

# О РАСЧЁТЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ ТРЁХФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ И УСЛОВИЯХ ПРОКЛАДКИ

Н. В. Коровкин<sup>1</sup>, Россия, Г. В. Грешняков<sup>2</sup>, Россия, С. Д. Дубицкий<sup>3</sup>, Россия

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, <sup>2</sup>НИИ «Севкабель», <sup>3</sup>ООО «Тор».  
e-mail: geogresh@rambler.ru

**Аннотация.** Достоверная информация о значениях предельно допустимых токов высоковольтных силовых кабелей при различных условиях прокладки, является ключевым моментом при проектировании кабельных линий. Поэтому анализ тепловых режимов работы трёхфазной кабельной системы необходимо проводить с учётом особенностей конструкции прокладываемых кабелей.

**Abstract.** Reliable information about the values of the maximum allowable current of high voltage power cables in various layouts is a key issue in the design of cable lines. Therefore, the analysis of electromagnetic and thermal conditions of the three-phase cable system with a single-phase routing, it is necessary to carry out structural peculiarities and lay cables.

## Введение

Рассмотрен подход к расчётам предельно допустимых токов нагрузки кабелей с медной или алюминиевой жилой, с медным экраном, проволочной броней из алюминиевого сплава и наружной оболочкой из полиэтилена на напряжение 64/110 кВ.

Задача оценки максимальной токовой нагрузки является обратной задачей расчета теплового поля. Прямая задача использует известный источник тепловыделения и рассчитывает распределение температуры во всех точках модели. Обратная задача идентифицирует источник тепла (в нашем случае токовую нагрузку кабеля) по заданному значению температуры в контрольной точке модели. Она может быть решена путем перебора решений нескольких прямых задач, возможно, с использованием интерполяции и/или поискового алгоритма. Начальное приближение для действующего значения тока жилы выбирается из физических соображений на основании оценок и инженерных расчётов более общих моделей. Условие соблюдения температурного режима работы кабеля формулируется так: температура поверхности жилы при данном действующем значении тока не должна превышать предельно допустимой величины  $t_{\max} = 90^\circ\text{C}$  для полиэтиленовой изоляции.

Решение прямой задачи (оценка температуры по заданному току) состоит из двух этапов:

- Расчёт источников тепловыделения в жиле, экране и броне.
- Расчет температурного поля кабельной системы с помощью комплекса программ ELCUT и определение температуры поверхности жилы.

## К расчёту температурного поля

В отличие от электромагнитного расчета, с точки зрения расчета температурного поля кабеля мож-

но без потери точности пренебречь разделением токопроводящей жилы, экрана и брони на отдельные проволоки. Тогда однофазный кабель в поперечном сечении представляет собой многослойную структуру, инвариантную относительно поворота вокруг геометрического центра. Поэтому, температурное поле в отдельно взятом кабеле является одномерным, и может быть рассчитано на основе тепловых сопротивлений без применения полевых методов.

Однако, при расчете теплового поля системы из 3-х однофазных кабелей, задача становится двумерной, и аналитический расчет теряет смысл. Поэтому, для расчета температурного поля системы кабелей с учетом схемы их прокладки, применен программный комплекс ELCUT [2], позволяющий рассчитать температурное поле методом конечных элементов (МКЭ). Решается нестационарное уравнение теплопроводности для двумерной (плоскопараллельной) геометрии в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$T$  - температура, зависящая от времени  $t$  и координат  $x, y$ ;  $t$  - время;  $\lambda_{(x,y)}$  - компоненты тензора теплопроводности. Теплоемкость может зависеть от температуры  $T$ ;  $q$  - источник температурного поля - удельная мощность тепловыделения. Мощность объемного источника может зависеть от температуры;  $c(T)$  - удельная теплоемкость материала. Удельная теплоемкость может зависеть от температуры;  $\rho$  - плотность материала.

Формулируя задачу в ELCUT, мы проходим следующие этапы:

- Выбор типа анализа – одну из десяти предложенных систем допущений и приближений, приводящих к тому или иному двумерному

дифференциальному уравнению в частных производных;

- Изображение во встроенном графическом редакторе сечения модели, либо импорт готового чертежа из CAD-системы;
- Задание физических свойств материалов, источников поля и граничных условий. Физические константы привязываются к геометрическим формам модели при помощи аппарата меток.
- Дискретизация геометрической модели – построение сетки конечных элементов – выполняется в ELCUT автоматически. Возможно управлять плотностью сетки, разрезая и сгущая ее в нужных местах модели для достижения оптимального баланса между точностью расчета и производительностью.
- Интерактивный анализатор результатов решения задачи показывает картины поля в различных видах, а также вычисляет практически любые локальные и интегральные физические характеристики. Рассчитанное поле также может служить источником для решения последующих задач.

Практическая пригодность того или иного программного инструмента для расчета полей определяется в первую очередь его возможностями по заданию источников поля, граничных условий и свойств материалов. ELCUT предоставляет следующие возможности:

- Источник теплового поля может быть линейным (бесконечно тонкая струна), поверхностным или объемным. Все виды источников могут быть зависеть от времени. Плотность мощности поверхностного источника может быть функцией координат, а удельная мощность объемного источника может зависеть от температуры.
- Свойства материалов, такие как теплопроводность и удельная теплоемкость могут зависеть от температуры.
- Список возможных граничных условий включает:
  1. условие известной температуры (условие 1-ого рода);
  2. известный тепловой поток (условие 2-ого рода);
  3. конвективный теплообмен с омывающей средой, которая характеризуется известной температурой среды и коэффициентом конвективного теплообмена;
  4. радиационный теплообмен с бесконечно удаленной средой, окружающей модель со всех сторон. Этот вид теплообмена, пропорциональный 4-ой степени температуры поверхности, характеризуется заранее известной температурой среды и коэффициентом радиационного теплообмена;

5. в ELCUT отсутствует возможность решения открытой (неограниченной в пространстве) задачи. Чтобы преодолеть эту сложность, в практических случаях часто бывает необходимо расширять расчетную область далеко за пределы моделируемого технического объекта таким образом, чтобы на границе области поле можно было положить нулевым.

### О расчёте токов в экранах

При анализе тепловых режимов кабелей необходимо учитывать тепловыделения [1] в экранах и броне. Значения токов в экранах будут зависеть от способа их заземления и от наличия (отсутствия) транспозиции. Поскольку броня кабелей заземляется, то в электрическом смысле она превращается в часть экрана, при этом поперечное сечение брони значительно больше, чем сечение медного экрана.

Вычисление токов в экранах кабелей проводилось с помощью специально разработанной компьютерной программы «ЭКРАН» [3], позволяющей для каждой конкретной кабельной передачи с однофазными кабелями выбрать наиболее рациональный способ соединения и заземления экранов. Программа позволяет вычислять токи в однородных медных или алюминиевых экранах.

Для того, чтобы использовать эту программу для учёта влияния брони, необходимо привести реальный экран, который представляет собой комбинированный проводник, к эквивалентному медному экрану с новым поперечным сечением. Чтобы это сделать, необходимо:

- в соответствии с данными табл.2 определить общее сечение брони;
- определить удельное сопротивление сечения медного экрана  $\rho_{\text{Cu}}$  («весовой» омический коэффициент), как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление меди;
- определить «весовой» омический коэффициент сечения брони из алюминиевого сплава  $\rho_{\text{Br}}$ , как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление сплава;
- определить «весовой» омический коэффициент сопротивления комбинированного экрана «медь - броня»:
$$\rho_{\text{Cu-Br}} = (\rho_{\text{Br}} \times \rho_{\text{Cu}}) / (\rho_{\text{Br}} + \rho_{\text{Cu}}) \quad (2)$$
- определить сечение эквивалентного медного экрана, разделив  $\rho_{\text{Cu-Br}}$  на величину удельного сопротивления меди.

Например, для кабеля с жилой сечением  $185 \text{ мм}^2$  и экраном  $150 \text{ мм}^2$ , при сечении брони  $538 \text{ мм}^2$ , сечение эквивалентного медного экрана составит  $130 \text{ мм}^2$ .

### Источники тепловыделения

Объемная плотность тепловыделения, заданная для блока модели, соответствует объемному источнику тепла. После вычисления тока в эквивалентном медном экране необходимо определить удельные мощности тепловыделения как в жиле  $q_{ж}$  так и в эквивалентном экране  $q_э$ , которые определяют правую часть уравнения (1)

$$q_{ж} = (I_{ж} / S_{ж})^2 \rho_{ж} \quad (3)$$

где:  $q_{ж}$  - объемная плотность тепловыделения [Вт/м<sup>3</sup>],  $I_{ж}$  - действующее значение тока жилы [А],  $S_{ж}$  - площадь поперечного сечения жилы [мм<sup>2</sup>],  $\rho_{ж}$  - удельное сопротивление материала [Ом/м]. Аналогично для экрана:

$$q_э = (I_э / S_э)^2 \rho_э \quad (4)$$

После вычисления значений объемных плотностей тепловыделения, соответствующие значения заносятся в исходные данные для ELCUT.

### Исходные данные для решения. Процесс решения

Исходными данными для решения прямой задачи, кроме тепловыделений, являются: геометрическая модель кабеля (рис.1) и данные о тепловых характеристиках материалов и окружающей среды. Граничные условия задаются в зависимости от условий прокладки. Если кабель прокладывается в грунте, задается температура на границе расчетной области, например на ребрах квадрата со стороной, равной 0,8 от глубины прокладки.

Значение температуры выбирается в соответствии с ТУ на кабель (для прокладки в грунте – 15°C).

При прокладке на воздухе задается граничное условие конвекции на внешней границе каждой фазы. Оно описывает конвективный теплообмен и определяется следующим образом:

$$F_n = \alpha(T - T_0), \quad (5)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $T_0$  - температура окружающей среды.

Параметры  $\alpha$  и  $T_0$  могут меняться от ребра к ребру. Например, при наличии ветра, на подветренной и противоположной сторонах поверхности кабеля (следах поверхности), значения  $\alpha$  будут существенно отличаться друг от друга.

Таблица 1. Теплопроводность элементов кабеля

Физическая величина	Значение	Ед. изм.
Теплопроводность меди	386	Вт/К*м
Теплопроводность алюминия	220	Вт/К*м
Теплопроводность изоляции	0.248-0.289	Вт/К*м
Теплопроводность брони	237	Вт/К*м
Теплопроводность грунта	0.833	Вт/К*м
Температура грунта	15	С.

На рис.1 представлена геометрическая модель, построенная в системе ELCUT, для способа прокладки фаз в ряд с просветом.

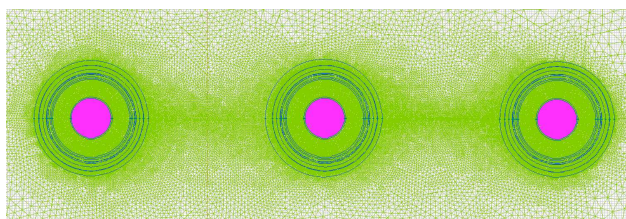


Рис.1 Прокладка в горизонтальной плоскости с сеткой конечных элементов

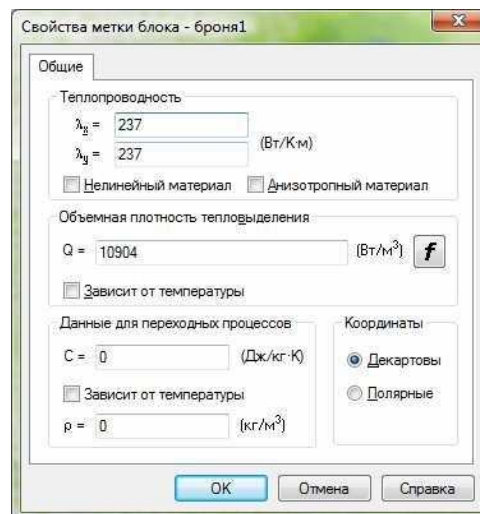


Рис.2. Активное окно ELCUT при введении свойств блока модели «броня1».

После введения свойств всех блоков и ребер модели (рис.2) строится сетка конечных элементов (СКЭ) (автоматически в зависимости от размеров расчетной области), и проводятся вычисления температуры в точках сетки в соответствии с характером триангуляции расчетной области.

### Результаты расчётов

Ниже, в таблицах 3,4 приведены значения предельно допустимых токов нагрузки кабелей для Си и А1 жил, при значении коэффициента нагрузки  $k_n = 1$ , с учётом токов в эквивалентном медном экране. На рис.3 представлена цветовая диаграмма, иллюстрирующая результат. Сечение эквивалентного экрана рассчитывалось для конструкций брони согласно табл.2.

Таблица 2

Сечение жилы/экрана	Число проволок брони	Диаметр проволок брони, мм.	Шаг наложения, мм.
185/50	63	3,3	1090
185/150	63	3,3	1090
240/50	65	3,3	1120
240/185	65	3,3	1120
300/50	67	3,3	1150
300/185	67	3,3	1150
350/50	68	3,3	1180

350/185	68	3,3	1180
400/50	68	3,3	1170
400/185	68	3,3	1170
500/50	71	3,3	1220
500/185	71	3,3	1220
630/70	74	3,3	1270
630/210	74	3,3	1270
800/70	77	3,3	1330
800/210	77	3,3	1330

Таблица 3

Номинальное сечение жилы, мм	Ток (А) при прокладке в земле, кабели расположены треугольником встык, экраны кабелей соединены и заземлены с двух сторон, не более	
	кабель с медной жилой	кабель с алюминиевой жилой
185	<b>400/429*</b>	<b>340/340</b>
240	<b>418/489</b>	<b>362/389</b>
300	<b>452/538</b>	<b>400/432</b>
350	<b>480/577</b>	<b>426/462</b>
400	<b>510/612</b>	<b>458/497</b>
500	<b>536/673</b>	<b>495/553</b>
630	<b>559/721</b>	<b>515/605</b>
800	<b>580/779</b>	<b>538/659</b>

\* обычным шрифтом набраны расчётные значения без учёта тепловыделений в броне.

### Литература

1. Грешняков Г.В., Коровкин Н.В., Куликов А.В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный силовоточный кабель. В сборнике «Тезисы докладов международного симпозиума по электромагнитной совместимости и экологии», СПб, 2009, с.140-146
2. Дубицкий С.Д. Elcut 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей// Exponenta Pro. 2004 № 1. См. также [www.elcut.ru](http://www.elcut.ru)

Таблица 4

Номинальное сечение жилы, мм	Ток при прокладке в земле, кабели расположены в ряд с просветом в диаметр кабеля, экраны кабелей соединены и заземлены с двух сторон, А, не более	
	кабель с медной жилой	кабель с алюминиевой жилой
185	<b>316/407*</b>	<b>282/333</b>
240	<b>332/453</b>	<b>300/375</b>
300	<b>348/488</b>	<b>319/410</b>
350	<b>362/515</b>	<b>337/438</b>
400	<b>378/538</b>	<b>353/460</b>
500	<b>389/576</b>	<b>368/501</b>
630	<b>402/610</b>	<b>383/540</b>
800	<b>411/648</b>	<b>398/583</b>

\* обычным шрифтом набраны расчётные значения без учёта тепловыделений в броне

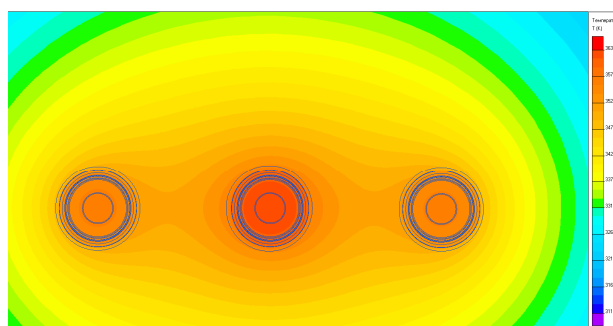


Рис.3. Цветовая диаграмма теплового поля в сечении кабельной системы. 800мм<sup>2</sup>, медным экраном 210 мм<sup>2</sup>, сечение брони - 681,45 мм<sup>2</sup>, при прокладке в грунте в ряд с просветом в диаметр кабеля, броня и экран заземлены с двух сторон.

### Заключение

Рассмотрен метод расчёта допустимых токов кабелей в трёхфазной системе при однофазной прокладке, с учётом тепловыделений в провололочной броне. Предложен алгоритм расчёта токов в экране, путём введения эквивалентного комбинированного экрана. Наличие брони при расчёте предельно допустимых токов высоковольтных кабелей, заставляет снижать их на величину от 7 до 25% (зависит о сечения жилы), по сравнению с небронированными конструкциями. Для повышения пропускной способности необходимо применять транспозицию медного экрана вместе с броней, либо использовать для бронирования кабеля синтетические волокна.

3. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А «Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения» Перенапряжение и надёжность эксплуатации электрооборудования. СПб., 2008.