

# РАСЧЁТ И ИЗМЕРЕНИЕ ЁМКОСТИ ДВУХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

## CALCULATION AND MEASUREMENT OF TWO-WIRE CABLE CAPACITY

**N.N. Khrenkov**, *Cand. Sc. (Engineering), Senior Research Scientist, Chief Expert of GK SST, Full Member of the RF Academy of Electrotechnical Sciences*

**Н.Н. Хренков**, *канд. техн. наук, с.н.с., главный эксперт ГК ССТ, действительный член АЭН РФ*

**Аннотация.** В статье сравниваются методы расчёта и моделирования электрической ёмкости двухжильных кабелей, как неэкранированных, так и экранированных, с результатами измерений на образцах.

**Ключевые слова:** двухжильные кабели, электрическая ёмкость, расчёт, моделирование, измерения

**Abstract.** The methods used for calculation and modeling of electrical capacity of two-wire cables, both unshielded and shielded, are compared with the methods of measurements made on cable samples.

**Key words:** two-wire cables, electrical capacity, calculation, modeling, measurements

*Материал поступил в редакцию 24.06.2022  
E-mail: hrenkov@sst.ru*

Сложность определения ёмкости двухжильных кабелей состоит в том, что в неэкранированных кабелях данной конструкции имеет место открытое электромагнитное поле. В экранированных кабелях структура электрического поля достаточно сложна и отсутствуют удовлетворительные методы расчёта. Обычно используемые методы расчёта ёмкости двухжильных кабелей являются приближёнными, что сказывается на расчёте реактивных сопротивлений и вторичных параметров кабельных изделий.

В работе проведено сравнение методов расчёта и метода моделирования полей электрической ёмкости двухжильных кабелей с результатами измерений на образцах.

### РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Ёмкость  $C$  – один из первичных параметров двухпроводной цепи, который зависит от конструкции кабеля, свойств изоляции и условий прокладки. Точное знание первичных параметров необходимо при проектировании и модернизации двухжильных кабелей, однако традиционные методы расчётов ёмкости не обеспечивают требуемой точности.

Обычный подход к расчёту ёмкости двухжильных и симметричных кабелей базируется на взглядах, выработанных для воздушных линий связи. Рассматривается цепь с достаточно удалёнными друг от друга проводниками. Между ними однородная изоляция с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_a$ . Каждый из проводников можно рассматривать как одиночный, на проводниках имеются заряды  $+q$  и  $-q$  (рис. 1).

Специалисты, работающие в области кабелей связи, при расчёте ёмкости симметричных цепей обычно используют формулу, которая приводится в трудах профессора И.И. Гроднева [1] и его последователей [2].

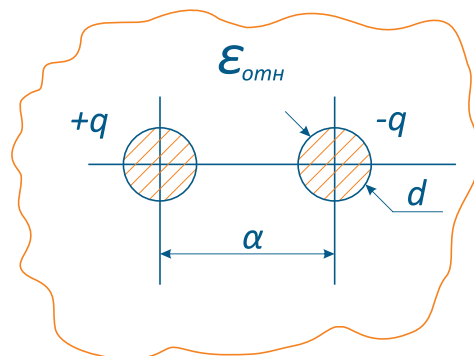


Рис. 1. Двухпроводная цепь с удалёнными проводниками

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{омн}} \cdot 10^{-9}}{36 \ln \left( \frac{2a-d}{d} \right)} \Phi / \text{м}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{омн}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость пространства между проводниками;

$d$  – диаметр проводников (в случае скрученных проводников  $d_p$  – расчётный диаметр, несколько меньший, чем диаметр по наружному повиву);

$a$  – расстояние между центрами проводников (рис. 1).

При выводе формулы (1) предполагалось, что проводники достаточно далеко разнесены друг от друга, и можно не учитывать взаимного влияния полей.

Для двухжильного кабеля это не совсем справедливо, так как при таком подходе не учитывается изменение напряжённости электрического поля по углу  $\varphi$  и повышение напряжённости поля в пространстве между проводниками (рис. 2), которое имеет место в случае двух проводников. Кроме того, в двухжильных кабелях изоляция может быть неоднородной, например, двухслойной из разных материалов.

При выводе расчётных формул, как у Гроднева, так и у других авторов, по умолчанию предполагается, что всё пространство не только между проводниками, но и далеко от них заполнено однородной средой с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ . Это положение справедливо для воздушных линий, но не для кабелей, в которых жилы покрыты электрической изоляцией, а зачастую ещё и полимерной оболочкой (рис. 3), а вокруг кабеля окружающая среда (чаще всего воздух).

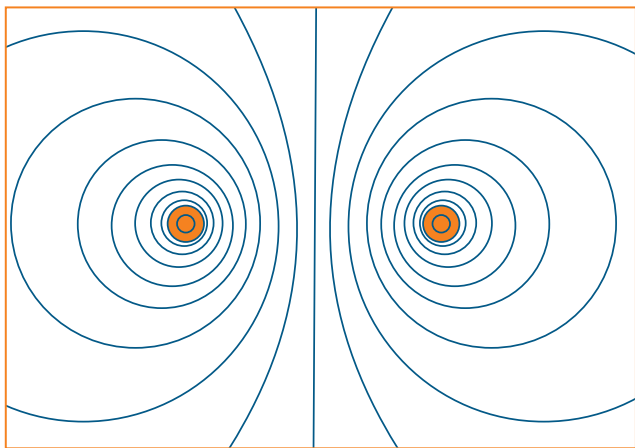


Рис. 2. Картина электрического поля между проводниками двухпроводной линии в воздухе

Кулешов В.Н. [3] и Шарле Д.Л. [4], многие годы занимавшиеся конструированием и расчётами характеристик многопарных городских телефонных кабелей, используют формулу:

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{омн}} \cdot 10^{-9}}{36 \ln \left( \frac{2a}{d} \right)} \Phi / \text{м}. \quad (2)$$

В специализированном справочнике [5], посвящённом расчёту электрических ёмкостей, для пары проводов в неограниченном пространстве даётся формула (3), которая по физическому содержанию равноценна формуле (2). Рекомендаций по расчёту изолированных проводников не приводится.

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{омн}} \cdot 10^{-9}}{18 \ln \left( \frac{a^2}{r^2} \right)} \Phi / \text{м} \quad (3)$$

где  $r$  – радиус проводника.

В [6] предлагается формула (4) для расчёта ёмкости двухпроводной цепи, учитывающая неоднородность электрического поля между проводниками. При этом также полагается, что пространство, окружающее проводники, заполнено однородным диэлектриком.

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{омн}} \cdot 10^{-9}}{36 \operatorname{arch} \left( \frac{a}{r} \right)} = \frac{\varepsilon_{\text{омн}} \cdot 10^{-9}}{36 \ln \left[ \left( \frac{a}{d} \right) + \sqrt{\left( \frac{a}{d} \right)^2 - 1} \right]} \Phi / \text{м}. \quad (4)$$

Следует упомянуть обстоятельную статью К.К. Абрамова «Расчёт электрических ёмкостей многожильного кабеля с комбинированной изоляцией» [7].

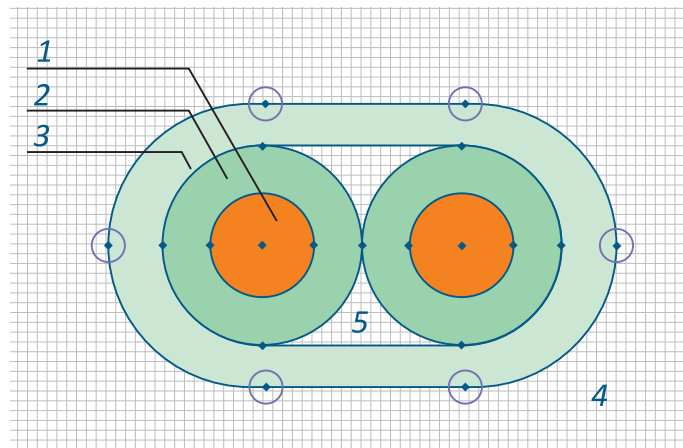


Рис. 3. Расчётная модель двухжильного кабеля для примера 1: 1 – проводники; 2 – изоляция проводников; 3 – изолирующая оболочка; 4 – окружающая среда; 5 – воздушные зазоры

Несомненно, данная статья открывает возможность расчётов ёмкостных параметров сложных многожильных кабелей связи и LAN-кабелей. Хотелось бы отметить, что К.К. Абрамов в упомянутой статье основной упор делает на многожильные кабели как в экране, так и без экрана. Предлагаемый им метод расчёта позволяет учесть сложную структуру кабеля, влияние поясной изоляции и других включений между проводниками на ёмкостные параметры и сопротивление изоляции. Предлагаемый им подход достаточно трудоёмок и требует основательной инженерной подготовки или разработки программного комплекса, в котором были бы заложены все идеи статьи.

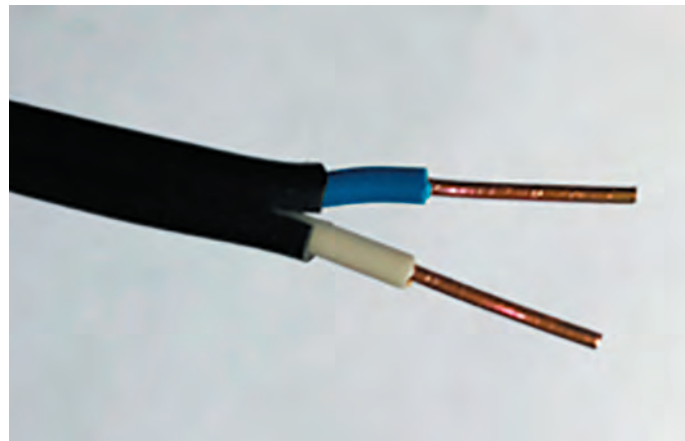


Рис. 4. Внешний вид провода ВВГ-Пнг (А)LS 2х1,5

### ПРОВЕРКА РАСЧЁТНЫХ ФОРМУЛ МЕТОДАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯМИ НА ОБРАЗЦАХ

С целью проверки соответствия приведённых выше расчётных формул, результатов моделирования и результатов измерений выполнена следующая работа.

На нескольких образцах двухжильных кабелей измерена ёмкость. По приведённым выше формулам выполнен расчёт ёмкости для рассматриваемых образцов с учётом их размеров. Также выполнен расчёт ёмкости с помощью пакета «Электростатика», входящего в состав комплекса моделирования полей ELCUT [8]. Результаты измерений и расчётов иллюстрируются на примерах.

**Пример 1.** Проведены измерения ёмкости двухжильного кабеля ВВГ-Пнг (А)LS 2х1,5 (образец № 1), внешний вид которого показан на рис. 4.

Описание конструкции провода:

- жилы медные однопроволочные – диаметром 1,36 мм, расчётное сечение 1,45 мм<sup>2</sup>;
- изоляция жил из ПВХ-пластиката пониженной пожарной опасности, белого и синего цвета, диаметр по изоляции 2,6 мм;
- оболочка из ПВХ-пластиката пониженной пожарной опасности, чёрного цвета; размер по оболочке 6,6х3,7 мм;
- расчётное расстояние между осями жил – 2,6 мм;
- длина образца провода 3,85 м;
- измерения выполнены с помощью RLC метра AM-3003, на частоте 1000 Гц.

Для первоначальных расчётов диэлектрическая проницаемость изоляции принималась равной 3 по результатам ранее выполненных исследований  $\epsilon$  ПВХ. Расчёты выполнены по приведённым выше формулам. В расчётах для сравнения также рассмотрен условный вариант, когда всё пространство между проводниками заполнено воздухом с  $\epsilon = 1$ .

Для расчётов в ELCUT построена геометрически подобная модель провода (рис. 3). На поверхности проводников задаётся пара зарядов +0,1 и –0,1 Кулон. Граница нулевого потенциала отнесена от центра провода на 500 мм. Модель позволяет определить потенциалы на поверхности проводников. Ёмкость определялась из соотношения (5):

$$C = \frac{q}{U_1 - U_2} \quad (5)$$

Результаты расчётов и измерений сведены в таблицу.

*Пояснения к таблице*

Расчёты с 1 по 4 выполнены для случая, когда два проводника диаметром 1,36 мм находятся в пространстве, заполненном воздухом. Расстояние между центрами проводников – 2,6 мм.

Расчёты с 5 по 8 выполнены для тех же двух проводников, но при условии, что диэлектрическая проницаемость пространства равна 3.

Расчёты 4 и с 8 по 11 выполнены на модели по рис. 3 с помощью комплекса ELCUT.

Из этих расчётов следует, что результаты, полученные при моделировании и по формуле Миролубова, совпадают. Формулы Гроднева и Кулешова дают несколько отличные результаты.

Таблица 6

Результаты расчётов и измерений ёмкости двухжильного кабеля (рис. 4)

№	Источник	Формула	Логарифм	$U_1-U_2$ , В	Диэлектрическая проницаемость	Ёмкость, пФ/м
1	Гроднев [1]	(1)	1,038		1	26,8
2	Кулешов [3]	(2)	1,341		1	20,7
3	Миролюбов [6]	(4)	1,264		1	22,0
4	ELCUT [7]	(5)		$45,45 \cdot 10^9$	1	22,0
5	Гроднев [1]	(1)	1,038		3	80,3
6	Кулешов [3]	(2)	1,341		3	62,1
7	Миролюбов [6]	(4)	1,264		3	65,9
8	ELCUT [7]	(5)		$15,15 \cdot 10^9$	3	66
9	ELCUT [7]	(5)		$11,54 \cdot 10^9$	3,94	86,7
10	ELCUT [7]	(5)		$20,47 \cdot 10^9$	3*	48,8
11	ELCUT [7]	(5)		$11,54 \cdot 10^9$	6,7*	86,7
12	измерения					86,6

Примечание: цифры 3\* и 6,7\* означают, что  $\varepsilon = 3$  или 6,7, принята только для материалов изоляции жил и оболочки. Окружающая среда – воздух с  $\varepsilon = 1$ .

Расчёт 9. Учитывая, что результат измерения ёмкости на образце в 1,31 раза превышает значение ёмкости, полученное в модели с пространством, заполненным диэлектриком с  $\varepsilon = 3$ , то для достижения экспериментального результата диэлектрическая проницаемость всего пространства, окружающего проводники, должна быть увеличена до  $\varepsilon = 3,94$ .

Для сравнения выполнены расчёты диэлектрической проницаемости, беря за основу измеренное значение ёмкости кабеля ВВГ (86,6 пФ/м) по формулам (1), (2) и (4). Полученные значения диэлектрической проницаемости и процент отличия от величины, определённой на модели, следующие: по Гродневу – 3,24, отличие минус 17,8 %; по Кулешову – 4,18, отличие – 6,1 %; по Миролюбову 3,94, нет отличия.

Расчёт 10 выполнен на модели по рис. 3, при том, что изоляция и оболочка имеют диэлектрическую проницаемость равную 3, а окружающая среда и зазоры под оболочкой заполнены воздухом с  $\varepsilon = 1$ .

Расчёт 11 показывает, что получить результат, равный экспериментальному, на модели, аналогичной расчёту 10, можно, только если положить для изоляции и оболочки  $\varepsilon = 6,7$ .

Полученное значение  $\varepsilon = 6,7$  не характерно для обычных ПВХ-пластикатов. Для проверки возможной величины диэлектрической проницаемости выполним следующий расчёт. При измерении провода ВВГ получены следующие полные значения индуктивности и ёмкости:  $L = 2,2 \cdot 10^{-6}$  Гн и  $C = 337,4 \cdot 10^{-12}$  Ф. Удельные значения:  $L_1 = 5,65 \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $C_1 = 86,6 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Определим характеристическое (волновое) сопротивление линии по формуле, которая применима на высоких частотах и не может использоваться для определения волнового сопротивления линии на частоте 1 кГц, однако позволяет получить оценку для значения диэлектрической проницаемости:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{337 \cdot 10^{-12}}} = 80,8 \text{ Ом} \quad (6)$$

Для расчёта волнового сопротивления двухпроводных линий на высоких частотах существует формула (7), через которую можно оценить значение диэлектрической проницаемости. Значение логарифма берём из таблицы. Данная формула, как и формула (4) предполагает, что всё пространство вокруг жил заполнено однородным диэлектриком.



$$Z = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{2a}{d} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{120}{Z} \ln \frac{2a}{d} \right)^2 = \left( \frac{120}{80,8} 1,341 \right)^2 = 3,97$$

Полученная цифра очень близка к полученному ранее значению 3,94 для случая, когда всё пространство между жилами заполнено диэлектриком. Следовательно, данный способ может использоваться для оценки эквивалентной диэлектрической проницаемости, соответствующей измеренной величине ёмкости.

Для оценки точности данного подхода определили, что для рассматриваемого кабеля диапазон «высоких частот»  $\omega L (R > 5)$  начинается выше 40 кГц. Значение волнового сопротивления при 1 кГц в основном определяется сопротивлением проводников кабеля, а не индуктивностью. В то же время расчётная индуктивность рассматриваемого кабеля при 40 кГц отличается от индуктивности при 1 кГц всего на 6,5 %. Данная цифра показывает примерную точность применённой методики оценки эквивалентной диэлектрической проницаемости.

С целью определения диэлектрической проницаемости изоляции, которой покрыты жилы исследуемого кабеля, кабель был разобран и на изолированные жилы наложен экран из металлической фольги. Измерена ёмкость полученных коаксиальных образцов, у которых нет внешнего электрического поля и измеренная ёмкость определяется размерами и диэлектрической проницаемостью изоляции. Получены следующие значения: 321,2 пФ/м у образцов с белой изоляцией и 324 пФ/м у образцов с синей изоляцией. Используя формулу для ёмкости коаксиала

$$C_{\kappa} = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-9}}{18 \ln \frac{D}{d}}$$

определили, что  $\varepsilon$  изоляции жил имеет значения 3,75–3,8.

Если теперь задать в модели для изоляции жил кабеля диэлектрическую проницаемость 3,8, то для получения ёмкости, соответствующей экспериментальным результатам, пришлось увеличить диэлектрическую проницаемость оболочки до необычно высокого значения  $\varepsilon = 27$ .

Возможно это связано с тем, что для обеспечения низкого дымовыделения при сгорании кабеля, материал оболочки содержит большой процент наполнителей.

**Пример 2.** Аналогично кабелю ВВГ проведено исследование двухжильного не стандартного кабеля (образец № 2) следующей конструкции:

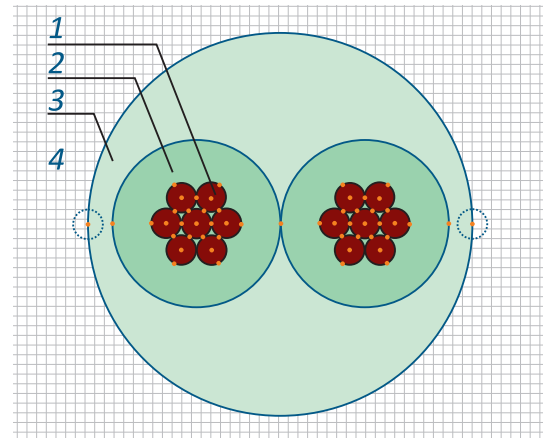


Рис. 5. Расчётная модель двухжильного кабеля для примера 2: 1 – 7-проволочные проводники; 2 – изоляция проводников; 3 – изолирующая оболочка; 4 – окружающая среда

- жилы медные 7-проволочные, конструкции 7×0,516 мм, наружный диаметр – 1,548 мм, расчётное сечение – 1,463 мм<sup>2</sup>;
- изоляция жил из ПЭ-композиции, белого и чёрного цвета, диаметр по изоляции – 2,96 мм;
- оболочка из полимерной композиции, чёрного цвета, диаметр по оболочке – 6,66 мм;
- расчётное расстояние между осями жил – 2,96 мм;
- длина образца провода – 4,2 м.

Измерения выполнены с помощью RLC метра АМ-3003, на частоте 1000 Гц.

Расчётная модель кабеля показана на рис. 5.

Если воспользоваться формулой (4), то для диэлектрической проницаемости среды между жилами рассматриваемого кабеля при ёмкости 71,8 пФ/м получим  $\varepsilon = 3,455$ .

Далее выполнено моделирование стационарного электрического поля, при диэлектрической проницаемости всего пространства между проводниками  $\varepsilon = 3,455$ . Полученное на модели значение ёмкости равно 71,84 пФ/м.

После этого найдём значение  $\varepsilon$  изоляции и оболочки, считая, что вокруг кабеля воздух. При  $\varepsilon = 3,88$  ёмкость кабеля с 7-проволочной жилой равна 71,7 пФ/м.

Для сравнения была построена модель кабеля с размерами по изоляции и по оболочке такими же, как у кабеля с многопроволочной жилой, но с однопроволочными проводниками. Диаметр однопроволочной жилы, равный 1,46 мм, получен умножением диаметра 1,548 мм (при 7 проволоках) на коэффициент 0,943.

При том же значении диэлектрической проницаемости расчёт на модели кабеля с однопроволочными проводниками даёт значение ёмкости 71,9 пФ/м. Данный результат показывает, что принятый в практике расчётов электрических характеристик

кабелей с многопроволочными жилами коэффициент 0,94 подтверждается данным расчётом.

Для данного образца не проводились исследования диэлектрической проницаемости изоляции жил. Если положить, что она равна 2,4, то для получения ёмкости 71,8 пФ/м потребовалось задать для материала оболочки  $\varepsilon = 17$ .

Полученные в данном исследовании очень большие значения для диэлектрической проницаемости материалов оболочек не стыкуются даже с наиболее значительными из рекомендуемых стандартом [9], в котором указано для ПВХ-пластиката  $\varepsilon = 8$ . Было бы желательно провести исследования диэлектрической проницаемости современных материалов на образцах коаксиальных кабелей с изоляцией из исследуемых материалов. Достоинство данного метода в простоте измерительной аппаратуры, к тому же измеряются характеристики материала, прошедшего операцию экструдирования.

В реальном кабеле необходимо учитывать: скрутку жил, влияние соседних цепей, заземлённых металлических оболочек и конструкций, по которым прокладывается кабель.

### ЁМКОСТЬ ЭКРАНИРОВАННЫХ ДВУХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

**Пример 3.** Для проведения измерений на другом отрезке кабеля ВВГ 2×1,5 проведены измерения ёмкости кабеля после наложения на оболочку экрана. Конструкция кабеля без экрана описана в примере 1. Экран выполнен в виде обмотки алюминиевой фольгой, скреплённой оплёткой из медных лужёных проволок. Так же измерялась ёмкость данного отрезка кабеля без экрана.

На этом отрезке кабеля получены результаты, несколько отличающиеся от данных предыдущих измерений: ёмкость кабеля без экрана – 84,2 пФ/м; ёмкость экранированного кабеля – 127,3 пФ/м.

Аналогично тому, как в **примере 1**, были построены в ELCUT модели и выполнены расчёты для кабелей с экраном и без экрана. Исходя из измеренной ёмкости исходного кабеля, равной 84,2 пФ/м, и с учётом предыдущего опыта, для материала изоляции значение диэлектрической проницаемости принято равным 3,8, при этом для материала оболочки получено несколько меньшее значение  $\varepsilon = 24,3$ .

По результатам моделирования получены следующие результаты: ёмкость кабеля без экрана – 84,3 пФ/м; ёмкость экранированного кабеля – 133,6 пФ/м.

При наличии экрана электрическое поле концентрируется в непосредственной близости от проводников и ёмкость между жилами у экранированных кабелей выше, чем у кабелей без экрана (рис. 6).

Рассчитать ёмкость экранированного двухпроводного кабеля аналитически не представляется возможным. В [3] предлагается метод решения на основе использования принципа зеркальных отражений, но он рассматривает конструкцию кабеля, показанную на рис. 7.

Экран имеет цилиндрическую форму с внутренним радиусом  $r_э$ , а всё пространство между проводниками и экраном заполнено однородным диэлектриком. Формула для расчёта ёмкости имеет вид:

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{омн}} \cdot 10^{-9}}{18 \ln \frac{2a\varphi}{d_{\text{эс}}}} \quad \varphi = \frac{4r_э^2 - a^2}{4r_э^2 + a^2} \quad (8)$$

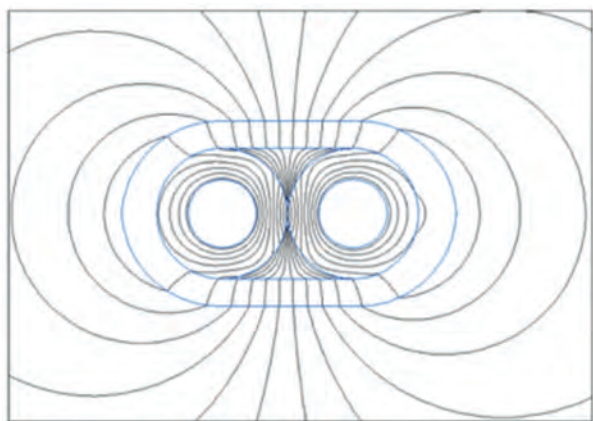


Рис. 6. Сравнение картин электрических полей в двухжильном кабеле. Слева – кабель без экрана; справа – тот же кабель в экране по оболочке

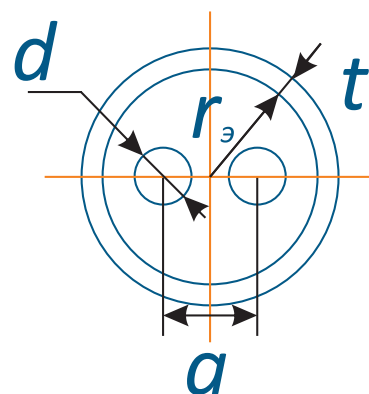


Рис. 7. Схема двухжильного экранированного кабеля



где  $\varepsilon_{\text{отн}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость пространства между жилами и экраном;

$a$  – расстояние между центрами проводников диаметром  $d_{\text{ж}}$ ;

$r_3$  – внутренний радиус экрана;

$\varphi$  – поправочный коэффициент.

Учитывая полученный ранее результат (таблица), что в случае неэкранированного кабеля расчётные и экспериментальные значения ёмкости совпадают в том случае, когда всё пространство между проводниками и вокруг них имеет значение  $\varepsilon = 3,94$ , вычислили ёмкость экранированного кабеля с проводниками как у ВВГ 2×1,5, экраном радиусом 3,4 мм и  $\varepsilon = 3,94$ . Получено значение 209 пФ/м. Данное значение существенно отличается от полученного в эксперименте (127,3 пФ/м) и при моделировании (133,6 пФ/м).

В результате проведённых исследований установлено:

1. Результаты расчётов с использованием формулы Миролюбова практически совпадают с результатом,

получаемым при моделировании, когда всё пространство заполнено однородным диэлектриком. Ёмкость, получаемая по формуле Кулешова, на 5,7 % меньше результата, определённого при моделировании.

2. Расчёты по формуле Гроднева дают завышенные значения ёмкости. Они на 21,2 % превышают результат моделирования и расчётов по формуле Миролюбова.

3. При моделировании ёмкости одиночного двухжильного кабеля, с изолированными жилами и размещённого в воздухе, требуемое моделью значение диэлектрической проницаемости для материалов изоляции и оболочки на 6–7 % больше величины  $\varepsilon$ , определяемой по формуле Кулешова.

4. Достоверный расчёт ёмкости реальных кабелей с неоднородной изоляцией, с формой, отличающейся от цилиндра, и покрытых экраном, может быть получен на математических моделях, учитывающих все особенности конструкции кабеля и наличие в непосредственной близости металлических конструкций и электроизоляционных материалов. ■

#### Список источников

1. **Гроднев И.И., Верник С.М.** Линии связи: учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 544 с.
2. **Рязанов И.Б.** Основы электросвязи и передачи информации по направляющим системам. – М.: МЭИ, 1997. – 144 с.
3. **Кулешов В.Н.** Теория кабелей связи. Под ред. В.А. Новикова. – М.: Связьиздат, 1950. – 420 с.
4. **Шарле Д.Л.** Конструирование и расчёт городских телефонных кабелей. – М.: Энергоиздат, 1982. – 248 с.
5. **Иоссель Ю.А., Кочанов Э.С., Струнский М.Г.** Расчёт электрической ёмкости. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
6. **Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н.** Методы расчёта электростатических полей. – М.: Высшая школа, 1963. – 415 с.
7. **Абрамов К.К.** Расчёт электрических емкостей многожильного кабеля с комбинированной изоляцией // Кабели и провода. – 2009. – № 316. – С. 3–7.
8. ELCUT® Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. – С-Пб.: Тор, 2017. – 300 с.
9. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1–2009. Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчёта номинальной токовой нагрузки (100-процентный коэффициент нагрузки) и расчёт потерь. Общие положения. – М.: Стандартиформ, 2010. – 25 с.

#### List of References

1. **Grodnev I.I., Vernik S.M.** Communication lines: college textbook. – 5th revised edition. – М.: Radio and Communications, 1988. - 544 p.
2. **Ryazanov I.B.** Fundamentals of telecommunication and transmission of information by guiding systems. – М.: MEI, 1997. – 144 p.
3. **Kuleshov V.N.** Theory of communication cables. Under the editorship of V.A. Novikov. – М.: Svyazizdat, 1950. – 420 p.
4. **Sharle D.L.** Engineering and design of local telephone cables. – М.: Energoizdat, 1982. – 248 p.
5. **Iosel' Yu.A., Kochanov E.S., Strunsky M.G.** Calculation of electrical capacity. – 2nd revised edition. – L.: Energoizdat, 1981. – 288 p.
6. **Mirolubov N.N., Kostenko M.V., Levinshstein M.L., Tikhodeev N.N.** Electric field calculation methods. – М.: Higher school, 1963. – 415 p.
7. **K.K. Abramov.** Capacity calculation for a multiconductor cable with a composite insulation // Cables and Wires. – 2009. – № 3 (316). – P. 3–7.
8. ELCUT® Modelling of electromagnetic, thermal and elastic fields by finite element method. User manual. – St-Petersburg: Tor, 2017. – 300 p.
9. GOST R IEC 60287-1-1–2009. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1. Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General (IDT). – М.: Standartinform, 2010. – 25 p.