

## Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.315

doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-82-96

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ИНДУКТИВНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ДО 3 кВ

Максим Леонидович Коровин<sup>1</sup>, Дмитрий Олегович Сорока<sup>2</sup>,  
Михаил Юрьевич Куликов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,  
г. Москва, Россия

<sup>1</sup> corovinmaksim@yandex.ru

<sup>2</sup> dmitrysoroka96@gmail.com

<sup>3</sup> muk.56@mail.ru

**Аннотация.** Разработана методика расчета индуктивности и электрической емкости токопроводящих жил силовых кабелей. Цель работы – разработать такую методику расчета индуктивности и электрической емкости, которая бы обеспечивала оптимальную точность расчета в совокупности с наименьшими трудозатратами. Приведены основные этапы разработки методики расчета индуктивности и электрической емкости для одно-, двух-, трех-, четырех- и пятижильных конструкций силовых кабелей на номинальное напряжение до 3 кВ. Главную сложность в разработке математической модели представляет расчет средних геометрических расстояний между центрами токопроводящих жил, особенно сильно эта проблема проявляется при определении геометрических параметров токопроводящих жил секторной формы. Секторные токопроводящие жилы благодаря своей геометрической форме затруднительно описать известными математическими зависимостями, поэтому для определения геометрических параметров секторных жил был применен графический метод. Необходимые сектора были построены в программе КОМПАС-3D, в ней же и проведены измерения требующихся параметров. Также в работе произведен анализ разницы значений индуктивности и электрической емкости на примере кабеля марки ВВГ с круглыми и секторными жилами, построены сравнительные графики и даны рекомендации по особенностям применения предложенной методики расчета.

**Ключевые слова:** методика, расчет, силовой кабель, токопроводящая жила, изолированная токопроводящая жила, среднее геометрическое расстояние, индуктивность, электрическая емкость

**Для цитирования:** Коровин М.Л., Сорока Д.О., Куликов М.Ю. Разработка методики расчета индуктивности и электрической емкости токопроводящих жил силовых кабелей на номинальное напряжение до 3 кВ // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №4 (26). С. 82-96. doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-82-96.

Original article

Open Access Article

### DEVELOPING A METHOD FOR CALCULATING THE INDUCTANCE AND CAPACITANCE OF CONDUCTIVE CORES OF POWER CABLES FOR RATED VOLTAGE OF UP TO 3 kV

Maxim L. Korovin<sup>1</sup>, Dmitry O. Soroka<sup>2</sup>, Mikhail Yu. Kulikov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow,  
Russia

<sup>1</sup> corovinmaksim@yandex.ru

<sup>2</sup> dmitrysoroka96@gmail.com

<sup>3</sup> muk.56@mail.ru

**Abstract.** *The authors develop a method for calculating the inductance and capacitance of conductive cores of power cables. The aim of the work is to carry out a method for calculating inductance and capacitance that would ensure optimal calculation accuracy together with the least labour costs. The main stages of developing a method for calculating inductance and capacitance for one-core, two-core, three-core, four-core and five-core structures of power cables for rated voltages of up to 3 kV are presented. The main difficulty in developing a mathematical model is calculating the average geometric distances between the centres of conductive cores; this problem is especially vital when determining the geometric parameters of sector-shaped conductive cores. Due to their geometric shape, sector-shaped conductive cores are difficult to describe using known mathematical relationships; therefore, a graphical method is applicable to determine the geometric parameters of sector-shaped cores. The authors construct the needed sectors in the KOMPAS-3D program, and measure the required parameters in it. The paper also analyzes the difference in inductance and capacitance values using the example of VVG cable with round and sector cores, constructs comparative graphs, and provides recommendations on the specifics of using the proposed calculation method.*

**Keywords:** method, calculation, power cable, conductive core, insulated conductive core, geometric mean distance, inductance, electrical capacitance

**For citation:** Korovin M.L., Soroka D.O., Kulikov M.Yu. Developing a Method for Calculating the Inductance and Capacitance of Conductive Cores of Power Cables for Rated Voltage of up to 3 kV. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 4 (26). pp. 82-96. doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-82-96.

## Введение

Кабель – это изделие, содержащее одну или более изолированных жил (проводников), заключенных в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой, в зависимости от условий прокладки и эксплуатации, может иметься соответствующий защитный покров (возможно, с броней), и пригодное, в частности в земле или под водой [1]. В частности, силовой кабель – это кабель для передачи электрической энергии токами промышленных частот [2].

Согласно ГОСТ 31996-2012 по количеству токопроводящих жил (ТПЖ) силовые кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение до 3 кВ могут быть: одножильные, двухжильные, трехжильные, четырехжильные и пятижильные. По конструктивному исполнению токопроводящих жил: круглые и секторные [3]. Также ТПЖ могут иметь дополнительные огнестойкие барьерные слои. Все эти конструктивные особенности необходимо учитывать при расчете индуктивности и электрической емкости ТПЖ кабелей.

Значение индуктивности ТПЖ необходимо рассчитывать для определения реактивного (индуктивного) сопротивления жил, токов прямой, обратной и нулевой последовательности, которые необходимы для расчета токов короткого замыкания в электросетях.

На практике для безаварийной эксплуатации электрических сетей необходимо на стадии проектирования осуществить проверку ряда силового оборудования, исходя из расчетных значений токов короткого замыкания: силовые выключатели, разъединители, трансформаторы тока и др. [4]

Проверка выключателей осуществляется по следующим критериям [4]: коммутационной способности; электродинамической стойкости; термической стойкости.

Определение электрической емкости ТПЖ необходимо для расчета тока заряда на фазу и для расчета емкостного тока короткого замыкания на землю.

Актуальность данной работы заключается в том, что индуктивность и электрическая емкость ТПЖ являются важными характеристиками, расчет которых необходим для правильного проектирования электрических сетей и подбора силового оборудования.

## Постановка проблемы

Методика расчета индуктивности и электрической емкости, которую рассмотрим далее, связана с расчетом геометрических параметров изолированных жил. Особую сложность представляет расчет средних расстояний между центрами ТПЖ, особенно эта проблема касается секторных ТПЖ, геометрические параметры которых затруднительно описать известными математическими зависимостями.

В данной статье, помимо математического метода расчета геометрических параметров ТПЖ, будет также рассмотрен и геометрический метод, основанный на использовании дополнительного программного обеспечения.

Целью данной работы является разработка такой математической модели расчета индуктивности и электрической емкости, которая бы обеспечивала требуемую точность расчета в совокупности с приемлемыми трудозатратами. Также необходимо дать рекомендации по особенностям применения предложенной математической модели.

## Результаты исследования

*Методика расчета индуктивности ТПЖ.* При расчете индуктивности следует иметь в виду, что сопротивление некоторых конструкций кабелей не является симметричным, например, четырёхжильных кабелей или одножильных кабелей, расположенных в одной плоскости. В этом случае при расчётах вводят понятие средней индуктивности  $L_a$ , которую можно рассчитать по формуле [5]:

$$L_a = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{2 \cdot l_{ad}}{D_c} \right) + \frac{1}{4} \right), \quad (1)$$

где  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость материала (Гн/м);  $l_{ad}$  – среднее расстояние между центрами жил кабеля (мм).

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0, \quad (2)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала;  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

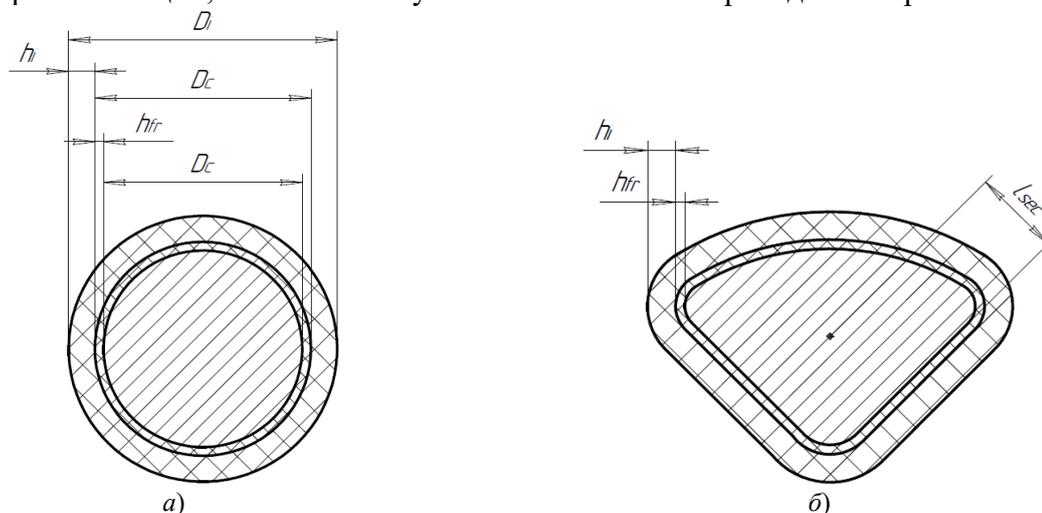
Перед определением средних расстояний между центрами жил кабеля, необходимо отметить что понимается под данной величиной.

Нижеуказанная методика определения среднего расстояния основана на допущении, заключающемся в том, что все геометрические параметры кабеля не отклоняются от своих номинальных значений. Исходя из этого, можно утверждать, что среднее расстояние между центрами ТПЖ является средним геометрическим расстоянием. В таком случае данную величину можно определить по формуле:

$$l_{ad} = \sqrt[n]{l_1 \cdot l_2 \cdot \dots \cdot l_n}. \quad (3)$$

В данной статье рассмотрим две возможные конструкции ТПЖ: круглую и секторную. Наиболее широкое распространение получили ТПЖ круглой формы благодаря более простой технологии изготовления и оптимальным эксплуатационным характеристикам. Секторные ТПЖ нашли применение в силовых кабелях на номинальное напряжение до 3 кВ (согласно ГОСТ 31996-2012). Данная конструкция сложнее с точки зрения технологии изготовления, но в конечном итоге позволяет снизить массогабаритные параметры кабеля. Это позволяет несколько уменьшить себестоимость кабеля (за счет меньших затрат материалов), упростить его перевозку (за счет меньшей массы) и прокладку (за счет меньших габаритов).

Введем некоторые геометрические параметры, которые будут рассматриваться далее:  $D_c$  – диаметр ТПЖ, мм;  $l_s$  – расстояние от центра секторной ТПЖ до ее края, мм;  $h_{fr}$  – толщина барьерного слоя для огнестойких кабелей, мм (данная величина применима к кабелям в исполнении «FR»);  $D_{fr}$  – диаметр по огнестойкому барьеру, мм;  $h_i$  – толщина изоляции, мм;  $D_i$  – диаметр по изоляции, мм. Все вышеуказанные величины приведены на рис. 1.



**Рис. 1. Геометрические параметры изолированной ТПЖ:**

*a* – круглой формы; *b* – секторной формы

**Fig. 1. Geometrical parameters of insulated conductive core:**

*a* – round shape; *b* – sector shape

Центром ТПЖ круглой формы является центр окружности. Чтобы найти центр ТПЖ секторной формы необходимо сделать дополнительные построения (рис. 2).

Через две боковые стороны сектора проведем две прямые, а третью прямую проведем перпендикулярно к дуге сектора. Точки пересечения прямых образуют равнобедренный треугольник, в который можно вписать окружность с центром в точке  $O$ . Данный центр окружности также является точкой пересечения биссектрис треугольника.

Исходя из вышесказанного, точка  $O$  будет являться геометрическим центром сектора.

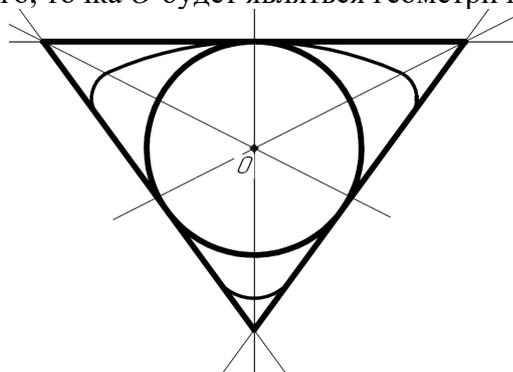


Рис. 2. Дополнительные построения для определения центра секторной ТПЖ  
Fig. 2. Additional constructions for determining the center of the sector current-carrying core

*Одножильный кабель.* При расчете индуктивности ТПЖ одножильного кабеля, учитывается прокладка трех одножильных кабелей в одной плоскости, либо треугольником (рис. 3). Центры ТПЖ отмечены буквами  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

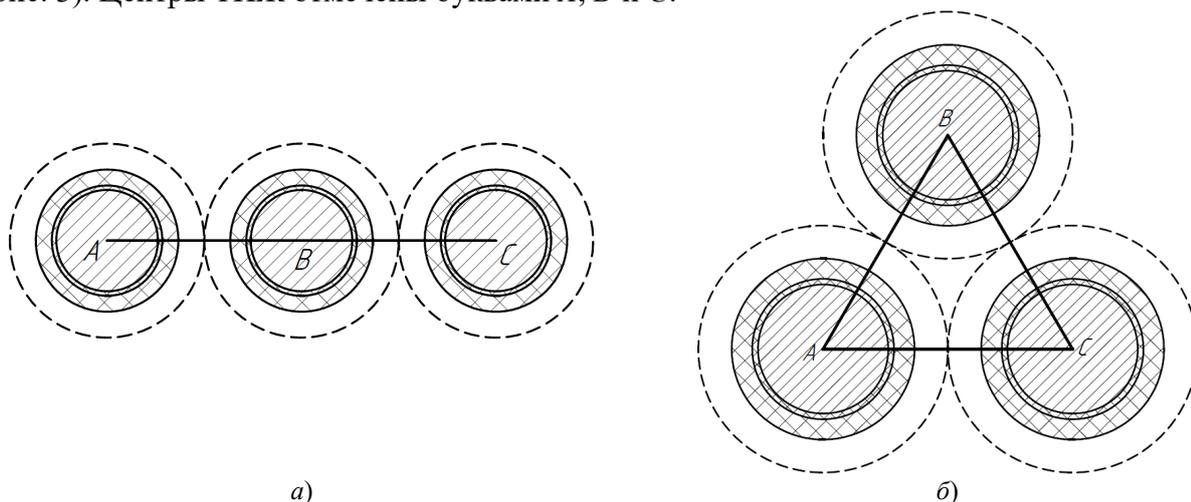


Рис. 3. Схематичное изображение прокладки трех одножильных кабелей  
 $a$  – в одной плоскости;  $b$  – треугольником

Fig. 3. Schematic illustration of the installation of three single-core cables  
 $a$  – in one plane;  $b$  – a triangle

Необходимо принять допущение, что прокладка кабелей осуществляется вплотную, потому можно утверждать, что расстояние  $AB = BC$ . Чтобы вычислить среднее расстояние между центрами жил достаточно определить расстояние  $AB$ .

Конструкции одножильных кабелей довольно разнообразны. Помимо изолированной жилы и внешней оболочки конструкция кабеля может иметь элементы герметизации, металлический экран или броню.

Исходя из вышесказанного, распишем формулу для определения расстояния  $AB$ , основываясь на геометрических параметрах изолированной ТПЖ (см. рис. 1.), описанных ранее:

$$AB = BC = 2 \cdot \left( \frac{D_c}{2} + h_{fr} + h_i + \dots + h_n \right); \quad (4)$$

$$AB = BC = D_c + 2h_{fr} + 2h_i + \dots + 2h_n, \quad (5)$$

где  $h_n$  – толщина конструктивного элемента кабеля (герметизирующий элемент,

металлический экран, броня, внешняя оболочка), наложенного поверх изолированной жилы.  
 Рассмотрим случай с прокладкой одножильных кабелей в одной плоскости (см. рис. 3, а).

Определим расстояние  $CA$ :

$$CA = AB + BC = 2 \cdot AB. \quad (6)$$

Теперь определим среднее геометрическое расстояние между центрами жил:

$$l_{ad1c} = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA} = \sqrt[3]{AB \cdot AB \cdot 2AB} = \sqrt[3]{2AB^3} = \sqrt[3]{2} \cdot AB; \quad (7)$$

$$l_{ad1c} = \sqrt[3]{2} \cdot (D_c + 2h_{fr} + 2h_i + \dots + 2h_n). \quad (8)$$

Рассмотрим случай с прокладкой одножильных кабелей треугольником.

Рассмотрим  $\triangle ABC$  (см. рис. 3, б). Построим вписанную в  $\triangle ABC$  окружность с центром в точке  $O$  (рис. 4, а).

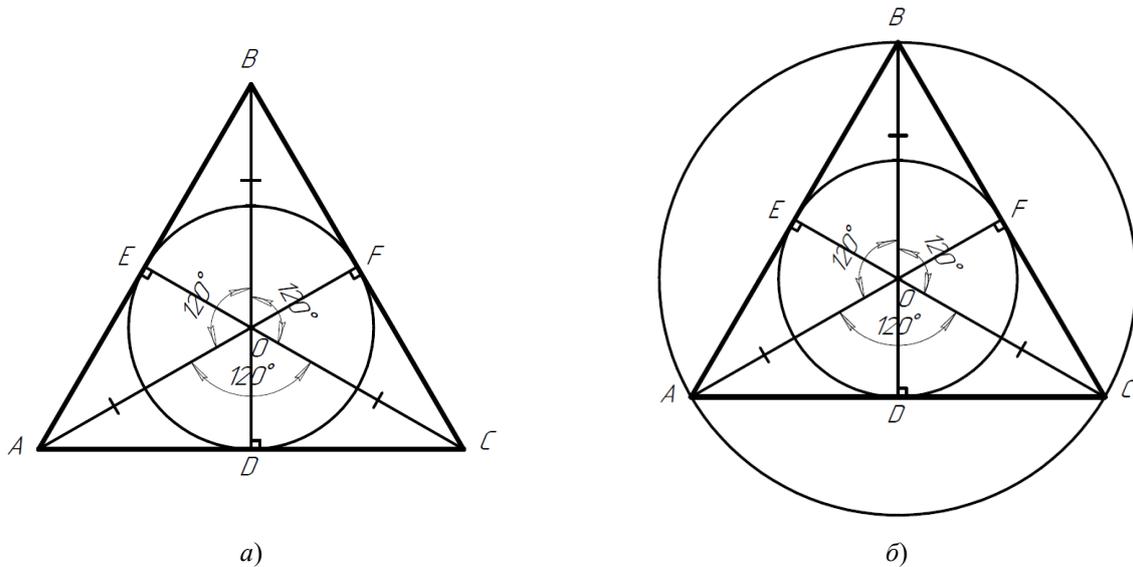


Рис. 4. Дополнительные построения для определения расстояний между центрами ТПЖ при прокладке трех одножильных кабелей треугольником

Fig. 4. Additional constructions for determining the distances between the centers of the conductive cores when laying three single-core cables in a triangle

При прокладке кабелей треугольником, центры жилы будут расположены под углом  $120^\circ$  ( $360^\circ / 3 = 120^\circ$ ) друг от друга, отсюда следует, что  $\angle AOB = \angle BOC = \angle AOC = 120^\circ$ .

Расстояния от центра координат до центров ТПЖ будут равны друг другу ( $BO = AO = CO$ ). Это также доказывается построением описанной окружности в центре в точке  $O$ . В этом случае  $BO$ ,  $AO$  и  $CO$  будут являться радиусами данной окружности (см. рис. 4, б).

Рассмотрим равнобедренный  $\triangle BOC$  ( $BO = CO$ ):  $FO$  в данном треугольнике является высотой, биссектрисой и медианой, отсюда следует, что  $\angle BOF = \angle COF = 120^\circ / 2 = 60^\circ$ . Отсюда следует, что  $\angle OBF = \angle OCF = 180^\circ - 60^\circ - 90^\circ = 30^\circ$ .

Аналогично с  $\triangle BOA$  и  $\triangle AOC$ :  $\angle OBE = \angle OAE = \angle OAD = \angle OCD = 180^\circ - 60^\circ - 90^\circ = 30^\circ$ .

Следовательно,  $\angle ABC = \angle BCA = \angle BAC = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ$ . Отсюда можно утверждать, что  $\triangle ABC$  является равносторонним и  $AB = BC = CA$ .

$$AB = BC = CA = 2 \cdot \left( \frac{D_c}{2} + h_{fr} + h_i + \dots + h_n \right); \quad (9)$$

$$AB = BC = CA = D_c + 2h_{fr} + 2h_i + \dots + 2h_n. \quad (10)$$

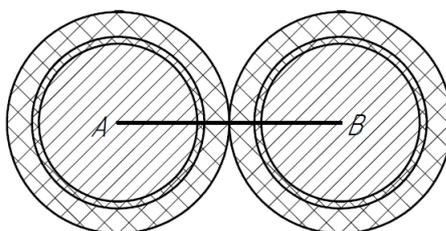
Согласно формуле (3) среднее геометрическое расстояние между центрами ТПЖ при прокладке одножильных кабелей треугольником будет определяться по формуле:

$$l_{ad1c} = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA}. \quad (11)$$

Так как  $AB = BC = CA$ :

$$l_{ad1c} = \sqrt[3]{AB^3} = AB = D_c + 2h_{fr} + 2h_i + \dots + 2h_n. \quad (12)$$

*Двухжильный кабель.* Схематичное изображение расположения изолированных жил в двухжильном кабеле приведено на рис. 5. Центры ТПЖ отмечены буквами *A* и *B*.



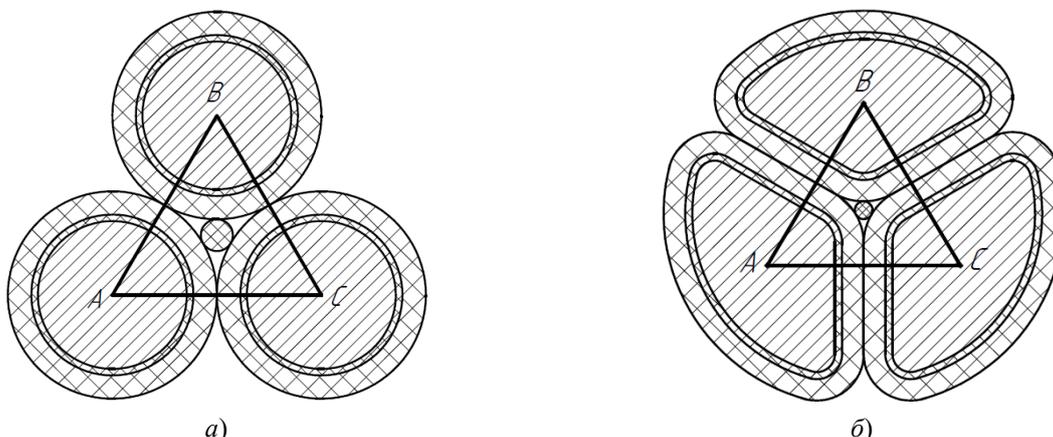
**Рис. 5.** Схематичное изображение расположения круглых изолированных ТПЖ в двухжильном кабеле  
**Fig. 5.** Schematic illustration of the arrangement of round insulated conductors in a two-core cable

В кабелях данной конструкции среднее геометрическое расстояние между центрами ТПЖ определяется отрезком *AB*.

С учетом вышесказанного запишем:

$$l_{ad2c} = AB = D_c + 2h_{fr} + 2h_i. \quad (13)$$

*Трехжильный кабель.* Схематичное изображение расположения изолированных ТПЖ в трехжильном кабеле с круглыми ТПЖ приведено на рис. 6, *a*, с секторными ТПЖ – на рис. 6, *б*. Центры ТПЖ отмечены буквами *A*, *B* и *C*.



**Рис. 6.** Схематичное изображение расположения изолированных ТПЖ в трехжильном кабеле:  
*a* – с ТПЖ круглой формы; *б* – с ТПЖ секторной формы  
**Fig. 6.** Schematic illustration of the arrangement of insulated conductive cores in a three-core cable  
*a* – with round conductive cores; *b* – with sector-shaped conductive cores

Рассмотрим равносторонний  $\triangle ABC$ . Доказательство равенства сторон треугольника аналогично случаю прокладки одножильных кабелей треугольником, описанному выше (см. рис. 3, *б*).

Исходя из вышесказанного можем записать:

$$AB = BC = CA = 2 \cdot \left( \frac{D_c}{2} + h_{fr} + h_i \right); \quad (14)$$

$$AB = BC = CA = D_c + 2h_{fr} + 2h_i. \quad (15)$$

Согласно формуле (3) среднее расстояние между центрами жил в трехжильном кабеле будет определяться по формуле:

$$l_{ad3c} = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA}. \quad (16)$$

Так как  $AB = BC = CA$ :

$$l_{ad3c} = \sqrt[3]{AB^3} = AB = D_c + 2h_{fr} + 2h_i. \quad (17)$$

*Четырехжильный кабель.* Схематичное изображение расположения изолированных ТПЖ в четырехжильном кабеле с круглыми ТПЖ приведено на рис. 7, *a*, с секторными ТПЖ – на рис. 7, *б*. Центры ТПЖ отмечены буквами *A*, *B* и *C*.

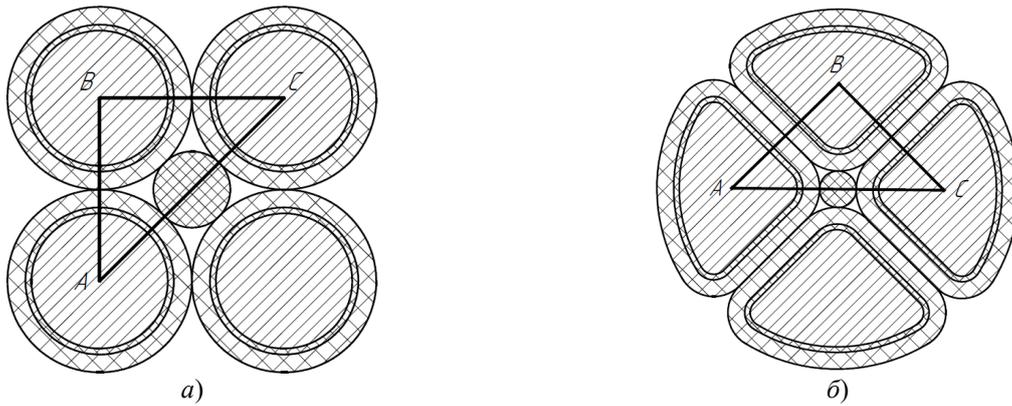


Рис. 7. Схематичное изображение расположения изолированных ТПЖ в четырехжильном кабеле:  
*a* – с ТПЖ круглой формы; *б* – с ТПЖ секторной формы

Fig. 7. Schematic illustration of the arrangement of insulated conductive cores in a four-core cable:  
*a* – with round conductive cores; *b* – with sector-shaped conductive cores

Рассмотрим  $\triangle ABC$  (рис. 8). Построим описанную окружность  $\triangle ABC$  с центром в точке  $O$  (см. рис. 8).

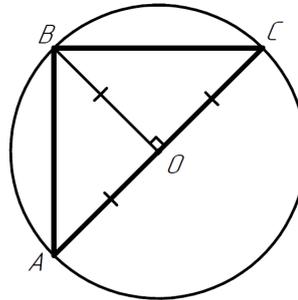


Рис. 8. Дополнительные построения для определения расстояний между центрами ТПЖ в четырехжильном кабеле

Fig. 8. Additional constructions for determining the distances between the centers of the conductive cores in a four-core cable

В четырехжильных кабелях жилы расположены под углом  $90^\circ$  ( $360^\circ / 4 = 90^\circ$ ), отсюда следует, что  $\angle BOC = \angle BOA = 90^\circ$ .  $AO = BO = CO$ , так как являются радиусами описанной окружности.

Рассмотрим  $\triangle BOC$ : данный треугольник является равнобедренным, соответственно углы при основании будут равны. Исходя из этого можем определить:  $\angle OBC = \angle OCB = = (180^\circ - 90^\circ) / 2 = 45^\circ$ .

Аналогично с  $\triangle BOA$ :  $\angle ABO = \angle BAO = (180^\circ - 90^\circ) / 2 = 45^\circ$ . Исходя из вышесказанного можем утверждать, что  $\triangle ABC$  является и прямоугольным, и равнобедренным:

- 1)  $\angle ABC = \angle ABO + \angle OBC = 45^\circ + 45^\circ = 90^\circ$ .
- 2)  $AB = BC$ .

По теореме Пифагора найдем сторону  $AC$ :

$$AC = \sqrt{AB^2 + BC^2}. \quad (18)$$

Так как  $AB = BC$ :

$$AC = \sqrt{2} \cdot AB. \quad (19)$$

Согласно формуле (3) среднее расстояние между центрами жил в четырехжильном кабеле будет определяться по формуле:

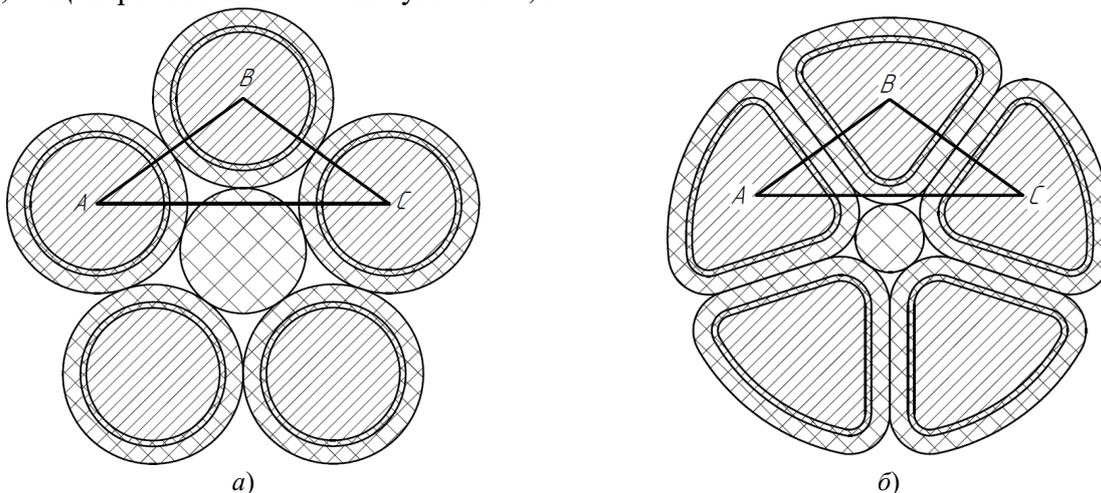
$$l_{ad4c} = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA}. \quad (20)$$

Подставим значение формулы (19) в формулу (20) и запишем:

$$l_{ad4c} = \sqrt[3]{AB^2 \cdot \sqrt{2} \cdot AB} = \sqrt[3]{AB^3 \cdot \sqrt{2}} = AB \cdot \sqrt[6]{2}; \quad (21)$$

$$l_{ad4c} = \sqrt[6]{2} \cdot (D_c + 2h_{fr} + 2h_i). \quad (22)$$

*Пятижильный кабель.* Схематичное изображение расположения изолированных ТПЖ в пятижильном кабеле с круглыми ТПЖ приведено на рис. 9, а, с секторными ТПЖ – на рис. 9, б. Центры ТПЖ отмечены буквами *A*, *B* и *C*.

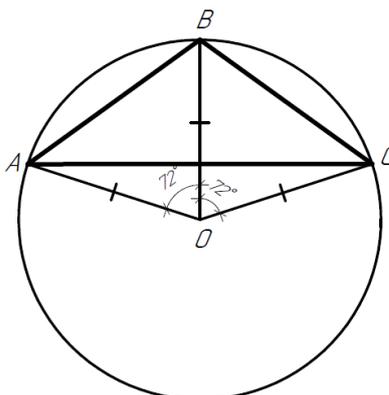


**Рис. 9.** Схематичное изображение расположения изолированных жил в пятижильном кабеле: а – с тпж круглой формы; б – с тпж секторной формы

**Fig. 9.** Schematic illustration of the arrangement of insulated conductive cores in a three-core cable: a – with round conductive cores; b – with sector-shaped conductive cores

Рассмотрим  $\triangle ABC$  (рис. 10) и дополнительно построим:

- 1) описанную окружность с центром точке *O*;
- 2) отрезки *AO*, *BO* и *CO*.



**Рис. 10.** Дополнительные построения для определения расстояний между центрами ТПЖ в пятижильном кабеле

**Fig. 10.** Additional constructions for determining the distances between the centers of the conductive cores in a five-core cable

Известно, что в пятижильных кабелях ТПЖ расположены под углом  $72^\circ$  ( $360^\circ / 5 = 72^\circ$ ) друг от друга. Исходя из этого можно утверждать, что  $\angle BOA = \angle BOC = 72^\circ$ .

Отрезки *AO*, *BO* и *CO* являются радиусами описанной окружности и равны друг другу.

Рассмотрим равнобедренный  $\triangle BOC$  ( $BO = CO$ ):  $\angle BCO = \angle OBC = (180^\circ - 72^\circ) / 2 = 54^\circ$ .

Рассмотрим равнобедренный  $\triangle BOA$  ( $BO = AO$ ):  $\angle ABO = \angle BAO = (180^\circ - 72^\circ) / 2 = 54^\circ$ .

$\triangle BOC = \triangle BOA$  по двум сторонам и углу между ними. Соответственно и  $AB = BC$ .

Следовательно,  $\triangle ABC$  является равнобедренным. Далее рассмотрим  $\triangle ABC$ :  $\angle ABC = \angle ABO + \angle CBO = 54^\circ + 54^\circ = 108^\circ$ .

$\angle BAC = \angle BCA$  (как углы при основании *AC*) =  $(180^\circ - 108^\circ) / 2 = 36^\circ$ .

Можем определить сторону *CA* по теореме косинусов:

$$CA^2 = AB^2 + BC^2 - 2 \cdot AB \cdot BC \cdot \cos(\angle ABC). \quad (23)$$

Так как  $AB = BC$ :

$$CA^2 = 2 \cdot AB^2 - 2 \cdot AB^2 \cdot \cos(\angle ABC); \quad (24)$$

$$CA^2 = 2 \cdot AB^2(1 - \cos(108^\circ)); \quad (25)$$

$$CA = \sqrt{2} \cdot AB \cdot \sqrt{(1 - \cos(108^\circ))} = \sqrt{2} \cdot AB \cdot 1,144. \quad (26)$$

Согласно формуле (3) среднее расстояние между центрами ТПЖ в пятижильном кабеле будет определяться по формуле:

$$l_{ad5c} = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA}; \quad (27)$$

$$l_{ad5c} = \sqrt[3]{AB \cdot AB \cdot \sqrt{2} \cdot AB \cdot 1,144} = \sqrt[3]{AB^3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,144} = AB \cdot \sqrt[6]{2} \cdot \sqrt[3]{1,144} = (D_c + 2h_{fr} + 2h_i) \cdot \sqrt[6]{2} \cdot \sqrt[3]{1,144}. \quad (28)$$

*Методика расчета электрической емкости ТПЖ.* Согласно п.2.2 ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2022 электрическую емкость ТПЖ кабеля можно определить по формуле [6]:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{D_i}{D_c}\right)}, \quad (29)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля.

Параметр  $\varepsilon$  определяется исходя из материала изоляции кабеля (см. табл. 3 ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2022).

Диаметр по изоляции ( $D_i$ ) определяется по формуле:

$$D_i = D_c + 2h_{fr} + 2h_i. \quad (30)$$

*Расчет индуктивности и электрической емкости ТПЖ.* Рассмотрим на примере конструкции кабеля ВВГ на номинальное напряжение 1 кВ (по ГОСТ 31996-2012) насколько отличаются индуктивность и электрическая емкость кабелей с круглыми и секторными ТПЖ (при условии равенства площади поперечного сечения ТПЖ). Согласно ГОСТ 31996-2012 секторные ТПЖ допускается применять в трех-, четырех- и пятижильных кабелях. Для отображения наглядного результата выберем пять номинальных сечений ТПЖ ( $S_n$ ): 70, 95, 150, 185 мм<sup>2</sup>.

Количество проволок в ТПЖ выберем согласно табл. 4 ГОСТ 22483-2012 [7].

Расчетный диаметр проволоки в ТПЖ ( $D_{wc}$ ) определим по формуле:

$$D_{wc} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_n}{n \cdot \pi}}, \quad (31)$$

где  $n$  – количество проволок в ТПЖ согласно ГОСТ 22483-2021.

Расчетный диаметр круглой ТПЖ ( $D_{cc}$ ) определим по формуле:

$$D_{cc} = (2 \cdot n_l - 1) \cdot D_{wc}, \quad (32)$$

где  $n_l$  – число повивов. Для 19-проволочной ТПЖ  $n_l = 3$ , для 37-проволочной ТПЖ  $n_l = 5$ .

Большую сложность представляет определение расстояния от центра секторной жилы до ее края ( $l_s$ ) и расчетной площади поперечного сечения секторной жилы ( $S_s$ ). Для этого воспользуемся графическим методом.

Построим в программе КОМПАС-3D сектора требуемого сечения по геометрическим параметрам, приведенным в табл. А.1 ГОСТ 31996-2012. Найдем геометрические центры данных секторов и измерим параметры  $l_s$  и  $S_s$ .

Для определения электрической емкости кабеля с секторными ТПЖ по формуле (4) необходимо найти ее эквивалентный диаметр:

$$D_{eqs} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_s}{\pi}}. \quad (33)$$

Все рассчитанные вышеуказанные параметры (по формулам (31)...(33)) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Расчет геометрических параметров круглых и секторных ТПЖ 2 класса гибкости по ГОСТ 22483-2012**

Table 1

**Calculation of geometric parameters of round and sector-shaped conductive cores of 2nd flexibility class according to GOST 22483-2012**

	Трехжильный кабель					Четырехжильный кабель					Пятижильный кабель				
	70	95	150	185	240	70	95	150	185	240	70	95	150	185	240
Номинальное сечение ТПЖ (Sn), мм <sup>2</sup>	70	95	150	185	240	70	95	150	185	240	70	95	150	185	240
Количество проволок (n)	19	19	37	37	37	19	19	37	37	37	19	19	37	37	37
Расчетный диаметр проволоки (Dwc), мм	2,17	2,52	2,27	2,52	2,87	2,17	2,52	2,27	2,52	2,87	2,17	2,52	2,27	2,52	2,87
Расчетный диаметр круглой ТПЖ (Dcc), мм	9,75	11,36	14,32	15,90	18,11	9,75	11,36	14,32	15,90	18,11	9,75	11,36	14,32	15,90	18,11
Расстояние от центра секторной жилы до края (ls), мм	3,76	4,49	5,47	6,22	7,01	4,04	4,71	5,91	6,57	7,46	4,03	4,7	5,88	6,55	7,47
Площадь секторной ТПЖ (Ss), мм <sup>2</sup>	72,62	102,17	153,56	197,34	251,60	75,58	103,06	163,30	201,68	260,42	74,06	100,96	159,61	198,78	258,45
Эквивалентный диаметр секторной ТПЖ (Deqs), мм	9,62	11,41	13,99	15,86	17,90	9,81	11,46	14,42	16,03	18,21	9,71	11,34	14,26	15,91	18,14

При известных геометрических параметрах ТПЖ можем определить:

1. Индуктивность кабеля с круглыми ТПЖ –  $L_{rc}$  (по формуле (1)):

$$L_{rc} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{2 \cdot l_{adr}}{D_{cc}} \right) + \frac{1}{4} \right), \quad (34)$$

где  $l_{adr}$  – среднее геометрическое между центрами ТПЖ круглой формы.

Для трехжильного кабеля с круглыми ТПЖ (по формуле (17)):

$$l_{ad3c} = l_{ad3r} = D_{cc} + 2h_i. \quad (35)$$

Значения толщины изоляции ( $h_i$ ) для кабеля ВВГ, в зависимости от площади поперечного сечения ТПЖ, указаны в табл. 2 [3].

Таблица 2

**Значение толщины изоляции в зависимости от площади поперечного сечения ТПЖ кабеля ВВГ на номинальное напряжение 1 кВ**

Table 2

**The value of the insulation thickness depending on the cross-sectional area of the conductive core of the VVG cable for a nominal voltage of 1 kV**

Номинальное сечение ТПЖ (Sn), мм <sup>2</sup>	70	95	150	185	240
Толщина изоляции (hi), мм	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2

Для четырехжильного кабеля с круглыми ТПЖ (по формуле (22)):

$$l_{ad4c} = l_{ad4r} = \sqrt[6]{2} \cdot (D_{cc} + 2h_i). \quad (36)$$

Для пятижильного кабеля с круглыми ТПЖ (по формуле (28)):

$$l_{ad5c} = l_{ad5r} = (D_{cc} + 2h_i) \cdot \sqrt[6]{2} \cdot \sqrt[3]{1,144}. \quad (37)$$

2. Электрическую емкость кабеля с ТПЖ круглой формы (по формуле (29)):

$$C_{rc} = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln \left( \frac{D_i}{D_{cc}} \right)} \quad (38)$$

Изоляция кабеля марки ВВГ изготавливается из ПВХ-пластиката, исходя из этого  $\varepsilon = 8$  (см. табл. 3 ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2022).

3. Индуктивность кабеля с секторными ТПЖ –  $L_{sc}$  (по формуле (1)):

$$L_{sc} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{2 \cdot l_{ads}}{D_{eqs}} \right) + \frac{1}{4} \right), \quad (39)$$

где  $l_{ads}$  – среднее геометрическое расстояние между центрами ТПЖ секторной формы.

Для трехжильного кабеля с секторными ТПЖ (по формуле (17)):

$$l_{ad3c} = l_{ad3s} = 2l_s + 2h_i. \quad (40)$$

Для четырехжильного кабеля с секторными ТПЖ (по формуле (22)):

$$l_{ad4c} = l_{ad4s} = \sqrt[6]{2} \cdot (2l_s + 2h_i). \quad (41)$$

Для пятижильного кабеля с секторными ТПЖ (по формуле (28)):

$$l_{ad5c} = l_{ad5s} = (2l_s + 2h_i) \cdot \sqrt[6]{2} \cdot \sqrt[3]{1,144}. \quad (42)$$

4. Электрическую емкость кабеля с ТПЖ секторной формы (по формуле (29)):

$$C_{sc} = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln \left( \frac{D_i}{D_{eqs}} \right)}. \quad (43)$$

Также проанализируем разницу (в процентном соотношении) в значениях между индуктивностью/электрической емкостью между кабелями с круглыми и секторными ТПЖ (одинакового сечения). Для этого воспользуемся формулами:

$$\frac{L_{rc} - L_{sc}}{L_{rc}}; \frac{C_{rc} - C_{sc}}{C_{rc}}. \quad (44)$$

Все расчеты, произведенные по формулам (34), (38), (39), (43) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчет индуктивности и электрической емкости трех-, четырех- и пятижильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ

Table 3

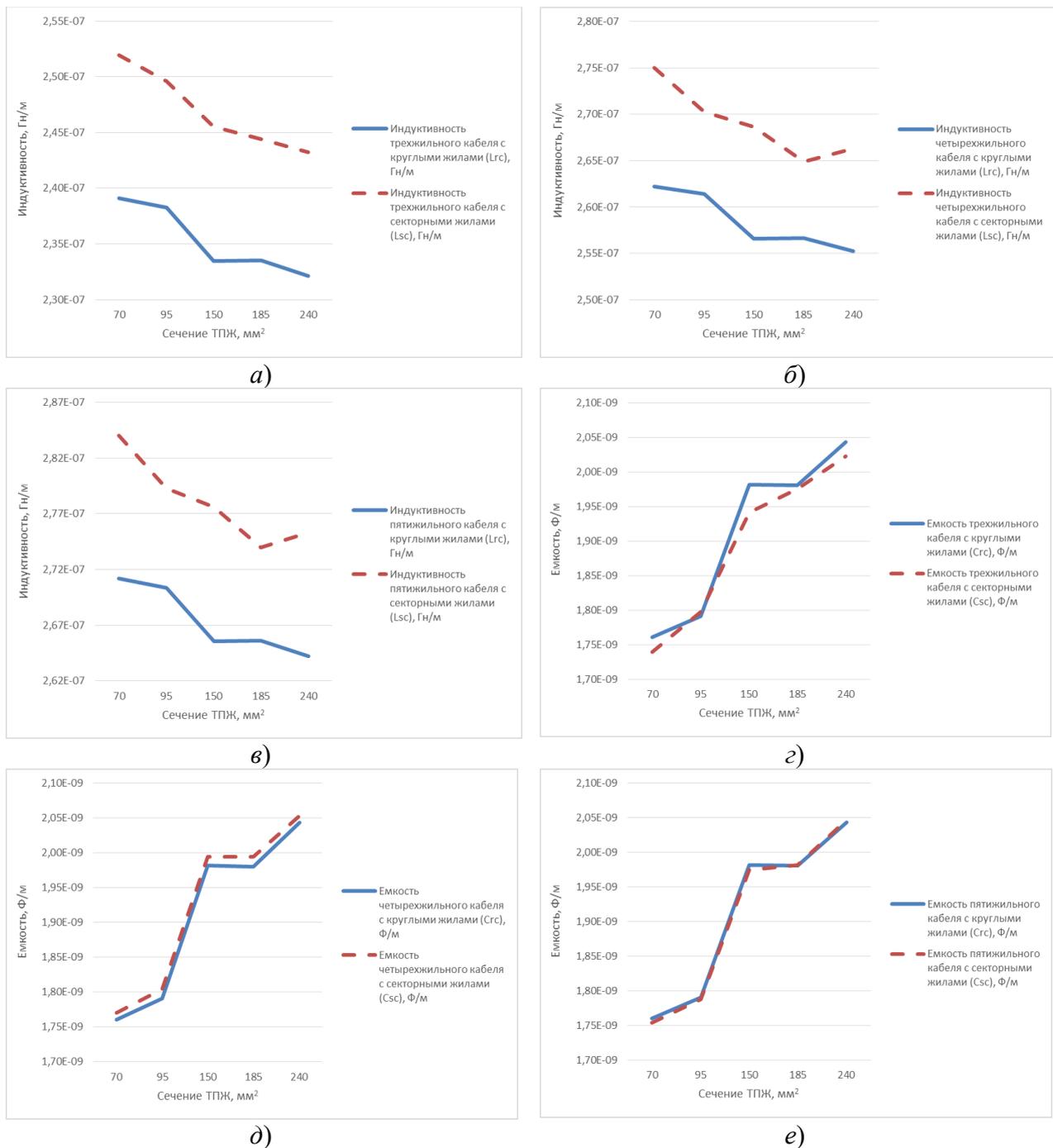
Calculation of inductance and electrical capacitance of three-, four- and five-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores

Номинальное сечение ТПЖ (Sn), мм <sup>2</sup>	Трехжильный кабель					Четырехжильный кабель					Пятижильный кабель				
	70	95	150	185	240	70	95	150	185	240	70	95	150	185	240
Индуктивность кабеля с круглыми ТПЖ (Lrc), Гн/м	2,39E-07	2,38E-07	2,33E-07	2,34E-07	2,32E-07	2,62E-07	2,61E-07	2,57E-07	2,57E-07	2,55E-07	2,71E-07	2,70E-07	2,66E-07	2,66E-07	2,64E-07
Индуктивность кабеля с секторными ТПЖ (Lsc), Гн/м	2,52E-07	2,50E-07	2,46E-07	2,44E-07	2,43E-07	2,75E-07	2,70E-07	2,69E-07	2,65E-07	2,66E-07	2,84E-07	2,79E-07	2,78E-07	2,74E-07	2,75E-07
Емкость кабеля с круглыми ТПЖ (Crc), Ф/м	1,76E-09	1,79E-09	1,98E-09	1,98E-09	2,04E-09	1,76E-09	1,79E-09	1,98E-09	1,98E-09	2,04E-09	1,76E-09	1,79E-09	1,98E-09	1,98E-09	2,04E-09
Емкость кабеля с секторными ТПЖ (Csc), Ф/м	1,74E-09	1,80E-09	1,94E-09	1,98E-09	2,02E-09	1,77E-09	1,80E-09	1,99E-09	1,99E-09	2,05E-09	1,75E-09	1,79E-09	1,97E-09	1,98E-09	2,05E-09
Lrc-Lsc/Lrc	-5,36%	-4,75%	-5,16%	-4,66%	-4,78%	-4,89%	-3,38%	-4,69%	-3,22%	-4,35%	-4,72%	-3,31%	-4,54%	-3,17%	-4,20%
Crc-Csc/Crc	1,18%	-0,38%	2,06%	0,25%	1,04%	-0,54%	-0,79%	-0,63%	-0,73%	-0,50%	0,36%	0,13%	0,38%	-0,07%	-0,15%

По данным в табл. 3 построим:

- графики зависимостей индуктивности ТПЖ от площади поперечного сечения (рис. 11, а...в);
- графики зависимостей электрической емкости ТПЖ от площади поперечного сечения (рис. 11, г...е);
- сравнительный график зависимости индуктивности кабелей с круглыми ТПЖ и секторными ТПЖ (рис. 12);

– сравнительный график зависимости электрической емкости кабелей с круглыми ТПЖ и секторными ТПЖ (рис. 13).



**Рис. 11. Сравнительные графики:**

*a* – индуктивности трехжильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ; *б* – индуктивности четырехжильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ; *в* – индуктивности пятижильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ; *г* – емкости трехжильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ; *д* – емкости четырехжильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ; *е* – емкости пятижильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ

**Fig. 11. Comparative graphs:**

*a* – inductance of three-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores; *b* – inductance of four-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores; *c* – inductance of five-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores; *d* – capacity of three-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores; *e* – capacity of four-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores; *f* – capacity of five-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores

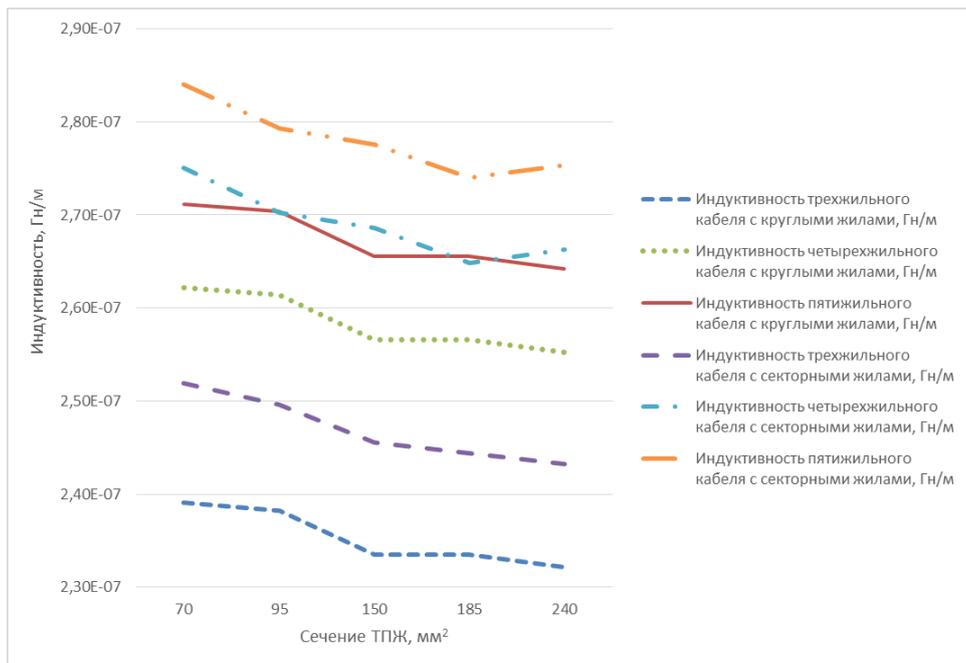


Рис. 12. Сравнительный график индуктивности трех-, четырех-, пятижильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ

Fig. 12. Comparative graph of inductance of three-, four-, five-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores

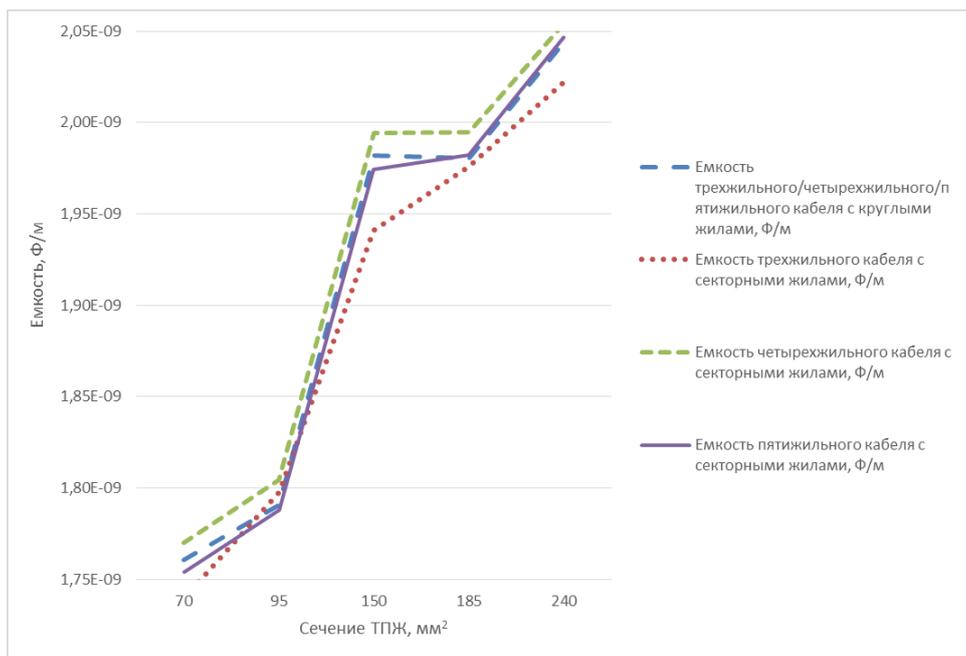


Рис. 13. Сравнительный график емкости трех-, четырех-, пятижильных кабелей ВВГ с круглыми и секторными ТПЖ

Fig. 13. Comparative graph of capacity of three-, four-, five-core VVG cables with round and sector-shaped conductive cores

### Заключение

В данной статье была предложена методика расчета индуктивности и электрической емкости ТПЖ кабелей на номинальное напряжение до 3 кВ. Данная методика сочетает в себе как математический, так и графический метод расчета требуемых параметров, что позволяет достичь оптимальную точность расчетов.

По графикам, приведенным на рис. 12, 13 можно сделать следующие выводы:

- 1) Процентное соотношение между электрической емкостью кабелей с круглыми и

секторными ТПЖ в среднем составило 0,11 %. Исходя из этого, при расчете электрической емкости кабелей с секторными жилами можно пренебречь определением эквивалентного диаметра секторной ТПЖ, а расчет емкости можно провести по формуле (29), как для кабеля с круглыми ТПЖ аналогичного сечения. При этом расчет упрощается, а его точность остается приемлемой.

2) Процентное соотношение между индуктивностью кабелей с круглыми и секторными ТПЖ в среднем составило 4,34 %. Это объясняется тем, что индуктивность зависит от среднего расстояния между центрами ТПЖ. На практике кабели с секторными ТПЖ имеют меньшие габариты по сравнению с кабелями с круглыми ТПЖ. Следовательно, средние расстояния между жилами будут также меньше. При уменьшении средних расстояний между центрами ТПЖ индуктивность увеличивается (по формуле (1)), что подтверждается результатами расчетов, приведенных в табл. 3.

#### Список источников:

1. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
2. ГОСТ 15845-80. Изделия кабельные. Термины и определения.
3. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия.
4. Расчет токов коротких замыканий в энергосистемах : учеб. пособие / С.А. Ерошенко [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 104 с.
5. Каменский М.К., Холодный С.Д. Силовые кабели 1-10 кВ с пластмассовой изоляцией. Расчет активного и индуктивного сопротивлений // Новости электротехники. – 2004. – №4. – с. 14.
6. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2022. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Методы расчета номинальной токовой нагрузки (100%-ный коэффициент нагрузки) и потерь. Общие положения.
7. ГОСТ 22483-2012. Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров.
8. Автоматизация процессов обеспечения информационной безопасности на основе разработки модели минимизации рисков конструкторско-технологического проекта / Т.В. Карлова, А.Ю. Бекмешов, А.Э. Тихомиров и др. // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2023. – №4. – С. 12-17.
9. Рыбаков А.В., Краснов А.А., Евдокимов С.А., Шурпо А.Н. Формирование цепочки проектирования с учетом нормативно-справочных ограничений // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 2 (65). – С. 86-91.

#### Информация об авторах:

##### Коровин Максим Леонидович

аспирант Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

#### References:

1. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Kholodny S.D., Peshkov I.B., editor. Fundamentals of Cable Engineering. Moscow: Academia; 2006.
2. State Standard 15845-80. Cable Products. Terms and Definitions; 1981.
3. State Standard 31996-2012. Power Cables With Plastic Insulation for Rated Voltage of 0.66; 1 and 3 kV. General Specifications; 2013.
4. Eroshenko S.A., et al. Calculation of Short-Circuit Currents in Power Systems. Yekaterinburg: Publishing House of Ural University; 2019.
5. Kamensky M.K., Kholodny S.D. Power Cables 1-10 kV With Plastic Insulation. Calculation of Active and Inductive Resistance. Electrical Engineering News. 2004;4:14.
6. State Standard R IEC 60287-1-1-2022. Calculation of the Current Rating. Part 1-1. Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculation of Losses. General Identical Standards; 2022.
7. State Standard 22483-2012. Conductors for Cables, Wires and Cords; 2014.
8. Karlova T.V., Bekmeshov A.Yu., Tikhomirov A.E., et al. Automating Information Security Processes by Developing a Risk Minimization Model for a Design and Technological Project. Automation and Modelling in Design and Management. 2023;4:12-17.
9. Rybakov A.V., Krasnov A.A., Evdokimov S.A., Shurpo A.N. Formation of the Design Chain Taking Into Account Regulatory and Reference Restrictions. Vestnik MSUT "Stankin". 2023;2(65):86-91.

#### Information about the authors:

##### Korovin Maxim Leonidovich

Postgraduate student of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

**Сорока Дмитрий Олегович**  
аспирант Института конструкторско-  
технологической информатики Российской академии  
наук

**Soroka Dmitry Olegovich**  
Postgraduate student of the Institute for Design-  
Technological Informatics of the Russian Academy of  
Sciences

**Куликов Михаил Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор Института  
конструкторско-технологической информатики  
Российской академии наук

**Kulikov Mikhail Yurievich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Institute  
for Design-Technological Informatics of the Russian  
Academy of Sciences

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена после рецензирования 30.10.2024;  
принята к публикации 11.11.2024.**

**The article was submitted 07.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for  
publication 11.11.2024.**

**Рецензент** – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный  
технический университет.

**Reviewer** – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State  
Technical University.

---

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

*Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченко.*

Сдано в набор 15.12.2024. Выход в свет 20.12.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,7.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

---

---

