

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.3

doi: 10.30987/2658-6436-2023-4-74-84

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЗИСТИВНОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО КАБЕЛЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Максим Леонидович Коровин¹, Михаил Юрьевич Куликов²

^{1,2} Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,
г. Москва, Россия

¹ corovinmaksim@yandex.ru

² muk.56@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке математической модели расчета электрических и конструктивных параметров резистивного нагревательного кабеля. Цель работы – рассмотреть основные этапы проектирования нагревательного кабеля и разработать методику расчета его основных параметров и конструкции, которая обеспечит качество и эксплуатационные характеристики будущего изделия, отвечающие всем современным техническим, технологическим и экономическим требованиям. Описаны основные этапы процесса проектирования нагревательного кабеля и даны рекомендации по подбору материалов, расчету его электрических и конструктивных параметров, а именно: номинальной мощности, электрического сопротивления, диаметров и массы токопроводящих жил, изоляции, экрана и оболочки. Исходя из конструктивных параметров исполнения электропроводящего экрана, были детально рассмотрены методики расчета массогабаритных параметров экранов в виде медной заземляющей жилы с фольгой, а также в виде оплетки из медных проволок. Предложенная методика расчета резистивного нагревательного кабеля позволяет более детально рассмотреть процесс проектирования. Именно на данном этапе определяется качество будущего изделия, обеспечивая при этом требуемые характеристики и параметры, а также надежность и неизменность эксплуатационных характеристик на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Ключевые слова: этапы проектирования, резистивный нагревательный кабель, математическая модель, расчет, управление качеством, надежность

Для цитирования: Коровин М.Л., Куликов М.Ю. Обеспечение качества проектирования резистивного нагревательного кабеля на основе разработки методики математического расчета // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №4 (22). С. 74-84. doi: 10.30987/2658-6436-2023-4-74-84.

Original article

Open Access Article

ENSURING THE DESIGN QUALITY OF A RESISTIVE HEATING CABLE BY DEVELOPING A MATHEMATICAL CALCULATION METHODOLOGY

Maxim L. Korovin¹, Mikhail Yu. Kulikov²

^{1, 2} Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ corovinmaksim@yandex.ru

² muk.56@mail.ru

Abstract. *The article is devoted to developing a mathematical model for calculating the electrical and design parameters of a resistive heating cable. The aim of the work is to consider the main stages of designing a heating cable and to develop a methodology for calculating its main parameters and design, which will ensure the quality and performance characteristics of the future product that meets all modern technical, technological and economic requirements. The main stages of the heating cable design process are described and recommendations are given on selecting materials, calculating the electrical and design parameters, namely: rated power, electrical resistance, diameters and mass of conductors, insulation, shield and shell. Based on the electrically conductive shield design the paper examines in detail methods for calculating the weight and size parameters of shields in the form of a copper grounding conductor with foil, as well as in the form of a screening braid made of copper wires. The proposed methodology for calculating a resistive heating cable allows considering the design process in more detail. It is at this stage that the future product quality is determined, while ensuring the required characteristics and parameters, as well as reliability and consistency of the performance throughout the product entire life cycle.*

Keywords: design stages, resistive heating cable, mathematical model, calculation, quality management, reliability

For citation: Korovin M.L., Kulikov M.Yu. Ensuring the Design Quality of a Resistive Heating Cable by Developing a Mathematical Calculation Methodology. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 4 (22). pp. 74-84. doi: 10.30987/2658-6436-2023-4-74-84.

Введение

Резистивный нагревательный кабель (далее по тексту «нагревательный кабель») – это электротехническое устройство, преобразующее электрическую энергию в тепловую и передающее её какому-либо объекту.

В настоящее время благодаря своим техническим особенностям нагревательный кабель получил широкое распространение в быту и промышленности.

Нагревательный кабель применяется: для работы в составе системы «теплый пол»; для поддержания требуемой температуры твердеющего бетона при строительстве в холодное время года; для обогрева стёкол и зеркал; для защиты бытовых трубопроводов от промерзания; для работы в составе антиобледенительных систем кровли, грунта и других открытых площадей; для обогрева технологических трубопроводов и других промышленных объектов (в том числе и в пожароопасных и взрывоопасных средах);

Такой широкий спектр применения нагревательного кабеля диктует необходимость в разработке математической модели расчета его конструктивных параметров, обеспечивающих качество изделия, его надежность и длительный срок службы с сохранением эксплуатационных характеристик. Актуальность данной работы заключается в разработке типовой математической модели расчета конструкции резистивных нагревательных кабелей, удовлетворяющей современным требованиям к их стабильному качеству и надежности.

Постановка проблем

Качество продукции – совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением [1]. Качество продукции в настоящее время заняло одно из важнейших мест в экономической и предпринимательской деятельности современного общества [2]. Поэтому обеспечение качества, в частности надежности, изделий стало одной из основных проблем, присущей всем видам продукции.

В то же время проблема обеспечения качества является одной из составляющих процесса управления уровнем качества изделия и осуществляется на всех этапах жизненного цикла, а именно: проектирования, прототипирования, производства, распределения и эксплуатации конечным потребителем [3]. Процесс проектирования является одним из важнейших этапов жизненного цикла, на котором создается макет и соответствующая спецификация изделия, формирующие свойства и параметры, обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики, качество, надежность и длительный срок службы изделия.

Целью данной работы является рассмотрение основных этапов проектирования нагревательного кабеля и разработка математической модели, позволяющей провести расчет электрических и массогабаритных параметров.

Результаты исследования

Процесс проектирования нагревательного кабеля можно разделить на следующие этапы:

1. Постановка технического задания (ТЗ).

Техническое задание должно содержать в себе следующую информацию:

- 1) среда эксплуатации нагревательного кабеля:
 - на открытом воздухе (кровля, водосток, трубопровод и др.);
 - в бетоне (или в асфальте);
 - грунт;
 - возможная пожароопасность и взрывоопасность среды;
- 2) температура окружающей среды во время эксплуатации;
- 3) площадь обогрева (m^2);
- 4) удельная мощность на единицу обогреваемой площади ($Вт/m^2$);
- 5) линейная мощность кабеля ($Вт/m$).

2. Подбор материалов с эксплуатационными параметрами, обеспечивающими работоспособность и надежность кабеля.

На основе требований, отраженных в техническом задании, производится:

- 1) определение максимальной и минимально допустимой рабочей температуры материала изоляции и оболочки;
- 2) анализ диэлектрической прочности материала изоляции и оболочки кабеля;
- 3) определение механических параметров материалов изоляции и оболочки;
- 4) устойчивость материала оболочки к воздействию агрессивных сред.

3. Электрический расчет.

Расчет электрических параметров кабеля состоит из нескольких этапов:

- 1) Расчет номинальной мощности кабеля ($Вт$):

$$P_{ном} = S \cdot p_s, \quad (1)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность ($Вт$); S – обогреваемая площадь; p_s – удельная мощность ($Вт/m^2$).

- 2) Расчет электрического сопротивления кабеля:

$$R = \frac{U^2}{P_{ном}}, \quad (2)$$

где R – электрическое сопротивление кабеля ($Ом$); U – напряжение питающей сети ($В$).

- 3) Расчет длины кабеля, исходя из требуемой линейной мощности:

$$l = \frac{P_{ном}}{p_l}, \quad (3)$$

где l – длина кабеля ($м$); p_l – линейная мощность ($Вт/m$).

- 4) Подбор токопроводящей жилы (ТПЖ), исходя из её удельного электрического сопротивления:

– выбор материала проволоки (нихром, фехраль, нержавеющая и оцинкованная сталь, медь и др. сплавы на её основе);

– определение диаметра проволоки и её количество в скрутке.

Зная электрическое сопротивление и длину кабеля, можно определить расчетное значение линейного сопротивления:

Для одножильного кабеля:

$$r = R \cdot l, \quad (4)$$

где r – линейное электрическое сопротивление ($Ом/m$).

Для двухжильного кабеля:

$$r = \frac{R}{2} \cdot l. \quad (5)$$

Далее подбирается материал проволоки, её диаметр, количество проволок в скрутке и вычисляется фактическое линейное сопротивление получившейся ТПЖ.

Для однопроволочной ТПЖ:

$$r_1 = \frac{\rho}{S}, \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление материала ТПЖ ($\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$); S – площадь поперечного сечения ТПЖ (мм^2).

Для многопроволочной ТПЖ:

$$r_n = \frac{r_1}{n}, \quad (7)$$

где n – количество проволок (шт.).

На этом электрический расчет завершается. Далее необходимо определить габаритные параметры нагревательного кабеля.

4. Расчет габаритных параметров кабеля.

Габаритные размеры кабеля напрямую влияют на его эксплуатационные параметры, к которым относятся:

- диэлектрическая прочность изоляции и оболочки;
- минимальный радиус изгиба кабеля;
- класс механической прочности кабеля (М1 или М2 согласно ГОСТ Р МЭК 60800-2012, ГОСТ ИЕС 62395-1-2016) [4, 5];
- удельная теплоемкость материала изоляции и оболочки.

Среди нагревательных кабелей можно выделить два основных типа, отличающиеся друг от друга конструкцией электромагнитного/заземляющего экрана:

- 1) кабель с экраном в виде заземляющей жилы и фольги, обёрнутой по всему диаметру кабеля;
- 2) кабель с экраном в виде оплетки.

Оплетка может быть выполнена из медной, медной луженой и никелированной проволоки.

Для наглядного понимания конструкции кабелей на рис. 1 – 4 приведены эскизы кабелей в разрезе с указанием основных конструктивных элементов и параметров.

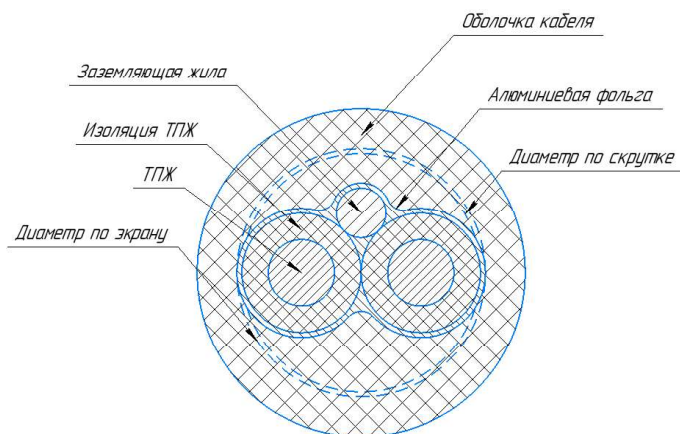


Рис. 1. Нагревательный кабель с экраном из медной жилы и фольги
Fig. 1. Heating cable with copper and foil screen

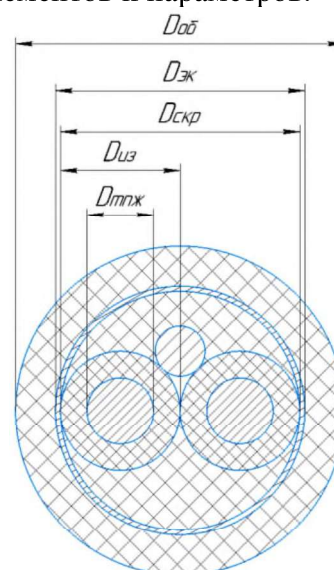


Рис. 2. Обозначение основных геометрических параметров кабеля с экраном из заземляющей жилы и фольги

$D_{об}$ – диаметр оболочки; $D_{эк}$ – диаметр экрана; $D_{скр}$ – диаметр скрутки изолированных жил; $D_{из}$ – диаметр изоляции; $D_{тпж}$ – диаметр токопроводящей жилы

Fig. 2. Designation of the main geometric parameters of the cable with ground wire and foil shield

$D_{об}$ – shell diameter; $D_{эк}$ – screen diameter; $D_{скр}$ – diameter of twisting of insulated cores; $D_{из}$ – insulation diameter; $D_{тпж}$ – diameter of the conductive core.

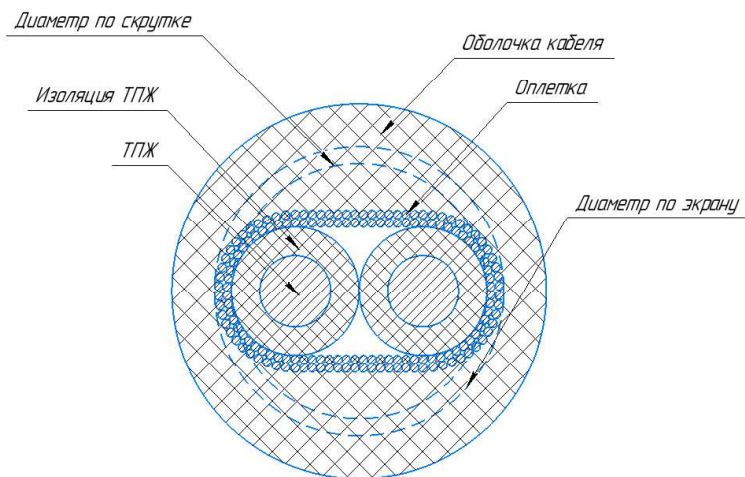


Рис. 3. Нагревательный кабель с экраном в виде оплетки
Fig. 3. Braid-screened heating cable

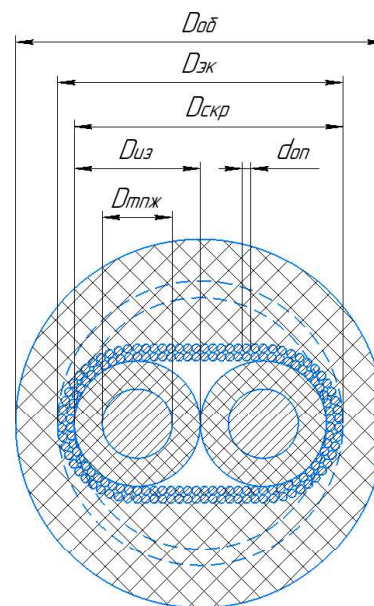


Рис. 4. Обозначение основных геометрических параметров кабеля с экраном в виде оплетки:

$D_{об}$ – диаметр оболочки; $D_{эк}$ – диаметр экрана; $D_{скр}$ – диаметр скрутки изолированных жил; $D_{из}$ – диаметр изоляции; $D_{тпж}$ – диаметр токопроводящей жилы; $d_{оп}$ – диаметр проволоки

Fig. 4. Designation of the main geometric parameters of the cable braided screen:

$D_{об}$ – shell diameter; $D_{эк}$ – screen diameter; $D_{скр}$ – diameter of twisting of insulated cores; $D_{из}$ – insulation diameter; $D_{тпж}$ – diameter of the conductive core; $d_{оп}$ – wire diameter

Расчет геометрических параметров кабеля состоит из следующих этапов:

1) расчет диаметра ТПЖ:

$$D_{тпж} = d_{пр} \cdot k_y, \quad (8)$$

где $d_{пр}$ – диаметр проволоки (мм); k_y – коэффициент укрутки.

Коэффициент укрутки изменяется в зависимости от количества проволоки в скрутке и её типа: правильная или неправильная (дикая).

На рис. 5 представлены примеры скрученных жил из 7 и 19 проволок:

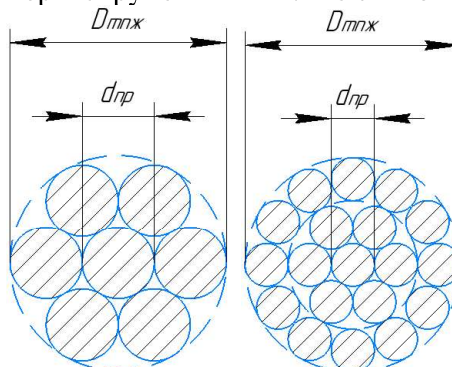


Рис. 5. ТПЖ, скрученная из 7 и 19 проволок соответственно
Fig. 5. A conductive core consisting of 7 and 19 twisted wires respectively

По количеству проволок ТПЖ может быть: однопроволочная; многопроволочная.

На практике для изготовления многопроволочных ТПЖ применяют скрутку из 2, 3, 4, 5, 7 и 19 проволок. В табл. 1 представлены значения коэффициента укрутки в зависимости от количества проволок в ТПЖ.

Зависимость коэффициента укрутки от количества проволок в ТПЖ

Dependence of the wrapping ratio on the number of wires in the core

Количество проволок (n)	Коэффициент укрутки (k_v)
1	1
2	2
3	2,155
4	2,413
5	2,7
7	3
19	5

2) расчет диаметра изоляции:

$$D_{\text{из}} = D_{\text{ТПЖ}} + (2 \cdot h_{\text{из}}), \quad (9)$$

где $D_{\text{из}}$ – диаметр изоляции (мм); $h_{\text{из}}$ – радиальная толщина изоляции (мм).

3) расчет диаметра по скрутке изолированных жил:

$$D_{\text{скр}} = 2 \cdot D_{\text{из}}, \quad (10)$$

где $D_{\text{скр}}$ – диаметр по скрутке.

4) расчет геометрических параметров экрана, исходя из его конструкции:

4.1) заземляющая жила и фольга.

Для обеспечения надежного экранирования и заземления фольга должна перекрывать весь диаметр кабеля.

Исходя из геометрических параметров изоляции и заземляющей жилы, расчет ширины фольги сводится к определению периметра эллипса (рис. 7). Также необходимо учитывать то, что оболочка накладывается обжатием, т.е. фольга подвергается усадке и плотно прилегает к изоляции ТПЖ и медной заземляющей жиле (см. рис. 1).

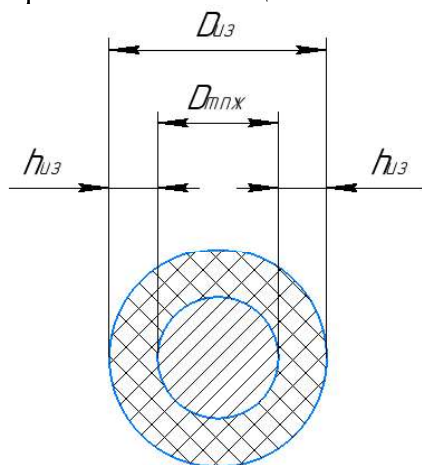


Рис. 6. Обозначение геометрических параметров для расчета диаметра изоляции

Fig. 6. Designation of geometric parameters for calculating the diameter of the insulation

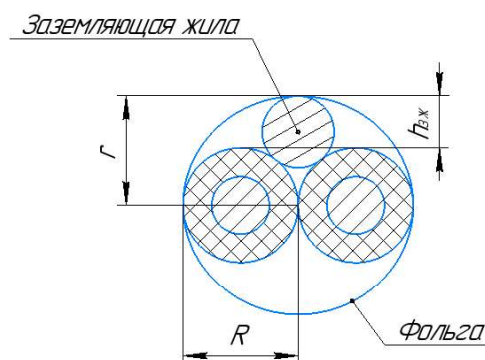


Рис. 7. Обозначение геометрических параметров эллипса, образуемого фольгой

Fig. 7. Designation of the geometric parameters of the ellipse formed by the foil

Исходя из вышесказанного, формула расчета ширины фольги имеет вид:

$$P_{\text{эк}} = 2\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}} \right) \cdot k_{\text{ус}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{эк}}$ – периметр эллипса (или ширина фольги); R – большая полуось эллипса; r – малая полуось эллипса; $k_{\text{ус}}$ – коэффициент усадки фольги.

Из-за меньшего диаметра заземляющая жила частично находится в межизоляционном пространстве (см. рис. 7). Исходя из этого, малая полуось эллипса рассчитывается следующим образом:

$$r = \frac{D_{из}}{2} + h_{эж}, \quad (12)$$

где $h_{эж}$ – расстояние между крайними точками изоляции ТПЖ и заземляющей жилы.

Подставив формулу (12) в (11) имеем:

$$P_{эк} = 2\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{\left(R^2 + \left(\frac{D_{из}}{2} + h_{эж}\right)^2\right)}{2}} \right) \cdot k_{ус}. \quad (13)$$

На практике существует большая номенклатура производимых кабелей, имеющих различную конструкцию ТПЖ и, соответственно, различные диаметры изоляции ТПЖ. Всё это приводит к усложнению подбора ширины фольги. Недостаточная ширина фольги приводит к неполному оборачиванию диаметра кабеля и появлению зон, незащищенных экраном. Избыточная же ширина фольги приводит к её замятиям при наложении оболочки, что уменьшает её радиальную толщину и негативно сказывается на диэлектрической прочности.

Исходя из вышесказанного, эмпирическим путём с помощью полиномиальной интерполяции были выведены формулы расчета $h_{эж}$ и $k_{ус}$:

$$h_{эж} = -0,0855D_{из}^6 + 0,9052D_{из}^5 - 3,8232D_{из}^4 + 8,2002D_{из}^3 - -9,3729D_{из}^2 + 5,1056D_{из} - 0,3276; \quad (14)$$

$$k_{ус} = 0,0215D_{из}^3 - 0,1322D_{из}^2 + 0,3712D_{из} + 0,7492. \quad (15)$$

Фактическую ширину фольги необходимо подобрать таким образом, чтобы обеспечить полное перекрытие диаметра скрученных изолированных жил. Для этого фактическую ширину фольги выбирают на 10...15 % больше, чем расчетную, чтобы обеспечить её нахлест.

$$P_{эк,ф} = 2\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{\left(R^2 + \left(\frac{D_{из}}{2} + h_{эж}\right)^2\right)}{2}} \right) \cdot k_{ус} \cdot 1,1 \dots 1,15, \quad (16)$$

где $P_{эк,ф}$ – фактическая ширина фольги.

Далее рассчитывается диаметр по экрану:

$$D_{эк} = D_{скр} + (3 \cdot h_{ф}), \quad (17)$$

где $h_{ф}$ – толщина фольги.

В формировании диаметра по экрану участвует 3 слоя фольги. Это связано с тем, что фольга накладывается внахлест.

В расчете диаметра по экрану диаметром медной жилы пренебрегают, т.к. он значительно меньше диаметра изолированных ТПЖ.

4.2) оплетка из медной проволоки.

Основными параметрами в конструкции оплетки являются: угол наложения оплетки; шаг оплетки; плотность оплетки.

На рис. 8 представлена развертка пряди оплетки одного направления на плоскости.

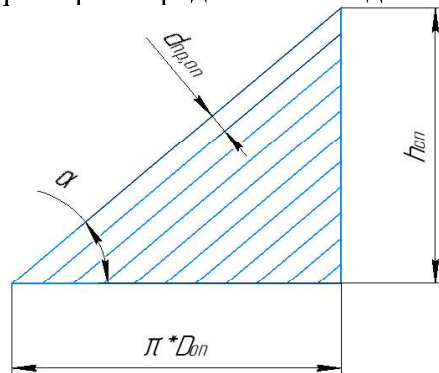


Рис. 8. Развертка пряди оплетки одного направления на плоскости
Fig. 8. Development of a braided strand in one direction on a plane

Ширина развернутой оплетки равняется периметру окружности, её описывающую:

$$P_{\text{окр}} = 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{окр}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{окр}}}{2} = 2 \cdot \pi \cdot D = 2 \cdot \pi \cdot D_{\text{оп}}, \quad (18)$$

где $P_{\text{окр}}$ – периметр окружности или ширина оплетки (мм); $D_{\text{оп}}$ – диаметр по оплетке (мм).

$$D_{\text{оп}} = D_{\text{скр}} + 2 \cdot d_{\text{пр.оп}}, \quad (19)$$

где $D_{\text{скр}}$ – диаметр по оплетаемой заготовке или диаметр по скрутке изолированных ТПЖ (мм); $d_{\text{пр.оп}}$ – диаметр проволоки оплетки (мм).

Из рис. 8 следует, что угол наложения оплетки можно рассчитать, как арктангенс отношения противолежащего катета к прилежащему, а именно:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h_{\text{оп}}}{\pi D_{\text{оп}}}\right) = \arctg\left(\frac{h_{\text{оп}}}{\pi \cdot (D_{\text{скр}} + 2 \cdot d_{\text{пр.оп}})}\right), \quad (20)$$

где α – угол наложения оплетки (град.); h – шаг оплетки (мм);

Чтобы исключить возможное сползание оплетки, необходимо контролировать расчетный угол наложения оплетки. Он должен находиться в пределах от 35° до 65° .

Линейная плотность оплетки определяется по следующей формуле [6]:

$$p_{\text{лин}} = \frac{n_{\text{пряд}} \cdot a_{\text{пряд}} \cdot d_{\text{пр.оп}}}{h_{\text{оп}} \cdot \cos(\alpha)}, \quad (21)$$

где $p_{\text{лин}}$ – линейная плотность оплетки; $a_{\text{пряд}}$ – количество прядей (шт.) $n_{\text{пряд}}$ – число проволок в пряди (шт.).

Линейная плотность оплетки – величина, представляющая собой отношение площади поверхности, закрытой прядями одного направления, к полной площади поверхности оплетаемого сердечника.

Так как оплетка имеет 2 направления, то линейная плотность оплетки будет определяться следующим образом [6]:

$$p_{\text{лин}} = \frac{n_{\text{пряд}} \cdot a_{\text{пряд}} \cdot d_{\text{пр.оп}}}{2 \cdot h_{\text{оп}} \cdot \cos(\alpha)}. \quad (22)$$

Далее рассчитывается плотность оплетки:

$$p_{\text{оп}} = 2 \cdot p_{\text{лин}} - p_{\text{лин}}^2 = 1 - \left(1 - \frac{n_{\text{пряд}} \cdot a_{\text{пряд}} \cdot d_{\text{пр.оп}}}{2 \cdot h_{\text{оп}} \cdot \cos(\alpha)}\right)^2. \quad (23)$$

Диаметр по оплетке:

$$D_{\text{эк}} = D_{\text{скр}} + 4 \cdot d_{\text{пр.оп}}. \quad (24)$$

На первый взгляд формулы (19) и (24) противоречат друг другу. Но формула (19) отражает расчет диаметра по оплетке, образуемого прядями одного направления, а формула (24) – диаметр по оплетке, образуемого прядями двух направлений.

5) расчет диаметра оболочки:

$$D_{\text{об}} = D_{\text{эк}} + (2 \cdot h_{\text{об}}), \quad (25)$$

где $h_{\text{об}}$ – радиальная толщина оболочки.

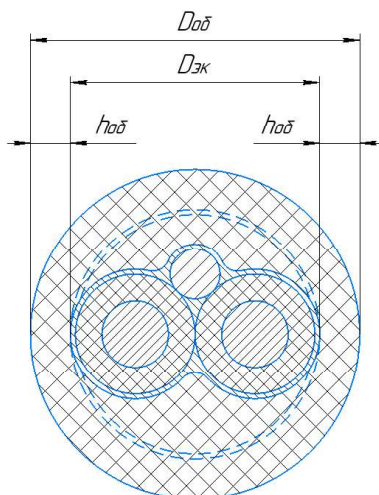


Рис. 9. Обозначение геометрических параметров для расчета диаметра оболочки
Fig. 9. Designation of geometric parameters for calculating the shell diameter

На данном этапе расчет геометрических параметров кабеля завершается. Далее определяется расход материалов, затрачиваемых на производство кабеля.

Определение расхода материалов на производство кабеля

Определение расхода материалов – один из важнейших этапов проектирования кабеля. От номенклатуры используемых материалов и их количества непосредственно зависит себестоимость продукта и его соответствие необходимым требованиям. Как правило, процесс проектирования нагревательного кабеля сводится к поиску оптимального соотношения цены и качества.

Процесс расчета расхода материалов, как и расчет геометрических параметров, можно разделить на несколько этапов:

1) расчет массы ТПЖ:

$$m_{\text{ТПЖ}} = S_{\text{пр}} \cdot n_{\text{пр}} \cdot n_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot k_{\text{у}}, \quad (26)$$

где $m_{\text{ТПЖ}}$ – масса ТПЖ (кг/км); $S_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения проволоки (мм²); $n_{\text{пр}}$ – количество проволок в скрутке (шт); $n_{\text{ж}}$ – количество нагревательных жил в кабеле (шт); $\rho_{\text{пр}}$ – плотность материала проволоки (г/см³); $k_{\text{у}}$ – коэффициент укрутки жил.

Площадь поперечного сечения проволоки рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{\text{пр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}}^2}{4}, \quad (27)$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки (мм);

2) расчет массы изоляции ТПЖ:

$$m_{\text{из}} = (S_{\text{из}} - S_{\text{ТПЖ}}) \cdot \rho_{\text{из}} \cdot k_{\text{т}} \cdot n_{\text{ж}}, \quad (28)$$

где $m_{\text{из}}$ – масса изоляции (кг/км); $S_{\text{из}}$ – площадь поперечного сечения изоляции (мм²); $S_{\text{ТПЖ}}$ – площадь поперечного сечения ТПЖ (мм²); $\rho_{\text{из}}$ – плотность материала изоляции (г/см³); $k_{\text{т}}$ – коэффициент технологических факторов.

$$S_{\text{ТПЖ}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ТПЖ}}^2}{4}, \quad (29)$$

$$S_{\text{из}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{из}}^2}{4}. \quad (30)$$

Подставив формулы (29), (30) в (26) получаем:

$$\begin{aligned} m_{\text{из}} &= \left(\frac{\pi \cdot (D_{\text{ТПЖ}} + 2 \cdot h_{\text{из}})^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{\text{ТПЖ}}^2}{4} \right) \cdot \rho_{\text{из}} \cdot k_{\text{т}} \cdot n_{\text{ж}} = \\ &= \left(\frac{\pi \cdot (D_{\text{ТПЖ}}^2 + 4 \cdot h_{\text{из}} \cdot D_{\text{ТПЖ}} + 4 \cdot h_{\text{из}}^2)}{4} - \frac{\pi \cdot D_{\text{ТПЖ}}^2}{4} \right) \cdot \rho_{\text{из}} \cdot k_{\text{т}} \cdot n_{\text{ж}} = \\ &= \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{ТПЖ}}^2 + 4 \cdot \pi \cdot h_{\text{из}} \cdot D_{\text{ТПЖ}} + 4 \cdot \pi \cdot h_{\text{из}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{\text{ТПЖ}}^2}{4} \right) \cdot \rho_{\text{из}} \cdot k_{\text{т}} \cdot n_{\text{ж}} = \\ &= (\pi \cdot h_{\text{из}} \cdot D_{\text{ТПЖ}} + \pi \cdot h_{\text{из}}^2) \cdot \rho_{\text{из}} \cdot k_{\text{т}} \cdot n_{\text{ж}} \end{aligned}$$

Произведя последнее преобразование, получаем формулу расчета массы изоляции в зависимости от её радиальной толщины:

$$m_{\text{из}} = (\pi \cdot h_{\text{из}} \cdot (D_{\text{ТПЖ}} + h_{\text{из}})) \cdot \rho_{\text{из}} \cdot k_{\text{т}} \cdot n_{\text{ж}} \quad (32)$$

3) расчет массы экрана:

3.1) заземляющая жила и фольга.

Расчет массы заземляющей жилы производится аналогично расчету массы ТПЖ (26), (27).

Масса фольги вычисляется по формуле:

$$m_{\text{ф}} = S_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{ф}}, \quad (33)$$

где $m_{\text{ф}}$ – масса фольги (кг/км); $S_{\text{ф}}$ – площадь поперечного сечения фольги (мм²); $\rho_{\text{ф}}$ – плотность материала фольги (г/см³).

$$S_{\text{ф}} = h_{\text{ф}} \cdot t_{\text{ф}}, \quad (34)$$

где $t_{\text{ф}}$ – толщина фольги (мм).

Подставив формулу (34) в (33) получаем:

$$m_{\text{ф}} = h_{\text{ф}} \cdot t_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{ф}} \quad (35)$$

3.2) оплетка из медной проволоки.

Масса оплетки определяется следующим образом:

$$m_{\text{оп}} = \frac{S_{\text{оп}} \cdot \rho_{\text{пр.оп}}}{\sin(\alpha)}, \quad (36)$$

где $m_{\text{оп}}$ – масса оплетки (кг/км); $S_{\text{оп}}$ – суммарное сечение всех проволок в оплетке (мм²); $\rho_{\text{пр.оп}}$ – плотность материала оплетки (г/см³).

$$S_{\text{оп}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр.оп}}^2}{4} \cdot n_{\text{пряд}} \cdot a_{\text{пряд}}. \quad (37)$$

Подставив формулу (37) в (36) получаем:

$$m_{\text{оп}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр.оп}}^2 \cdot \rho_{\text{пр.оп}} \cdot n_{\text{пряд}} \cdot a_{\text{пряд}}}{4 \cdot \sin(\alpha)} \quad (38)$$

4) Расчет массы оболочки.

Формула расчета массы оболочки, исходя из геометрии кабеля, выглядит следующим образом:

$$m_{\text{об}} = (S_{\text{об}} - 2 \cdot S_{\text{из}} - S_{\text{зж}} - S_{\text{ф}}) \cdot \rho_{\text{об}}, \quad (39)$$

где $m_{\text{об}}$ – масса оболочки (кг/км); $S_{\text{об}}$ – площадь поперечного сечения оболочки (мм²); $S_{\text{зж}}$ – площадь поперечного сечения заземляющей жилы (мм²); $S_{\text{ф}}$ – площадь поперечного сечения фольги (мм²); $\rho_{\text{об}}$ – плотность материала оболочки (г/см³).

$$S_{\text{об}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{об}}^2}{4}, \quad (40)$$

$$S_{\text{зж}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр.зж}}^2}{4} \cdot n_{\text{пр.зж}}, \quad (41)$$

где $d_{\text{пр.зж}}$ – диаметр проволоки заземляющей жилы (мм); $n_{\text{пр.зж}}$ – количество проволок в скрутке заземляющей жилы (шт.).

Подставив формулы (30), (34), (40), (41) в (39) получаем:

$$m_{\text{об}} = \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{об}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{\text{из}}^2}{2} - \frac{\pi \cdot d_{\text{пр.зж}}^2 \cdot n_{\text{пр.зж}}}{4} - h_{\text{ф}} \cdot t_{\text{ф}} \right) \cdot \rho_{\text{об}}. \quad (42)$$

Выводы

В данной статье были рассмотрены основные этапы проектирования резистивного нагревательного кабеля, а также предложена математическая модель, позволяющая определить электрические и конструктивные параметры кабеля.

Современные требования к качеству нагревательного кабеля, отраженные в стандартах и технических регламентах защищают потребителя от продукции, не отвечающей требованиям к качеству. Они стимулируют производителя изготавливать продукцию требуемого качества. Предложенная же в данной статье математическая модель позволяет производителю спроектировать нагревательный кабель с экономически обоснованной оптимальной конструкцией, отвечающей всем современным техническим и технологическим требованиям.

Список источников:

- ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением N 1) – Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001719> (дата обращения: 02.04.2023).
- Медунецкий В.М. Основы обеспечения качества и сертификация промышленных изделий. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 61 с. – Электронный ресурс. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1023.pdf> (дата обращения: 12.04.2023).
- Хисамова Э.Д., Зайнутдинова Э.Э. Обеспечение качества продукции: учебник. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 170 с. – Электронный ресурс. URL: https://kpfu.ru/staff_files/F1627054872/Uchebnik_OKP_Hisamova_Zajnutdinova_dlya_pechati.pdf (дата обращения: 12.04.2023).

References:

- GOST 15467-79 Product- quality Control. Basic Concepts. Terms and Definitions (with Amendment No. 1) [Internet]. 2015 [cited 2023 Apr 02]. [Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200001719>]
- Medunetsky V.M. Fundamentals of Quality Assurance and Certification of Industrial Products [Internet]. Saint Petersburg: ITMO; 2013 [cited 2023 Apr 12]. Available from: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1023.pdf>
- Khisamova E.D., Zainutdinova E.E. Product Quality Assurance [Internet]. Kazan: Kazan University Publishing House; 2018 [cited 2023 Apr 12]. Available from: https://kpfu.ru/staff_files/F1627054872/Uchebnik_OKP_Hisamova_Zajnutdinova_dlya_pechati.pdf

4. ГОСТ Р МЭК 60800-2012. Кабели нагревательные на номинальное напряжение 300/500 В для обогрева помещений и предотвращения образования льда (Переиздание). – Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095019> (дата обращения: 04.04.2023).

5. ГОСТ IEC 62395-1-2016 Системы обогрева трубопроводов, работающие на электрическом сопротивлении, для промышленного и коммерческого применения. Часть 1. Общие требования и требования к испытаниям. – Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200145008> (дата обращения: 04.04.2023).

6. В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с. – Электронный ресурс. URL: <https://djvu.online/file/XyYZo6jg5by5R> (дата обращения: 07.04.2023).

4. GOST R IEC 60800-2012. Heating Cables With a Rated Voltage of 300/500 V for Comfort Heating and Prevention of Ice Formation [Internet]. 2014 [cited 2023 Apr 04]. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200095019>.

5. GOST IEC 62395-1-2016 Electrical Resistance Trace Heating Systems for Industrial and Commercial Applications. Part 1. General and Testing Requirements [Internet]. 2017 [cited 2023 Apr 04]. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200145008>

6. V.M. Leonov, I.B. Peshkov, I.B. Ryazanov, S.D. Kholodnyy. Fundamentals of Cable Technology [Internet]. Moscow: Academy; 2006 [cited 2023 Apr 07]. Available from: <https://djvu.online/file/XyYZo6jg5by5R>

Информация об авторах:

Коровин Максим Леонидович

аспирант Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

Куликов Михаил Юрьевич

д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

Information about the authors:

Korovin Maxim Leonidovich

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

Kulikov Mikhail Yurievich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher 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 22.09.2023; одобрена после рецензирования 23.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The article was submitted 22.09.2023; approved after reviewing 23.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.

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 15.12.2023. Выход в свет 27.12.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 9,76.

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

