ,  $d_0 = 1,2 \text{ мм}$ ,  $\delta_{\text{из}} = 0,7 \text{ мм}$ ,  $\delta_{\text{пси}} = 1 \text{ мм}$ , получим следующие значения  $d_1, D_c, V_1$  и  $V_2$ :

$$d_1 = 1,2 + 2 \cdot 0,7 = 2,6 \text{ мм};$$

$$D_c = 2,41 \cdot d_1 = 2,41 \cdot 2,6 = 6,3 \text{ мм};$$

$$V_1 = \pi \cdot 100 [4(0,12 + 0,07) \cdot 0,07 + (0,63 + 0,1) \cdot 0,1] = 40 \text{ см}^3;$$

$$V_2 = \frac{\pi}{4}(0,63^2 - 4 \cdot 0,26^2) \cdot 100 = 10 \text{ см}^3.$$

Если перевести значения объемов диэлектриков в процентное соотношение с учетом, что  $V_1 + V_2 = 100\%$ , то получим, что объем свободного пространства внутри сердечника кабеля составляет 20%, а объем полиэтиленовой изоляции 80%.

С другой стороны, Ю.А. Парфенов в своей работе «Новая технология восстановления кабельных линий» для этого же кабеля, приводит значение объема воздушного пространства равное 8  $\text{см}^3$ , а объем полиэтилена 92  $\text{см}^3$ , что составляет 8% и 92% соответственно [2].

Как отмечено в [2], в конструкциях кабелей изоляция токоведущих жил состоит из комбинации нескольких диэлектриков, что представляет собой неоднородную комбинированную структуру. При этом полагается, что смесь диэлектриков физическая, т.е. ее составляющие не вступают в химическую реакцию друг с другом. В кабельной технике известно несколько формул для расчета  $\epsilon_{\text{эКВ}}$ .

Согласно [3]  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  определяется из выражения вида:

$$\epsilon_{\text{эКВ}} = \frac{\epsilon_1 \cdot V_1 + \epsilon_2 \cdot V_2}{V_1 + V_2}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_1, \epsilon_2$  - диэлектрическая проницаемость материала твердого диэлектрика и воздуха соответственно;  $V_1, V_2$  - объемные значения твердого диэлектрика и воздуха соответственно, %.

В свою очередь Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц предложили формулу расчета  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  для замкнутого сердечника кабеля, которая предусматривает хаотически, неупорядоченное расположение в пространстве статистической смеси [2]. В данном случае, под понятием статистическая смесь имеется в виду вода, которая попадает внутрь сердечника кабеля, воздух и диэлектрик (ПЭ).

Согласно [2]  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  будет равна:

$$\sqrt[3]{\epsilon_{\text{эКВ}}} = \sum_{i=1}^n (V_i \cdot \sqrt[3]{\epsilon_i}), \quad (4)$$

где  $V_i$  и  $\epsilon_i$  - объемное содержание в смеси  $i$ -го компонента и его диэлектрической проницаемости соответственно.

Этой формулой можно рассчитывать  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  кабеля и при объеме воды в сердечнике равном нулю.

Используя (4) принимаем объем воды в сердечнике кабеля  $V_3 = 0$ .

По (3) и (4), зная объемы ПЭ изоляции и воздуха в сердечнике кабеля можно рассчитать значение  $\epsilon_{\text{эКВ}}$ , для приведенных выше разных значений  $V_1$  и  $V_2$ , и сравнить полученные данные.

В расчетах примем  $\epsilon_1 = 1,9$ ,  $\epsilon_2 = 1$  и определим  $\epsilon_{\text{эКВ}}$ .

1) В первом случае, при  $V_1 = 80\%$  и  $V_2 = 20\%$ :

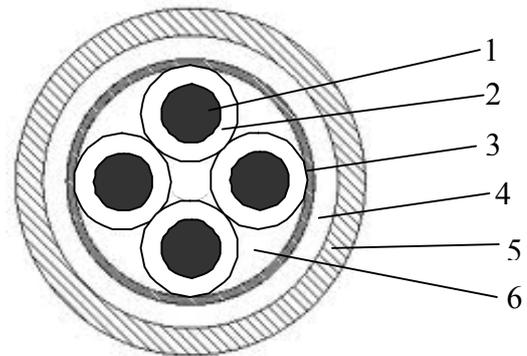


Рис. 1. Эскиз поперечного сечения кабеля КСПП-1×4×1,2, где: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция жилы; 3 – поясная изоляция; 4 – экран; 5 – оболочка; 6 – свободное (воздушное) пространство

$$\epsilon_{\text{экв}} = \frac{1,9 \cdot 80 + 1 \cdot 20}{80 + 20} = 1,72$$

2) Во втором случае, при  $V_1 = 92\%$  и  $V_2 = 8\%$ :

$$\epsilon_{\text{экв}} = \frac{1,9 \cdot 92 + 1 \cdot 8}{92 + 8} = 1,83$$

Если принять результаты расчета  $\epsilon_{\text{экв}}$ , полученные в первом случае за 100 %, то во втором – они составляют 106,4 %.

Из полученных результатов видно, что разные объемы свободного пространства сердечника кабеля и твердого диэлектрика изоляции жил в определенной степени влияют на значение эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции жил. Так же на ее значение влияет и качество самого изолирующего материала, так в выше изложенном примере мы приняли значение равное 1,9, что говорит о том что, используется ПЭ высокого качества. Но в действительности, производители кабельной продукции работают с полиэтиленом для изоляции жил разных фирм, у которых  $\epsilon_1$  меняется, как правило, в пределах от 1,9 до 2,4. Поэтому по (3) произведем расчет  $\epsilon_{\text{экв}}$  для значения  $\epsilon_1=2,1$ , что отвечает среднему качеству полиэтилена изоляции. Тогда при разных значениях  $V_1$  и  $V_2$ , полученных ранее,  $\epsilon_{\text{экв}}$  будет равна:

1) в первом случае, при  $V_1 = 80\%$  и  $V_2 = 20\%$ :

$$\epsilon_{\text{экв}} = \frac{2,1 \cdot 80 + 1 \cdot 20}{80 + 20} = 1,88$$

2) во втором случае, при  $V_1 = 92\%$  и  $V_2 = 8\%$ :

$$\epsilon_{\text{экв}} = \frac{2,1 \cdot 92 + 1 \cdot 8}{92 + 8} = 2,01$$

Для анализа зависимости  $\epsilon_{\text{экв}}$  от состава и объема изоляции токоведущих жил кабеля типа КСПП-1×4×1,2, при разных значениях  $\epsilon_1$  и диэлектрической проницаемости сухого воздуха, были выполнены её расчеты по (3) и (4) при  $\epsilon_1$  изменяющейся от 1,9 до 2,4. Расчетные значения  $\epsilon_{\text{экв}}$  сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Расчетные значения эквивалентной диэлектрической проницаемости, полученные по формулам (3) и (4) в зависимости от объемов свободного пространства сердечника кабеля и от качества ПЭ изоляции**

№	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	Значение параметра эквивалентной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{экв}}$ по:							
			[1]		[2]		формуле (3) для		формуле (4) для	
			$V_1, \%$	$V_2, \%$	$V_1, \%$	$V_2, \%$	[1]	[2]	[1]	[2]
1	1,9	1	80	20	92	8	1,72	1,83	1,69	1,81
2	1,95						1,76	1,87	1,73	1,86
3	2						1,8	1,92	1,76	1,9
4	2,05						1,84	1,97	1,8	1,95
5	2,1						1,88	2,01	1,84	1,99
6	2,15						1,92	2,06	1,87	2,04
7	2,2						1,96	2,1	1,91	2,08
8	2,25						2	2,15	1,95	2,12
9	2,3						2,04	2,2	1,98	2,17
10	2,4						2,12	2,29	2,05	2,26

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) качество полиэтилена изоляции напрямую влияет на значение эквивалентной диэлектрической проницаемости, а именно изменение  $\epsilon_1$  от 1,9 до 2,4 влечет за собой увеличение  $\epsilon_{\text{экв}}$  на 25 %;
- 2) при уменьшении объема воздушного пространства сердечника кабеля КСПП-1×4×1,2 на 12 %, значение  $\epsilon_{\text{экв}}$  возрастает на 10 %;
- 3) значения  $\epsilon_{\text{экв}}$  полученные по формуле (3) больше от значений полученных по (4) до 5 %.

Следовательно, для того чтобы произвести расчет  $\epsilon_{\text{экв}}$ , нужно знать качество полиэтилена т.е., точные значение диэлектрической проницаемости и объем воздуха в свободном пространстве сердечника кабеля, а также правильно выбрать расчетную формулу. На рис. 2 представлены графики зависимости  $\epsilon_{\text{экв}}$  от качества ПЭ изоляции для сердечников с различным объемом свободного пространства.

Для оценки степени влияния значения  $\epsilon_{\text{экв}}$  на величину рабочей емкости симметричной цепи кабеля  $C_p$ , используем широко известную формулу Кулешова В.Н. [1]:

$$C_p = \frac{k_y \epsilon_{\text{экв}} \cdot 10^{-6}}{36 \ln(2a\psi_3 / d_0)}, \tag{5}$$

где  $k_y$  – коэффициент укрутки жил в группы;  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  – значение эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции жил;  $a$  – расстояния между центрами жил, мм;  $\Psi_3$  – поправочный коэффициент, характеризующий близость цепи к заземленным другим жилам и оболочке.

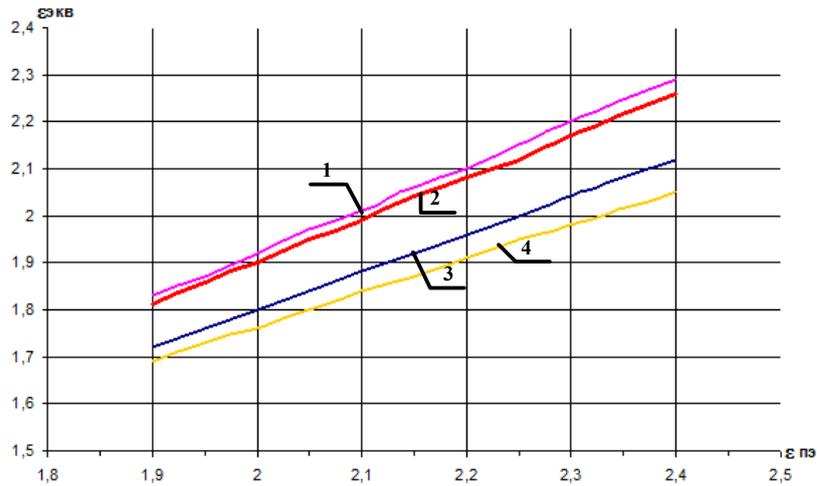


Рис. 2. Зависимости  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  полученные по формулам (3) и (4) от качества ПЭ изоляции и объема свободного пространства сердечника кабеля  $V_2$ , где: 1, 2 –  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  при  $V_2 = 8\%$  полученные по (3) и (4) соответственно; 3, 4 –  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  при  $V_2 = 20\%$  полученные по (3) и (4) соответственно

Величины  $a$ ,  $\Psi_3$  для звездной скрутки определяется из выражений [3]:

$$a = 1,41 \cdot d_1, \tag{6}$$

$$\Psi_3 = \frac{(d_3 + d_1 - d_0)^2 - a^2}{(d_3 + d_1 - d_0)^2 + a^2}. \tag{7}$$

Подставив значения в (6) и (7) для кабеля типа КСПП-1×4×1,2, было получено  $a = 3,67$  мм;  $\Psi_3 = 0,63$ .

Результаты расчетов  $C_p$  в зависимости от значений эквивалентной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{эКВ}}$ , взятых из табл. 1, при  $k_y = 1,002$  сведены в табл.2.

Таблица 2

Расчетные значения рабочей емкости симметричной цепи кабеля КСПП-1×4×1,2  $C_p$  в зависимости от качества ПЭ изоляции и от объема свободного пространства его сердечника

№	$\epsilon_1$	Значение параметра $\epsilon_{\text{эКВ}}$ по:				Значение рабочей емкости цепи $C_p$ по:			
		формуле (3) для		формуле (4) для		формуле (3)		формуле (4)	
		$V_2=20\%$ (№1)	$V_2=8\%$ (№2)	$V_2=20\%$ (№3)	$V_2=8\%$ (№4)	№1	№2	№3	№4
1	1,9	1,72	1,83	1,69	1,81	35,5	37,8	34,9	37,3
2	1,95	1,76	1,87	1,73	1,86	36,3	38,6	35,7	38,4
3	2	1,8	1,92	1,76	1,9	37,1	39,6	36,3	39,2
4	2,05	1,84	1,97	1,8	1,95	38	40,6	37,1	40,2
5	2,1	1,88	2,01	1,84	1,99	38,8	41,5	38	41,1
6	2,15	1,92	2,06	1,87	2,04	39,6	42,5	38,6	42,1
7	2,2	1,96	2,1	1,91	2,08	40,4	43,3	39,4	42,9
8	2,25	2	2,15	1,95	2,12	41,3	44,4	40,2	43,7
9	2,3	2,04	2,2	1,98	2,17	42,1	45,4	40,9	44,8
10	2,4	2,12	2,29	2,05	2,26	43,7	47,2	42,3	46,6

Таким образом, анализ исследований расчетных значений  $\epsilon_{\text{эКВ}}$  и  $C_p$  показал, что:  
 - при использовании ПЭ изоляции с диэлектрической проницаемостью от 1,9 до 2,4, для кабеля КСПП-1×4×1,2 у которого свободное пространство сердечника составляет 20 %, наблюдается снижение рабочей емкости цепи (по сравнению с нормируемым значением 43,5 нФ) до 18,3 % по формуле (3) и до 19,7

% по формуле (4);

- в случае, когда свободное пространство сердечника кабеля составляет 8 %, при  $\epsilon_1$  лежащей в пределах от 1,9 до 2,2 наблюдается снижение  $C_p$  до 14,3 %, а при увеличении  $\epsilon_1$  до значения 2,4 четко отслеживается прирост рабочей емкости цепи на 8,5 % по формуле (3) и на 7,2 % по формуле (4).

### Выводы

Исследования эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции токоведущих жил и рабочей емкости цепи кабеля типа КСПП-1×4×1,2 позволили установить, что:

1. Результаты расчетов, эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции токоведущих жил  $\epsilon_{\text{экв}}$  и рабочей емкости цепи кабеля  $C_p$ , выполненных по формулам различных авторов, зависят от качества полиэтилена изоляции, а также от объема свободного пространства сердечника кабеля.

2. Данные по объему свободного пространства в сердечнике кабеля, приведенные в различных литературных источниках, являются противоречивыми и меняются от 8 % до 20 %.

3. Расчетные значения:

-  $\epsilon_{\text{экв}}$  при уменьшении объема свободного пространства сердечника кабеля на 12 %, увеличивается на 10 %;

-  $\epsilon_{\text{экв}}$  при использовании формул различных авторов, отличаются между собой на 5 %;

-  $\epsilon_{\text{экв}}$  и  $C_p$  при увеличении диэлектрической проницаемости полиэтилена изоляции  $\epsilon_1$  от 1,9 до 2,4, изменяется на 25 % и на 22,8 % соответственно;

4. Для более точного расчета эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции токоведущих жил кабеля и рабочей емкости цепи, следует разработать методику правильной оценки свободного пространства сердечника кабеля.

### Литература

1. Брискер А.С., Руга А.Д., Шарле Д.Л. Городские телефонные кабели: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. Д.Л. Шарле. – М.: Радио и связь, 1984. – 304 с., ил.

2. Парфенов Ю.А., Белов Ю.Н., Вознюк В.Н. Новая технология восстановления кабельных линий. СПб: ИА “Энергомашиностроение”, 2006. 88с., 38 ил.

3. Гроднев И.И., Курбатов Н.Д. Линии связи: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1980. – 440 с., ил.

### References

1. Brisker A.S., Ruga A.D., Sharle D.L. Gorodskie telefonny`e kabeli: Spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop./Pod red. D.L. Sharle. – M.:Radio i svyaz, 1984. – 304 s., il.

2. Parfenov U.A., Belov U.N., Voznyuk V.N. Novaya tehnologiya vostanovleniya kabelny`h linij. SPb: IA “Energomashinostroenie”, 2006. 88s., 38 il.

3. Grodnev I.I., Kurbatov N.D. Linii svyazi: Uchebnik dlya vuzov. – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Svyaz, 1980.– 440 s., il.

Рецензія/Peer review : 16.1.2014 р.

Надрукована/Printed : 9.4.2014 р.

Рецензент: Троцишин І.В., д.т.н., проф.