

О расчете предельно допустимых токов силовых кабелей 110 кВ

с изоляцией из сшитого полиэтилена и проволочной броней из алюминиевого сплава

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 трехфазной кабельной системы необходимо проводить с учетом особенностей конструкции прокладываемых кабелей, с точки зрения дополнительных источников тепловыделения.

Георгий Грешняков, к. т. н

geogresh@rambler.ru

Семен Дубицкий

Аркадий Рудаков

Речь идет о расчетах предельно допустимых токов нагрузки кабелей с одной медной или алюминиевой жилой, с медным экраном, с водоблокирующим слоем, с проволочной броней 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 — идентифицирует источник тепла (в нашем случае токовую нагрузку кабеля) по заданному значению температуры в контрольной точке модели. Обратная задача решается 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 расчетов более общих моделей. Необходимое условие соблюдения температурного режима работы кабеля — когда температура поверхности жилы, при данном действующем значении тока, не превышает предельно допустимой величины +90 °С для полиэтиленовой изоляции. Решение задачи разбивается на два основных этапа:

- Расчет источников тепловыделения в жиле, экране и броне.
- Тепловой расчет кабельной системы и определение температуры жилы с помощью комплекса программ ELCUT.

Расчет температурного поля

В отличие от электромагнитного расчета, при расчете температурного поля кабеля можно 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. Согласно этому 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 трех однофазных кабелей задача становится двумерной, и аналитический расчет теряет смысл. Поэтому для анализа температурного поля системы кабелей с учетом схемы их прокладки применен программный комплекс ELCUT [3], позволяющий рассчитать температурное поле методом конечных элементов (МКЭ). Решается нестационарное уравнение теплопроводности для двумерной (плоскопараллельной) геометрии в виде:

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

где 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)); ∂T — удельная теплоемкость материала (удельная теплоемкость может зависеть от температуры); ρ — плотность материала

Каждый материал в модели характеризуется своей теплопроводностью, плотностью и удельной теплоемкостью.

Формулируя задачу в ELCUT, необходимо пройти следующие этапы:

- Выбор типа анализа — одной из десяти предложенных систем допущений и приближений, приводящих к тому или иному двумерному дифференциальному уравнению в частных производных.
- Построение во встроенном графическом редакторе сечения модели либо импорт готового чертежа из CAD-системы.
- Задание физических свойств материалов, источников тепловыделения, граничных условий. Физические константы привязываются к геометрическим формам модели при помощи аппарата меток.
- Дискретизация геометрической модели — построение сетки конечных элементов — выполняется в ELCUT полностью автоматически. При желании можно управлять густотой сетки, разрежая 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 быть передано в качестве источника 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 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-го рода);
 - 2) известный тепловой поток (условие 2-го 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 четвертой степени температуры поверхности, характеризуется заранее известной температурой среды и коэффициентом радиационного теплообмена;
 - 5) в ELCUT отсутствует возможность решения открытой (не ограниченной 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.

Расчет токов в экранах

При анализе тепловых режимов кабелей необходимо учитывать тепловыделения в экранах и броне. Поэтому важным моментом при расчете является определение токов в этих элементах конструкции. 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. Например, для кабеля с сечением жилы 185 мм² броня имеет сечение 538 мм², а для кабеля с сечением жилы 800 мм² площадь поперечного сечения брони составляет 658 мм². Таким образом, наличие брони из круглой проволоки на основе алюминиевого сплава делает операцию транспозиции экранов практически труднореализуемой.

Из этих соображений основное внимание в настоящей работе сосредоточено на анализе тепловых режимов кабелей при заземлении экранов с двух сторон при расположении кабелей как треугольником, так и в горизонтальной плоскости при прокладке в грунте.

Вычисление токов в экранах кабелей проводилось с помощью специально разработанной компьютерной программы «ЭКРАН» [1], позволяющей для каждой конкретной кабельной передачи с однофазными кабелями выбрать наиболее рациональный способ соединения и заземления экранов.

Программа «ЭКРАН» (ПЭ) для расчета токов и напряжений в экранах однофазных силовых кабелей 6–500 кВ зарегистрирована в Федеральном государственном учреждении «Федеральный институт промышленной собственности» (г. Москва). ПЭ позволяет вычислять токи в однородных медных или алюминиевых экранах. Вычисления производятся на основе анализа системы уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа с учетом слагаемых, обусловленных коэффициентами взаимной индукции M_{ij} между соответствующими ветвями (жила-экран), с вычислением значений этих коэффициентов в зависимости от геометрических размеров, взаимного расположения кабелей и экранов, способов заземления экранов. Вычисления ведутся в диалоговом режиме, необходимо лишь вводить запрашиваемые величины: ток жилы; сечение жилы; сечение экрана; материал жилы и экрана (медь или алюминий); способ заземления экрана (с одной стороны, с двух сторон, по правилу правильной транспозиции и т. д.); способ прокладки — в ряд или треугольником; условия прокладки — в земле (удельное сопротивление грунта) или на воздухе; параметры питающей сети.

Чтобы использовать ПЭ для учета влияния брони, необходимо привести реальный экран, который представляет собой комбинированный проводник, к эквивалентному медному экрану с новым поперечным сечением. Для этого необходимо:

- в соответствии с данными таблицы 2 определить общее сечение брони;
- определить удельное сопротивление сечения медного экрана ρ_{sCu} («весовой» омический коэффициент) как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление меди;
- определить «весовой» омический коэффициент сечения брони из алюминиевого сплава ρ_{sBr} как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление сплава;
- определить «весовой» омический коэффициент сопротивления комбинированного экрана «медь-броня»:

$$\rho_{sCu-Br} = (\rho_{sBr} \times \rho_{sCu}) / (\rho_{sBr} + \rho_{sCu});$$

- определить сечение эквивалентного медного экрана, разделив ρ_{sCu-Br} на величину удельного сопротивления меди.

Например, для кабеля с жилой сечением 185 мм² и экраном 150 мм² при сечении брони 538 мм² сечение эквивалентного медного экрана составит 130 мм².

Источники тепловыделения

Объемная плотность тепловыделения, заданная для блока {XE «блок: источник тепла»} 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):

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

где: $q_{ж}$ — объемная плотность тепловыделения жилы [Вт/м³]; $I_{ж}$ — действующее значение тока жилы [А]; $S_{ж}$ — площадь поперечного сечения жилы [мм²]; $\rho_{ж}$ — удельное сопротивление материала жилы [Ом/м].

Аналогично для экрана:

$$q_э = (I_э/S_э)^2 \times \rho_э \quad (3)$$

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, помимо тепловыделений, являются геометрическая модель кабеля 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,

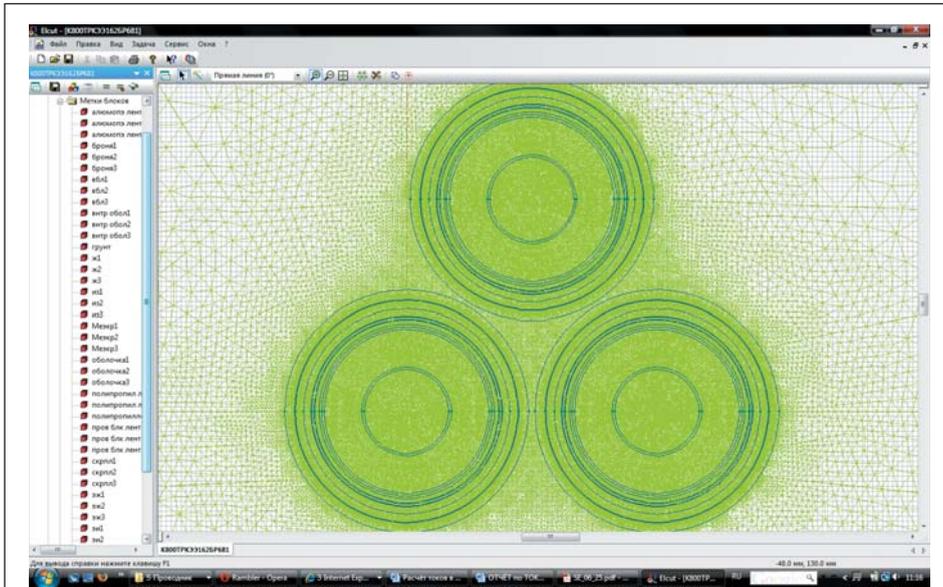


Рис. 1. Прокладка треугольником встык с триангуляцией расчетной области

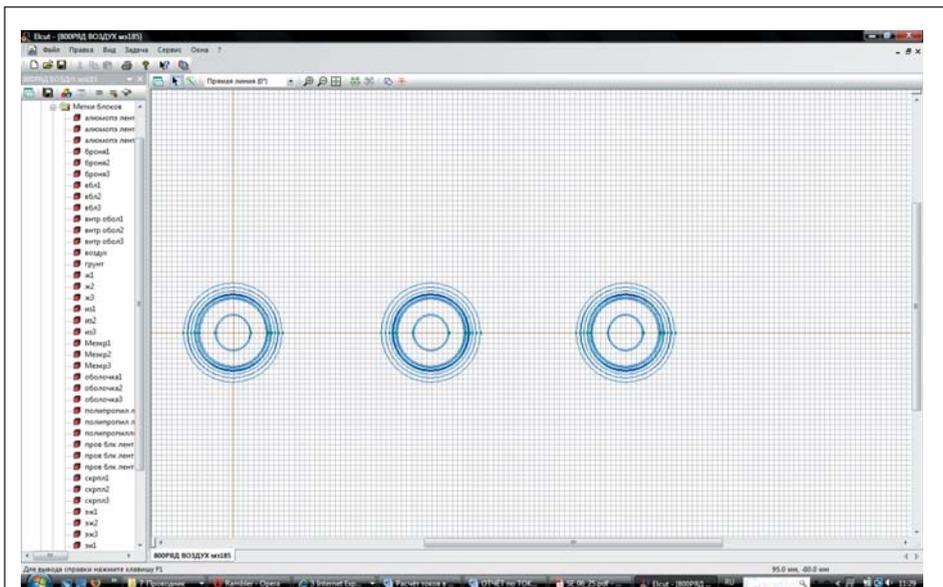


Рис. 2. Прокладка в горизонтальной плоскости

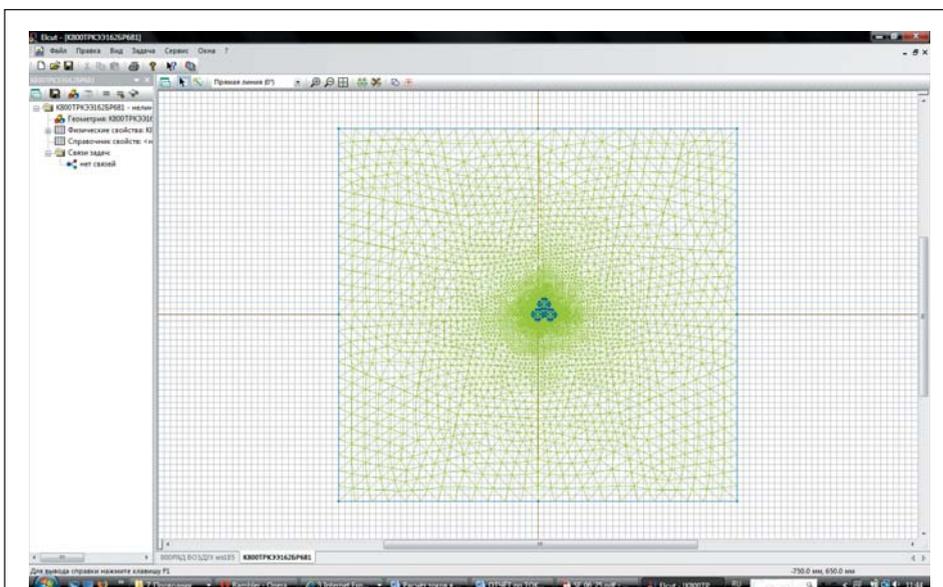


Рис. 3. Общий вид расчетной модели при прокладке в грунте треугольником

Таблица 1. Теплопроводности основных элементов конструкции

Физическая величина	Значение
Теплопроводность меди, Вт/К×м	386
Теплопроводность алюминия, Вт/К×м	220
Теплопроводность изоляции, Вт/К×м	0,248–0,289
Теплопроводность брони, Вт/К×м	237
Теплопроводность грунта, Вт/К×м	0,833
Температура грунта, °С	15

например на ребрах квадрата со стороной, равной 0,8 от глубины прокладки.

Значение температуры выбирается в соответствии с ТУ на кабель (обычно для прокладки в грунте — +15 °С). При прокладке на воздухе задается граничное условие конвекции на внешней границе каждой фазы. Оно описывает конвективный теплообмен и определяется следующим образом:

$$F_n = \alpha(T - T_0), \quad (4)$$

где α — коэффициент теплоотдачи {ХЕ «коэффициент: теплоотдачи»}, {ХЕ «коэффициент: конвекции»}, {ХЕ «коэффициент: теплоотдачи»: «См. коэффициент: конвекции»} и T_0 — температура окружающей среды {ХЕ «температура: окружающей среды»}. Параметры α и T_0 могут меняться от ребра к ребру. Например, при наличии ветра на подветренной и противоположной сторонах поверхности кабеля (следах поверхности) значения α будут существенно отличаться друг от друга.

На рис. 1–3 представлены геометрические модели, построенные в системе ELCUT для различных способов прокладки фаз. Рис. 4 иллюстрирует работу в программе.

После введения свойств всех блоков и ребер модели 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.

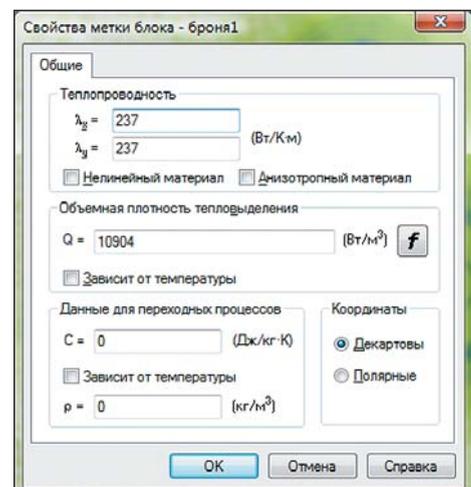


Рис. 4. Активное окно ELCUT при введении свойств блока модели «броня1»

Таблица 2. Параметры для расчета конструкции брони, диаметр проволоки 3,3 мм

Сечение жилы/экрана	Число проволок брони	Шаг наложения, мм
185/50 и 185/150	63	1090
240/50 и 240/185	65	1120
300/50 и 300/185	67	1150
350/50 и 350/185	68	1180
400/50 и 400/185	68	1170
500/50 и 500/185	71	1220
630/70 и 630/210	74	1270
800/70 и 800/210	77	1330

Результаты расчетов

В таблицах 3, 4 приведены значения предельно допустимых токов нагрузки кабелей для медных и алюминиевых жил, при значении коэффициента нагрузки $k_n = 1$, с учетом токов в эквивалентном медном экране. Сечение эквивалентного экрана рассчитывалось для конструкций брони согласно таблице 2.

Таблица 3. Расчет для условий, когда при прокладке в земле кабели расположены треугольником встык, экраны кабелей соединены и заземлены с двух сторон

Номинальное сечение жилы, мм	Ток, А (не более)	
	Кабель с медной жилой	Кабель с алюминиевой жилой
185	400/429*	340/340*
240	418/489*	362/389*
300	452/538*	400/432*
350	480/577*	426/462*
400	510/612*	458/497*
500	536/673*	495/553*
630	559/721*	515/605*
800	580/779*	538/659*

Примечание: *расчетные значения приведены без учета тепловыделений в броне.

Заключение

Рассмотрен метод расчета допустимых токов кабелей в трехфазной системе при однофазной прокладке, с учетом тепловыделений

Таблица 4. Расчет для условий, когда при прокладке в земле кабели расположены в ряд с просветом в диаметр кабеля, их экраны соединены и заземлены с двух сторон (результат расчета, выполненного в программе ELCUT, приведен на рис. 5)

Номинальное сечение жилы, мм	Ток, А (не более)	
	Кабель с медной жилой	Кабель с алюминиевой жилой
185	316/407*	282/333*
240	332/453*	300/375*
300	348/488*	319/410*
350	362/515*	337/438*
400	378/538*	353/460*
500	389/576*	368/501*
630	402/610*	383/540*
800	411/648*	398/583*

Примечание: *расчетные значения приведены без учета тепловыделений в броне.

в проволочной броне. Предложен алгоритм расчета токов в экране путем введения эквивалентного комбинированного экрана. Наличие брони при расчете предельно допустимых токов высоковольтных кабелей приводит к необходимости их снижения на 7–25% (в зависимости 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.

Литература

1. Дмитриев М. В., Евдокунин Г. А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. СПб. 2008.
2. Грешняков Г. В., Нарышкин Е. В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный кабель // Силовая электроника. 2009. № 4.
3. Дубицкий С. Д. ELCUT 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. 2004. № 1.

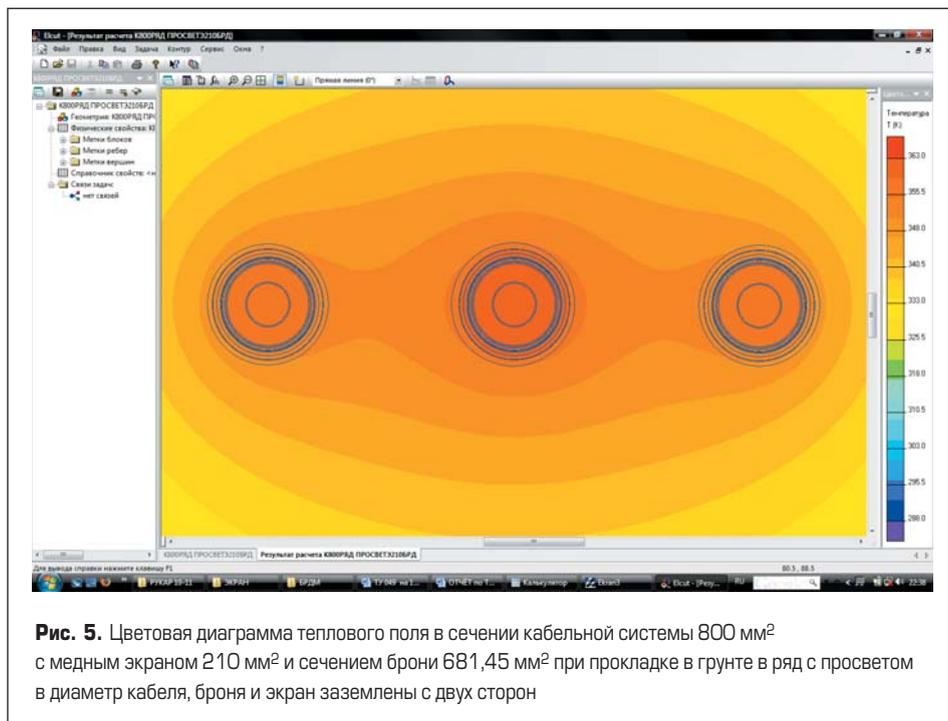


Рис. 5. Цветовая диаграмма теплового поля в сечении кабельной системы 800 мм² с медным экраном 210 мм² и сечением брони 681,45 мм² при прокладке в грунте в ряд с просветом в диаметр кабеля, броня и экран заземлены с двух сторон