

*Г.В. Грешняков, канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник НИИ «Севкабель»;  
Г.Г. Ковалев, канд. физ-мат. наук, заместитель директора НИИ «Севкабель»;  
С.Д. Дубицкий, директор ООО «Тор»*

# К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

## ВВЕДЕНИЕ

Речь пойдет о расчетах предельно допустимых токов нагрузки кабелей на напряжение 64/110 кВ с одной медной или алюминиевой жилой, с медным экраном, с водоблокирующим слоем, с проволочной броней из алюминиевого сплава и наружной оболочкой из полиэтилена. Существует целый ряд публикаций [1, 2, 3], где анализируются тепловые режимы в кабельных линиях, в том числе с помощью численных методов, в частности – метода конечных элементов [4].

Задача оценки максимальной токовой нагрузки является обратной задачей расчета теплового поля. Прямая задача использует известный источник тепловыделения; с ее помощью рассчитывают 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. Обратная задача решается путем перебора решений нескольких прямых задач, возможно с использованием интерполяции и/или поискового алгоритма [6]. В качестве начального приближения для действующего значения тока жилы выбираются результаты расчетов, проведенных в соответствии с МЭК 60287 [3] для конструкций, не предусматривающих наличие брони и дополнительных слоев. Для решения обратной задачи, то есть идентификации источников поля по известной (частично или полностью) картине поля существует множество подходов, как прямых, так и косвенных. В нашем случае речь идет об идентификации источников по значениям температур в немногих точках, а часто одной точке модели. В этой упрощенной ситуации решение обратной задачи сводится к задаче оптимизации: поиск комбинации источников поля в пространстве с ограничениями в виде куба, дающих с достаточной точностью искомую температуру в заданной точке. В расчетах использовался реализованный в одной из программ пакета ELCUT алгоритм оптимизации Нелдера-Мида. Упомянутый алгоритм особенно эффективен для многокритериальной оптимизации. Обсуждаемая в статье задача оптимизации сводится к одномерной. Для одномерной оптимизации ELCUT использует метод Брендта, который тоже дает хороший результат, однако авторы сочли необходимым часть пространства параметров пройти простым перебором, чтобы получить полное представление о поведении целевой функции. Конкретно это сводится к решению серии прямых задач: задается ток в каждой фазе и вычисляется температура жилы.

Необходимое условие соблюдения температурного режима работы кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) выполняется в случае, когда температура поверхности жилы при данном действующем значении тока не должна превышать предельно допустимую величину  $90 \pm 2$  °С (критерий при решении прямой задачи).

Таким образом, решение разбивается на четыре основных этапа:

1. Выбор начального приближения для токов в фазах кабельной цепи.
2. Расчет источников тепловыделения в жиле, экране и броне.
3. Тепловой расчет кабельной системы и определение температуры жилы с помощью комплекса программ ELCUT.
4. Проверка: удовлетворяет ли результат расчета по предыдущему пункту заданному критерию. Если нет – выбор следующего значения тока, то есть переход к этапу 1.

## К РАСЧЕТУ 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. 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 трех 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 [7], позволяющий рассчитать температурное поле методом конечных элементов (МКЭ). Решается стационарное уравнение теплопроводности для двумерной (плоско-параллельной) 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 и координат  $x, y$ ;  $\lambda_{(x,y)}$  – компоненты тензора теплопроводности (теплопроводность

может зависеть от температуры  $T$ );  $q$  – источник температурного поля – удельная мощность тепловыделения (мощность объемного источника может зависеть от температуры).

Каждый материал в модели характеризуется своей теплопроводностью. Формулируя задачу в ELCUT, мы проходим следующие этапы:

- выбирается тип анализа – одна из десяти предложенных систем допущений и приближений, приводящих к тому или иному двумерному дифференциальному уравнению в частных производных;
- во встроенном графическом редакторе рисуется сечение модели, либо импортируется готовый чертеж из CAD-системы;
- задаются физические свойства материалов, источники поля и граничные условия. 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, 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 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:
  - условие известной температуры (условие 1-го рода);
  - известный тепловой поток (условие 2-го рода);
  - конвективный теплообмен с омывающей средой, которая характеризуется известной температурой среды и коэффициентом конвективного теплообмена;
  - 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;
  - 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 РАСЧЕТЕ 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 мм<sup>2</sup> броня имеет сечение 538 мм<sup>2</sup>, а для кабеля с сечением жилы 800 мм<sup>2</sup> площадь поперечного сечения брони составляет 658 мм<sup>2</sup>. 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 рекомендуется проводить с помощью специально разработанной компьютерной программы «ЭКРАН» [5], позволяющей для каждой конкретной кабельной передачи с однофазными кабелями выбрать наиболее рациональный способ соединения и заземления экранов.

Программа «ЭКРАН» (далее ПЭ) для расчета токов и напряжений в экранах однофазных силовых кабелей на напряжение 6–500 кВ зарегистрирована в Федеральном государственном учреждении «Федеральный институт промышленной собственности» (г. Москва). Вычисления производятся на основе анализа системы уравнений, составленных по второму закону Кирхгоффа 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, пр.), способ прокладки – в ряд или треугольником, условия прокладки – в земле (удельное сопротивление грунта) или на воздухе, параметры питающей сети. Однако ПЭ позволяет вычислять токи только в однородных медных или алюминиевых экранах.

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

- 1) в соответствии с данными табл. 2 определить общее сечение брони;
- 2) определить удельное сопротивление сечения медного экрана  $\rho_{sCu}$  («весовой» омический коэффициент) как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление меди;
- 3) определить «весовой» омический коэффициент сечения брони из алюминиевого сплава  $\rho_{sБр}$  как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление сплава;
- 4) определить «весовой» омический коэффициент комбинированного экрана «медь–броня»:

$$\rho_{sCu-Бр} = (\rho_{sБр} \times \rho_{sCu}) / (\rho_{sБр} + \rho_{sCu}); \quad (2)$$

- 5) определить сечение эквивалентного медного экрана, разделив  $\rho_{sCu-Бр}$  на величину удельного сопротивления меди.

Например, для кабеля с жилой сечением 185 мм<sup>2</sup> и экраном сечением 150 мм<sup>2</sup>, при сечении брони 538 мм<sup>2</sup>, сечение эквивалентного медного экрана составит 130 мм<sup>2</sup>.

### ИСТОЧНИКИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ

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 жилы, 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 жилы, 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 (сечение или его часть) и данные о тепловых характеристиках материалов (рис. 1, табл. 1) 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 (обычно для прокладки в грунте – 15 °С). В соответствии с техническими условиями глубина прокладки кабельной цепи составляет 1,5 м, следовательно, граница расчетной области располагается (рис. 4) на расстоянии примерно 0,6 м от кабельной цепи. При условии, что максимальный из рассматриваемых диаметр фазы (сечение 800 мм<sup>2</sup>) составляет примерно 96 мм, выбранное расстояние до границы расчетной области подпадает под критериальную оценку «много больше» по сравнению со средним размером кабельной цепи.

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  $F_n$  – нормальная составляющая вектора плотности теплового потока;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_0$  – температура окружающей среды.

При прокладке трехфазной системы на воздухе на поверхности (следе в плоскости) каждой фазы ставилось граничное условие конвекции и условие заданного теплового потока (указывается в технических условиях на кабель как интенсивность солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>). При наличии ветра коэффициент теплообмена (теплоотдачи)  $\alpha$  будет разным (зависит от скорости ветра) с подветренной и противоположной стороны следа поверхности (окружности – границы

Таблица 1

Физическая величина	Значение	Единица изм.
Теплопроводность меди	386	Вт/К·м
Теплопроводность алюминия	220	Вт/К·м
Теплопроводность изоляции	Нелинейная, см. рис. 1	Вт/К·м
Теплопроводность брони	237	Вт/К·м
Теплопроводность грунта	0,833	Вт/К·м
Температура грунта	15	°С
Теплопроводность водоблокирующего слоя	0,15	Вт/К·м
Теплопроводность полупроводящего экрана	0,3	Вт/К·м
э/п лента Megatape	0,3	Вт/К·м
э/п бумага Terkab	0,2	Вт/К·м
ПЭТФЛ	0,12	Вт/К·м
Теплопроводность пластмассовой оболочки	0,25	Вт/К·м

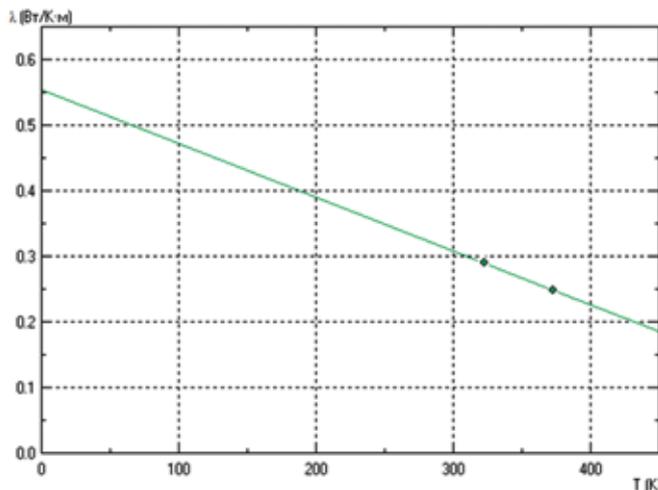


Рис. 1. Зависимость теплопроводности полиэтилена от температуры

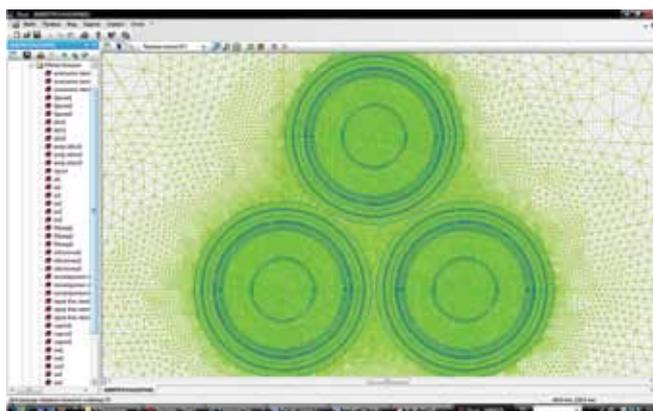


Рис. 2. Прокладка треугольником встыв

круга) каждой фазы (то есть на половине окружности – в первом приближении – одно значение, на противоположной половине – другое). Каждая половина окружности – это ребро модели. Таким образом, значение  $\alpha$  (при определенных условиях и  $T_0$ ) могут меняться от ребра к ребру. ELCUT позволяет учитывать принудительную конвекцию и разницу

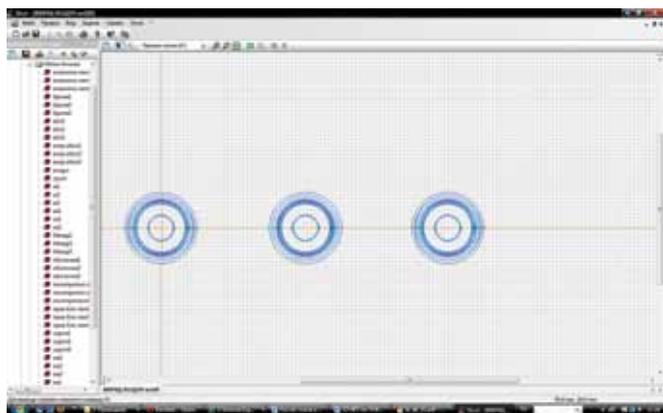


Рис. 3. Прокладка в горизонтальной плоскости

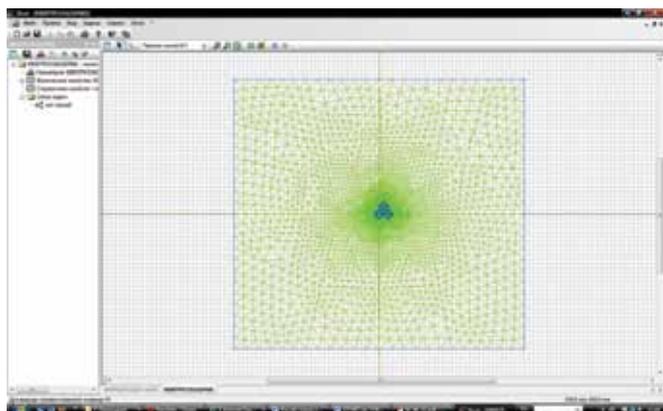


Рис. 4. Общий вид расчетной модели при прокладке кабеля в грунте треугольником

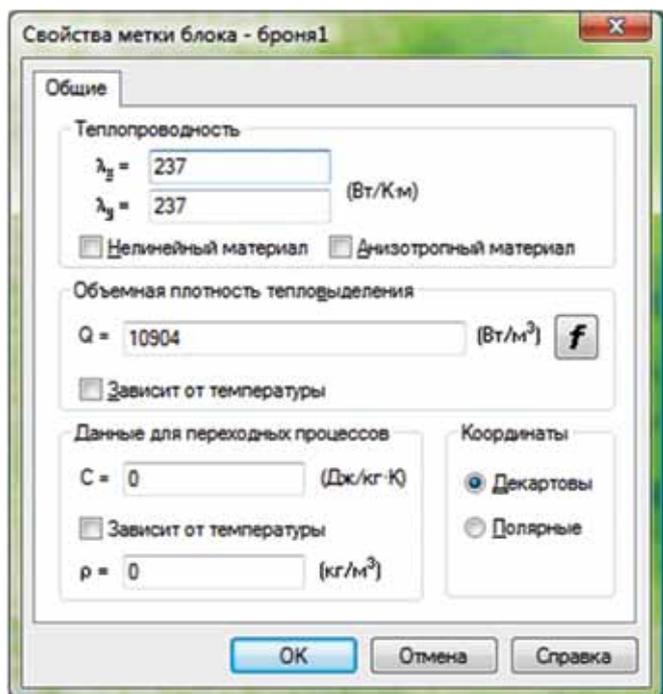


Рис. 5. Активное окно ELCUT при введении свойств блока модели «броня1»

между горизонтальной и вертикальной прокладкой. Вопрос о численном значении  $\alpha$  – отдельная задача для каждого конкретного случая.

После введения свойств всех блоков и ребер модели (рис. 5), 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.

В том случае, когда задача является симметричной не только по геометрии, но и по граничным условиям для ребер – границ расчетных областей, можно в качестве модели фазы использовать сегмент.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Сечение эквивалентного экрана рассчитывалось для конструкций брони согласно табл. 2.

Таблица 2

Сечение жилы/экрана, мм <sup>2</sup>	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

В табл. 3, 4, 5 и 6 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.

Таблица 3

Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Ток при прокладке на воздухе, кабели расположены треугольником, расстояние между кабелями в свету 250 мм, экраны кабелей соединены и заземлены с двух сторон, А, не более	
	кабель с медной жилой	кабель с алюминиевой жилой
185	570/610*	459/491
240	612/698	498/568
300	639/773	526/637
350	648/830	551/689
400	668/883	577/739
500	715/974	613/827
630	746/1066	647/919
800	805/1185	700/1029

\* обычным шрифтом набраны расчетные значения без учета тепловыделений в броне

Таблица 4

Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>	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	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

\* обычным шрифтом набраны расчетные значения без учета тепловыделений в броне

Таблица 5

Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Ток при прокладке на воздухе, 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	556/597*	450/482
240	596/680	487/555
300	617/747	511/618
350	644/802	534/668
400	661/846	557/713
500	686/926	587/792
630	702/997	613/870
800	731/1074	649/954

\* обычным шрифтом набраны расчетные значения без учета тепловыделений в броне

Таблица 6

Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>	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	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

\* обычным шрифтом набраны расчетные значения без учета тепловыделений в броне

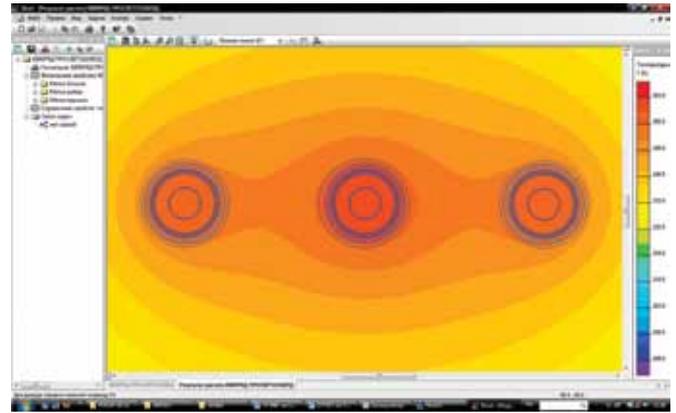


Рис. 6. Цветовая диаграмма теплового поля в сечении кабельной системы сечением 800 мм<sup>2</sup>, с медным экраном сечением 210 мм<sup>2</sup>, сечение брони – 681,45 мм<sup>2</sup>, при прокладке в грунте в ряд с просветом, равным диаметру кабеля, броня и экран заземлены с двух сторон

На рис.6 представлена цветовая диаграмма теплового поля в сечении кабельной системы 110 кВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод расчета допустимых токов кабелей в трехфазной системе при однофазной прокладке, с учетом тепловыделения в проволочной броне из алюминиевого сплава. Предложен инструмент для решения задач анализа нагрузочной способности кабельных цепей, позволяющий модернизировать и унифицировать процедуру вычислений, оперируя геометрией расчетной области, тепловыми характеристиками материалов и сред, начальными и граничными условиями. Это, среди прочих преимуществ, позволяет естественным образом учитывать изменения в конструкции как самих кабелей, так и кабельных систем (цепей) и корректировать нагрузочную способность. При этом предлагается использовать в качестве начальных приближений для численного решения задачи расчета температурного поля результаты вычислений в соответствии со стандартом МЭК 60287. Алгоритм расчета токов в экране путем введения эквивалентного комбинированного экрана позволяет учесть с использованием программы «Экран» влияние брони. Для повышения пропускной способности при наличии брони необходимо применять транспозицию медного экрана вместе с броней, либо использовать для бронирования кабеля синтетические волокна.

## Литература

1. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – М. 1996.
2. Кабели, провода и шнуры: Справочник. – М.: Изд-во ВНИИ КП, 2002.
3. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1–2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки». Часть 1-1.
4. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // Кабель – news. – 2009. – № 10. – С. 47–51.
5. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. – СПб. 2008.
6. Грешняков Г.В., Нарышкин Е.В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный кабель // Силовая электроника. – 2009. – № 4. – С. 42–46.
7. Дубицкий С.Д. Elcut 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. – 2004. – № 1.