

Моделирование в программе FEMM. Часть 3. Измерение теплового режима трансформатора.

Валентин Володин

Надежность работы любого узла электронного устройства определяется его тепловым режимом. Поэтому измерение теплового режима является обязательным условием испытания любого электронного аппарата. Зачастую пути распространения тепла сосредоточены и заранее исследованы производителем электронных компонентов, а их тепловые сопротивления приводятся в справочных данных. Например, для транзисторов и диодов указывается тепловое сопротивление участков кристалл-корпус (Junction-to-Case), корпус-охладитель (Case-to-Sink) и кристалл-окружающая среда (Junction-to-Ambient). Для стандартных охладителей также указываются тепловые сопротивления при различных условиях охлаждения.

Однако, не менее часто разработчики сталкиваются с ситуацией, когда тепловой режим может быть определен только с помощью натуральных испытаний. Например, расчет теплового режима силового трансформатора практически невозможен из-за сложной картины генерации, распространения и рассеяния тепла в окружающем пространстве. В результате поиск приемлемой конструкции может превратиться в череду испытаний экспериментальных образцов. Что связано с большими затратами средств и времени. В этом случае успех во многом зависит от опыта разработчика. Однако, даже опыта маститого разработчика может оказаться недостаточно, если проект делается для необычных условий эксплуатации. И вот в этом случае весьма полезным может оказаться возможность моделирования теплового режима таких сложных конструкций как трансформатор. С этой задачей поможет справиться прекрасная программа FEMM (Finite Element Method Magnetics). Программа является бесплатной и ее можно свободно скачать по ссылке: <http://www.femm.info/wiki/Download>. На самом деле FEMM является пакетом программ, предназначенных для расчета полей методом конечных элементов. В настоящее время FEMM может использоваться для расчета магнитных, электростатических, а также тепловых полей двумерных и осесимметричных объектов. К сожалению, далеко не все задачи можно свести к осесимметричному случаю и поэтому, в основном, приходится использовать двумерные возможности FEMM. Однако, это не так плохо, как может показаться с первого раза.

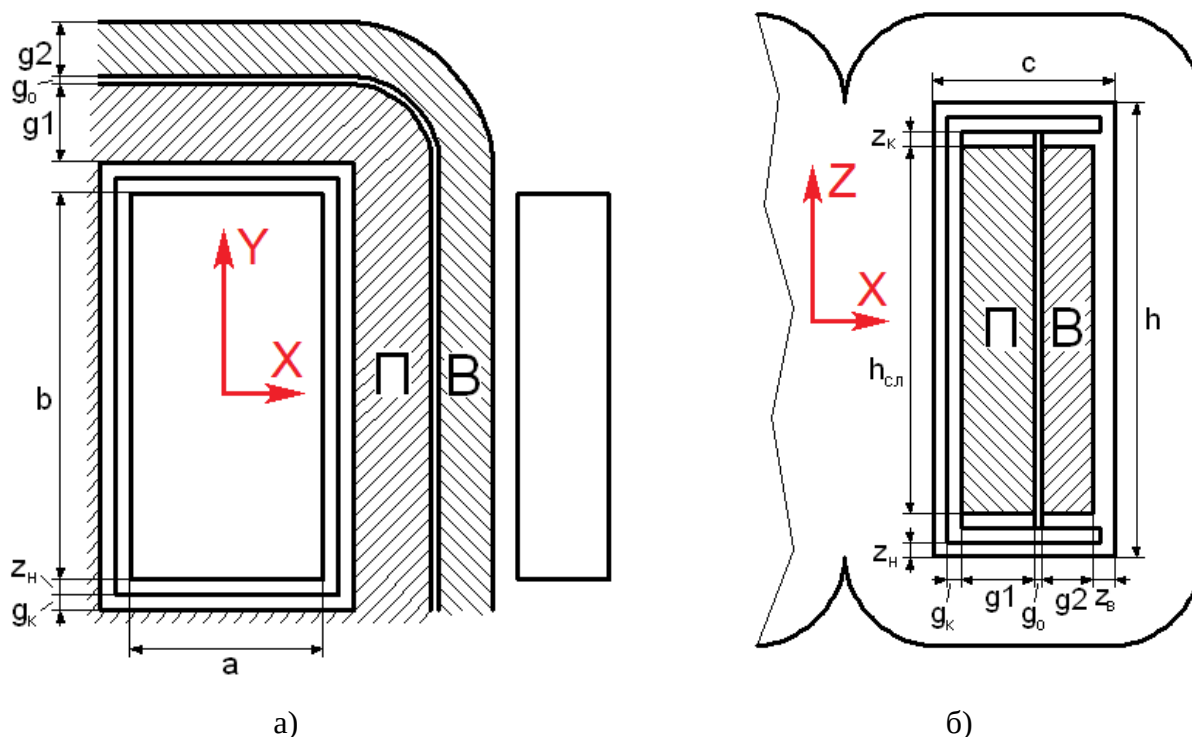


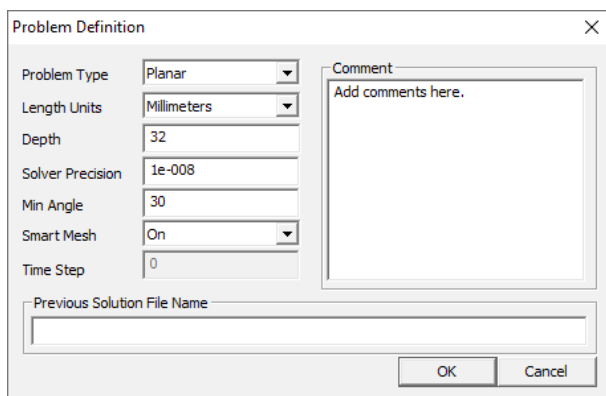
Рис. 1. Разрезы трансформатора: а) - перпендикулярно плоскости сердечника; б) - параллельно плоскости сердечника.

Рассмотрим на реальном примере исследование трехмерного объекта средствами FEMM. Например, определим тепловой режим силового трансформатора, выполненного на ленточном Ш-образном сердечнике ШЛ32х32 из стали 3414 толщиной 0.35 мм. Трансформатор рассчитан для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц. На рис.1 изображены разрезы силового трансформатора с обозначенными размерами. Наименования и величины размеров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Наименования и величины размеров на рис.1.

Размер	Описание	Величина, мм
a	Ширина сердечника	32
b	Толщина сердечника	32
c	Ширина окна сердечника	32
g1	Толщина первичной обмотки	11.3
g2	Толщина вторичной обмотки	11.8
g _к	Толщина стенок каркаса	1.5
g _о	Толщина межобмоточной изоляции	0.24
h	Высота окна сердечника	80
h _{сл}	Высота обмотки	68
z _в	Зазор между внешней стороной обмотки и сердечником	6.7
z _к	Зазор между краем обмотки и каркасом	4
z _н	Зазор между сердечником и каркасом	0.5

Обычно, при исследовании трансформатора, ставится задача определения наиболее напряженных в тепловом отношении элементов его конструкции. Внимательно рассмотрим предмет нашего исследования. Потери проводимости в обмотках трансформатора, а также потери перемагничивания сердечника являются источниками тепла в трансформаторе. Образующиеся при этом тепловые потоки движутся к поверхности трансформатора и далее рассеиваются в окружающем пространстве. Стальной сердечник трансформатора обладает низким тепловым сопротивлением. Поэтому его температура практически одинаковая на всех участках. Тепловой поток, идущий из участка сердечника покрытого обмоткой, легко перетекает во внешние участки сердечника и там рассеивается в пространстве. В отличие от сердечника, обмотка имеет относительно высокое тепловое сопротивление. Поэтому температуры различных областей обмотки сильно отличаются. Кроме этого, текущие в различных направлениях тепловые потоки преодолевают участки, имеющие различные тепловые сопротивления. Например, в направлении X (рис.1), тепловой поток обмотки частично протекает через тепловое сопротивление обмотки, тепловое сопротивление воздушного зазора между обмоткой и сердечником, и далее, через тепловое сопротивление сердечник-пространство, рассеивается в окружающем пространстве. В направлении Y (рис.1), тепловой поток обмотки частично протекает через тепловое сопротивление обмотки и далее рассеивается в окружающем пространстве через тепловое сопротивление обмотка-пространство. Вдоль оси Z (рис.1), тепловой поток испытывает гораздо большее тепловое сопротивление. Это происходит по нескольким причинам. Во-первых, в направлениях X и Y протяженность обмотки меньше, чем в направлении Z. Во-вторых, в направлении Z, тепловой поток вынужден дополнительно протекать через стенки каркаса, имеющие высокое тепловое сопротивление. На практике, согласно перечисленных соображений, считается, что тепловой поток вдоль оси Z отсутствует [1]. Это



позволяет свести исследование к двумерной планарной задаче. Однако, чтобы учесть особенности конструкции трансформатора, исследование придется проводить в два этапа. На первом этапе моделируются тепловые поля в плоскости X-Z и на втором в плоскости X-Y. Это связано с тем, что на первом этапе определяется тепловой режим сердечника, а на втором этапе тепловой режим обмотки. Как говорилось выше, в некоторых случаях FEMM позволяет моделировать поля трехмерных объектов за один раз. Это справедливо, например, для бронированного трансформатора с чашечным сердечником.

← Рис. 2. Меню формулировки задачи

1. Создание модели трансформатора в плоскости X-Z

Рассмотрим алгоритм создания модели для первого этапа. Во многом аналогичным образом модель создается и для следующего этапа.

1.1. Запускаем программу FEMM, щелкнув дважды по соответствующей иконке на рабочем столе.
 1.2. Активируем пункт меню File → New (Ctrl-N) и в возникшем окне **Create a new problem** выбираем **Heat Flow Problem** (проблема тепловых потоков) и давим ОК.

1.3. Щелкнув по пункту меню **Problem** вызываем окно **Problem Definition** (Формулировка задачи), изображенное на рис. 2.

Устанавливаем:

- **Problem Type** - Planar (Плоскопараллельная задача);
- **Length Units** — Millimeters;
- **Depth** - 32 (толщина сердечника в миллиметрах).


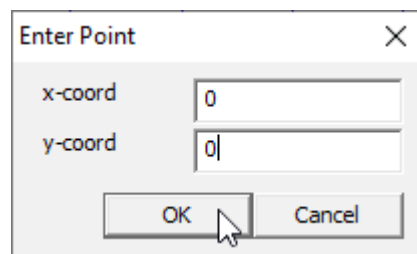
1.4. Броневой трансформатор, в исследуемой плоскости, обладает симметрией. Поэтому достаточно моделировать только одну из его симметричных половинок. Например, выберем правую половинку и введем координаты узловых точек блоков. В программе FEMM блоками называются области, заполненные определенным материалом. Для ввода точек активируем кнопку **Operate on Nodes** . Координаты точек модели указаны в таблице 2.

Таблица 2. Координаты узловых точек модели

X	16	48	16	48	16	0	0	16	48	48	64	64	16.5	16.5	41.1	41.1	18	18	41.1	41.1	41.1	41.1
Y	16	16	96	96	0	16	96	112	112	0	16	96	16.5	95.5	95.5	90	90	22	22	16.5	16	96

Рис. 3. Окно Enter Point (Ввод точек) →

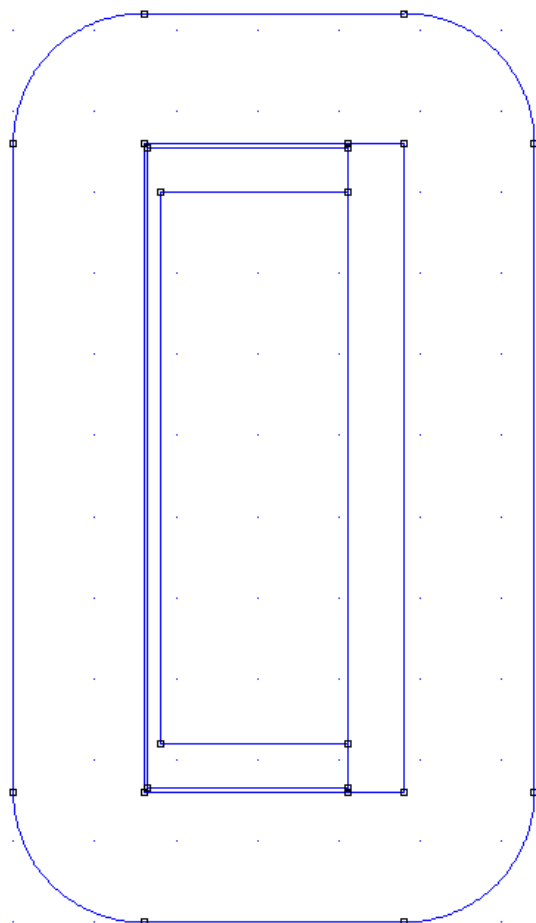


Окно ввода точек (рис.3) вызывается при помощи клавиши табуляции.

1.5. Чтобы соединить введенные точки между собой, активируем кнопку

Operate on segments .

Соединив введенные точки так, как показано на рис. 4, создадим четыре блока, заполненных материалами с различной теплопроводностью.

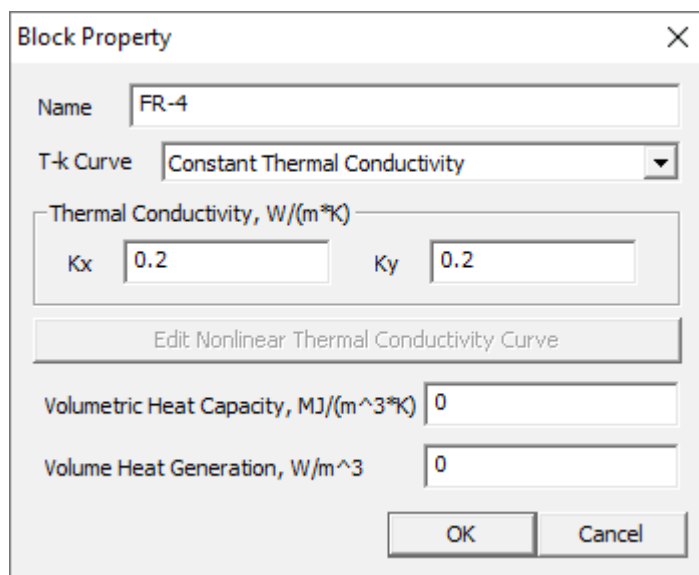


← Рис. 4. Итоговый вид модели

2. Определение свойств материалов

2.1. Для определения материалов активируем пункт меню Properties -> Materials, вызывающий окно **Property Definition** (Определение свойств). В этом окне давим кнопку **Add Property** (Добавить свойство), чтобы вызвать окно **Block Property** (Свойство блока).

На рис. 5. изображен пример заполнения полей для текстолита типа FR-4, используемого для изготовления каркаса катушки.



↑ Рис. 5. Определение свойств материала каркаса

В строке **T-k Curve** можно выбрать два режима задания теплопроводности:

- **Constant Thermal Conductivity** - постоянная теплопроводность, не зависящая от температуры;
- **Thermal Conductivity Depends on Temperature** — теплопроводность, имеющая зависимость от температуры.



В свойствах материалов учитывается кондуктивный механизм передачи тепла (теплопроводность), но не учитываются механизмы передачи тепла путем конвекции (теплоотдачи) и излучения. Последние два механизма передачи тепла можно задать для граничных условий.

Если теплопроводность не зависит, либо слабо зависит от температуры, выбирается режим **Constant Thermal Conductivity** (Постоянная теплопроводность). Для этого режима, в рамке **Thermal Conductivity** (Теплопроводность) имеется возможность определить различную теплопроводность материала K_x (в направлении оси X) и K_y (в направлении оси Y).

Если теплопроводность имеет существенную зависимость от температуры, выбирается режим **Thermal Conductivity Depends on Temperature** (Теплопроводность зависит от температуры). В этом случае можно определить зависимость теплопроводности от температуры в виде таблицы.

Величина теплоемкости материала вводится в строке **Volumetric Heat Capacity** (Объемная теплоемкость). Если требуется определить установившийся режим, то теплоемкость приравнивается к нулю.

В определенных блоках трансформатора, таких как сердечник или обмотка, происходит выделение тепла. Для этих блоков необходимо указать величину тепловыделения в строке **Volume Heat Generation** (Объемное тепловыделение). Если тепловыделения отсутствуют, как в случае блока, заполненного текстолитом FR-4, это значение приравнивается к нулю.

2.2. Определение свойств воздуха для кондуктивного механизма передачи тепла

На рис. 6. изображен пример заполнения полей для материала Air (Воздух).

Рис. 6. Определение свойств воздуха

В отличие от твердых тел, в газах и жидкостях существует не только кондуктивный, но и конвективный механизм передачи тепла.

Однако, существуют условия, когда конвективная теплопередача выключается. Это может произойти в случае, если нагретая поверхность расположена сверху. Или, если конвективные потоки вынуждены протекать в очень узком зазоре. В указанных случаях остается только кондуктивный механизм передачи тепла.

Будем считать, что в зазоре между сердечником и каркасом $z_n = 0.5$ мм, ввиду его незначительной величины, конвективный механизм передачи тепла практически отсутствует. Это допущение позволит задать свойства для воздуха так же как для твердого тела.

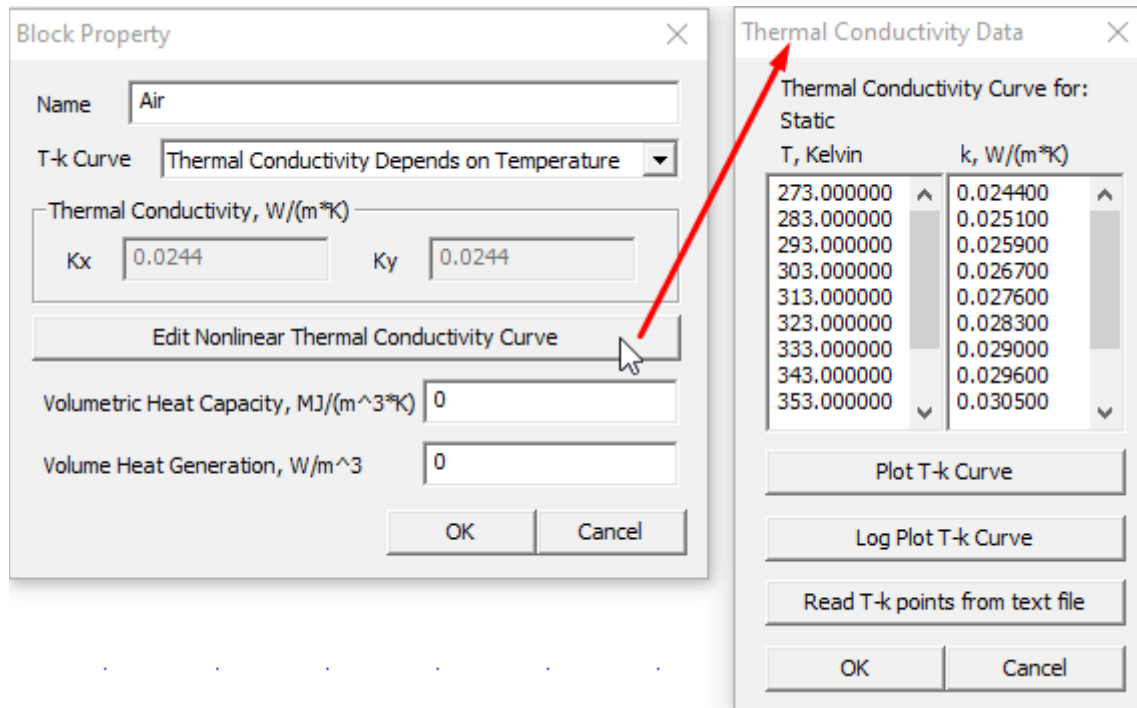
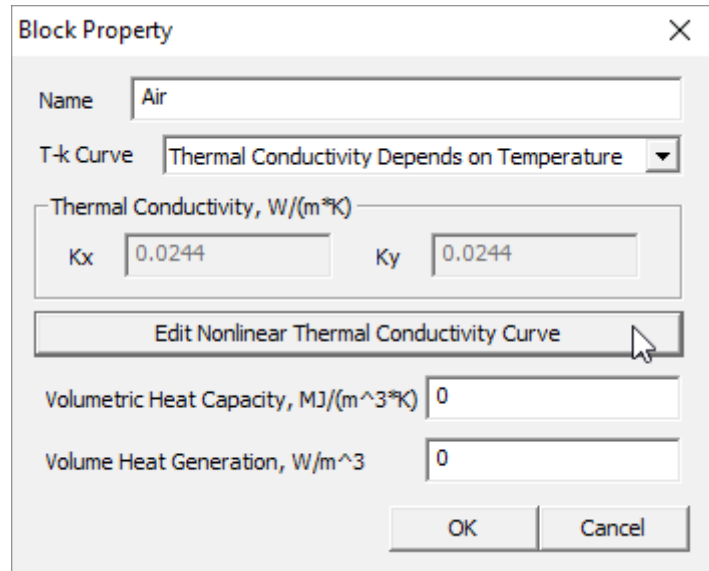


Рис. 7. Вызов таблицы **Thermal Conductivity Data** (Данные по теплопроводности)

Теплопроводность воздуха зависит от температуры и поэтому зададим её в виде таблицы. Для создания новой таблицы или редактирования созданной необходимо нажать кнопку **Edit Nonlinear Thermal Conductivity Curve** (Редактировать кривую нелинейной теплопроводности), как это показано на рис. 7.

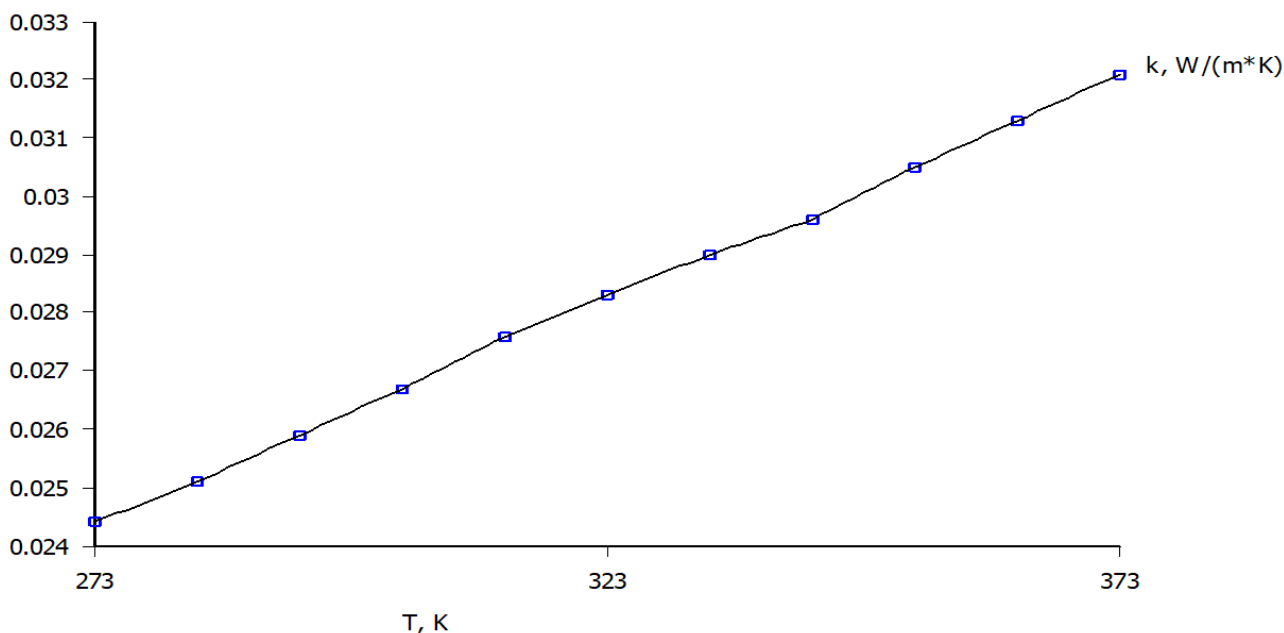


Рис. 8. Вывод графика температурной зависимости теплопроводности



При задании табличной зависимости теплопроводности от температуры, становится невозможным задание различной теплопроводности в направлении осей X и Y. В этом случае считается, что материал изотропный и обладает одинаковой теплопроводностью во всех направлениях.

График зависимости теплопроводности от температуры можно вывести, нажав на кнопку **Plot T-k Curve** (Построить кривую T-k), так как это показано на рис. 8.

Нажав на кнопку **Log Plot T-k Curve**, можно построить аналогичный график, но с температурой в логарифмическом масштабе.

При необходимости, нажав на кнопку **Read T-k points from text file** (Чтение точек из текстового файла), можно заполнить таблицу данными из заранее подготовленного текстового файла.

2.3. Определение свойств воздуха для конвективного механизма передачи тепла

Согласно данным табл.1, между обмоткой трансформатора и сердечником имеется значительный зазор. Благодаря этому зазору, образуется ограниченное пространство шириной $z_B = 6.7$ мм, высотой $h = 80$ мм и глубиной $b = 32$ мм. В этом пространстве, наряду с кондуктивным, происходит конвективный теплообмен. Температура внешней поверхности обмотки $t_1 \approx 90$ °С, а внутренней поверхности сердечника $t_2 \approx 70$ °С. Эти температуры определены ориентировочно при конструктивном расчете трансформатора и в процессе моделирования потребуют уточнения. Если попытаться задать конвективный теплообмен с помощью граничных условий, то придется дополнительно указать температуру самого воздуха в зазоре. Необходимость указания дополнительного параметра усложнит моделирование. Чтобы избежать этой проблемы, зададим конвективно-кондуктивный теплообмен при помощи эквивалентной теплопроводности.

Для определения коэффициента конвективно-кондуктивной теплопередачи, используем методику [2]. Для начала, рассчитаем усредненный размер:

$$l = \sqrt{h \cdot b} = \sqrt{80 \cdot 32} = 50.6 \text{ мм}$$

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha = N \left[6.25 - 5.25 \left(1 + \frac{z_B}{l} \right)^{-1.67} \right] \times A \sqrt[4]{\frac{t_1 - t_2}{z_B}} =$$

$$= 1 \cdot \left[6.25 - 5.25 \left(1 + \frac{0.0067}{0.0506} \right)^{-1.67} \right] \times 0.57 \sqrt[4]{\frac{90 - 70}{0.0067}} = 8.36 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

где:

N - коэффициент, учитывающий ориентацию нагретой поверхности. Для вертикальной поверхности $N=1$, а для горизонтальной $N=1.3$;

A - коэффициент, учитывающий тип среды и её температуру. Значения этого коэффициента для воздуха приведены в табл.3.

Эквивалентную теплопроводность ограниченного пространства можно рассчитать по формуле:

$$K = \alpha \cdot z_B = 8.36 \cdot 0.0067 = 0.056 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

Таблица 3. Значения коэффициента А для воздуха.

Температура, °С	0	50	100	200
Коэффициент А	0.63	0.58	0.56	0.44

На рис. 9. изображен пример заполнения полей для соответствующего материала Air_cc.

Рис. 9. Определение свойств воздуха для конвективно-кондуктивной теплопередачи →

2.4. На рис. 10. изображен пример заполнения полей материала Steel3414 (электротехническая сталь). В отличие от ранее определенных материалов, сердечник трансформатора является источником тепла. Ранее говорилось, что трансформатор выполнен из электротехнической стали 3414, толщиной 0.35 мм и предназначен для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц. Пусть максимальная индукция в сердечнике достигает 1.5 Тл. Согласно справочных данных [3], удельные потери в этом случае составляют $P_{1.5/50} = 1.1$ Вт/кг. Плотность стали 3414 составляет $\rho_s = 7650$ кг/м³. Следовательно, объемное тепловыделение в сердечнике трансформатора составит:

$$P_V = P_{1.5/50} \cdot \rho_s = 1.1 \cdot 7650 = 8415 \text{ Вт/м}^3$$

Рис. 10. Параметры материала Steel3414 (электротехническая сталь) →

2.5. На рис. 11. изображен пример заполнения полей для материала Winding (обмотка). Коэффициент теплопроводности для пропитанных обмоток находится в диапазоне от 1 до 2 Вт/(м·К) [1]. Выберем для параметра **Thermal Conductivity** среднее значение теплопроводности — 1.5 Вт/(м·К). Так же как и сердечник, обмотка трансформатора является источником тепла. Объемное тепловыделение в обмотке можно рассчитать по следующей формуле:

$$\begin{aligned} P_V &= K_w \cdot \rho_c \cdot J^2 \cdot 10^{12} = \\ &= 0.353 \cdot 0.02243 \times 10^{-6} \cdot 2.5^2 \cdot 10^{12} = \\ &= 49486 \text{ Вт/м}^3 \end{aligned}$$

Где:

$K_w = 0.353$ – коэффициент заполнения обмотки проводом;

$\rho_c = 0.02243$ – удельное сопротивление медного провода для температуры 90 °С, мкОм·м;

$J = 2.5$ – плотность тока в проводе обмотки, А/мм².

Рис. 11. Параметры материала Winding (обмотка) →

Все перечисленные величины были определены в процессе конструктивного расчета трансформатора. При этом предполагалось, что максимальная температура обмотки не превысит 90 °С в случае, если температура окружающей среды составляет 30 °С.

3. Определение типа блоков

Материал, связанный с блоком и заполняющий этот блок, определяет тип блока. Например, если блок заполнен материалом Air, то он имеет тип Air, если заполнен материалом Winding, то имеет тип Winding и т.п..

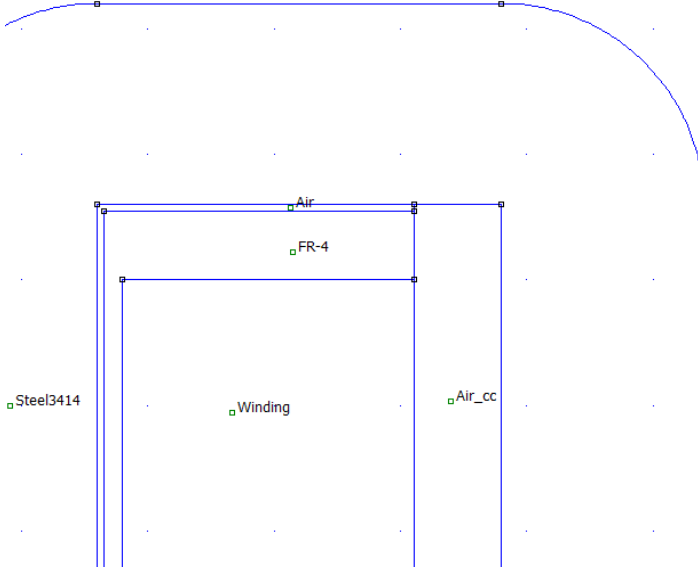
Чтобы определить тип блока, его сначала надо пометить специальной меткой, расположенной внутри границ блока.

Рис. 12. Определение блока типа Winding →

Для включения режима расстановки меток,

активируем кнопку **Operate on block labels** .

После этого необходимо расставить метки, щелкая левой кнопкой мышки. Чтобы присвоить метке тип материала, необходимо щелкнуть по ней правой кнопкой мышки. Выбранная метка

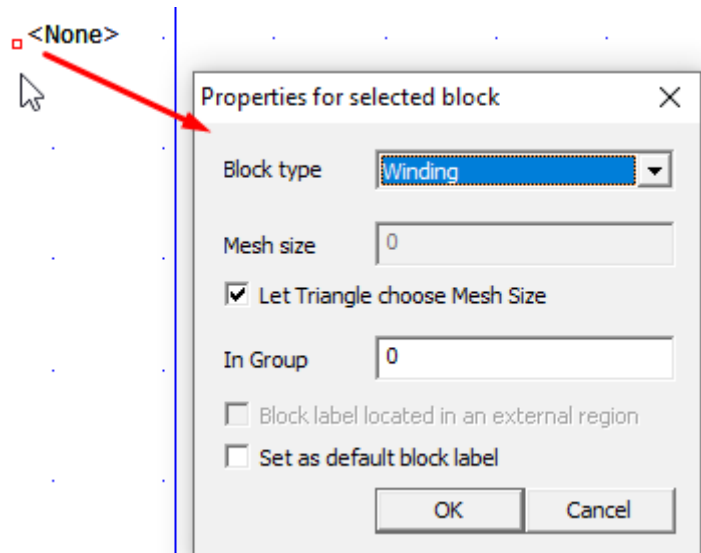


внешних поверхностей. Для этого активируем пункт меню Properties -> Boundary, вызывающий окно **Property Definition**. В этом окне давим кнопку **Add Property**, чтобы вызвать окно **Boundary Property**.

Рис.14. Определение граничного условия out. →

В строке **Name** (Имя) вводится наименование граничного условия. В строке **BC Type** вводится тип граничного условия. Возможны следующие типы граничных условий:

- **Fixed Temperature** (Фиксированная температура) — вдоль границы устанавливается заданное значение температуры;
- **Heat Flux** (Тепловой поток) — задается тепловой поток через границу;
- **Convection** (Конвекция) — задается конвективный теплообмен через границу;
- **Radiation** (Излучение) — задается теплообмен за счет излучения;



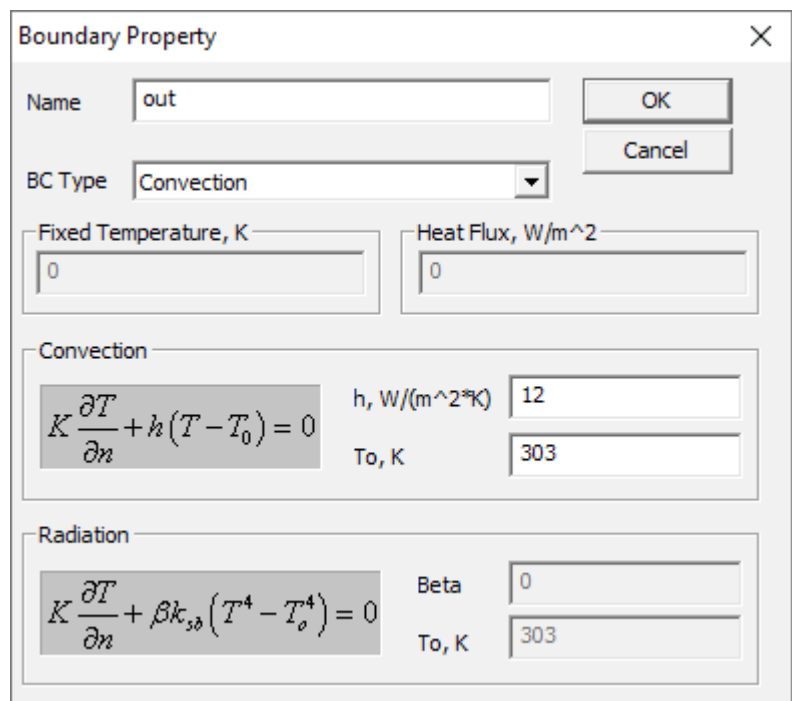
окрашивается в красный цвет. После этого вызываем окно **Properties for selected block** (Свойства выбранного блока), изображенное на рис.12, нажав на клавишу пробела. В строке **Block type** (Тип блока) выбирается название заранее определенного материала.

Вид окна с определенными типами блоков изображен на рис.13.

← Рис. 13. Вид окна с определенными типами блоков

4. Определение граничных условий

Тепло, генерируемое внутри трансформатора, достигает его граничных (внешних) поверхностей и рассеивается в окружающем пространстве за счет конвекции или излучения. Чтобы моделировать этот процесс, необходимо определить граничные условия для всех



- **Periodic** (Периодическое) — это граничное условие соединяет две границы вместе. Т.е., граничные значения в соответствующих точках двух границ устанавливаются равными друг другу;
- **Antiperiodic** (Антипериодическое) — это граничное условие также соединяет две границы вместе. Однако, граничные значения в соответствующих точках двух границ устанавливаются равными друг другу по модулю, но противоположными по знаку.

Если граничное условие не определены явно, то, по умолчанию, устанавливает изолированное условие (отсутствие теплового потока через границу).

Пример заполнения полей для граничного условия out, изображен на рис. 14. Граничное условие соответствующего случаю естественной конвективной теплоотдачи внешних поверхностей трансформатора [1].

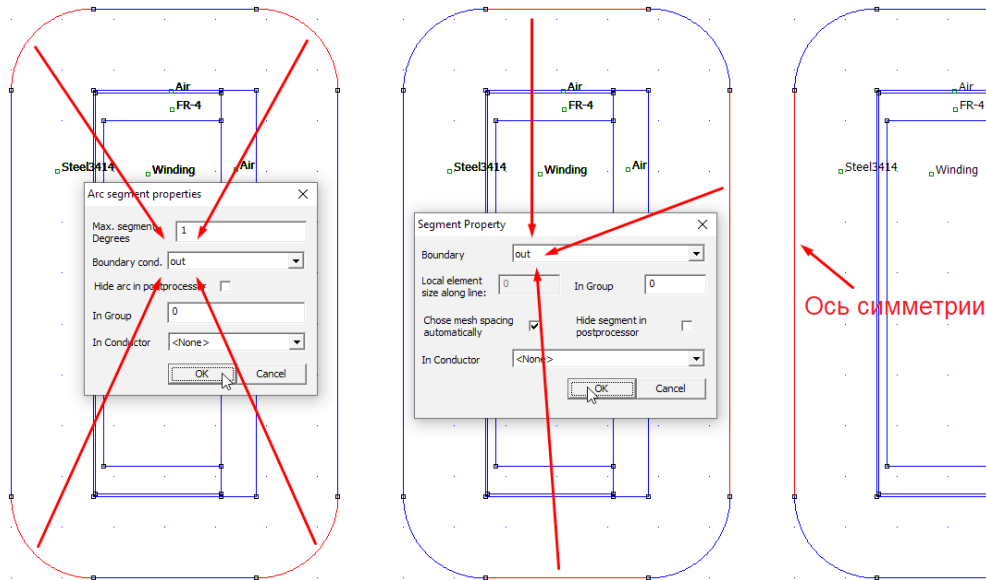





Рис.15. Присвоение граничных условий.


5. Присвоение границам граничных условий.


Для выбора границ, активируем на панели инструментов кнопку **Operate on arc segments**  или **Operate on segments** , в зависимости от типа линии границы. Теперь, чтобы выбрать граничные линии, необходимо последовательно щелкнуть по ним правой кнопкой мышки. Выбранные линии окрашивается в красный цвет. Надавив на клавишу пробела, вызываем окно **Arc segment Property** (Свойства дуги) или **Segment Property** (Свойства сегмента). В строке **Boundary** (Граница) выбирается заранее определенное граничное условие. На рис.15 изображено присвоение граничного условия out.

Для границы, совпадающей с осью симметрии модели, граничное условие не указывается (рис.15).

6. Исследование модели трансформатора в плоскости X-Z

6.1. Перед началом исследования, необходимо разбить модель на конечные элементы. Кнопка **Run mesh generator**  позволяет произвести такое разбиение автоматически.

6.2. Для запуска расчета модели, нажимаем кнопку **Run Analysis** .

6.3. Для отображения результатов, нажимаем кнопку **View result** .

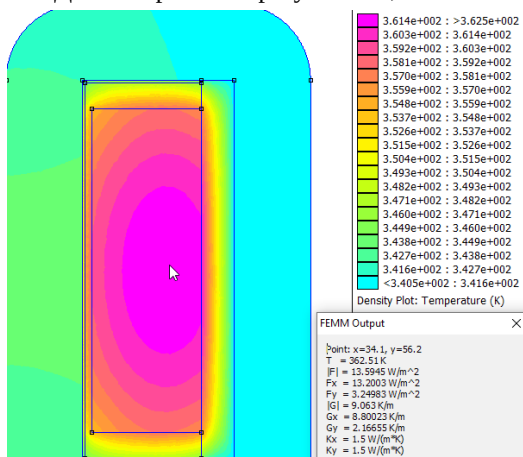


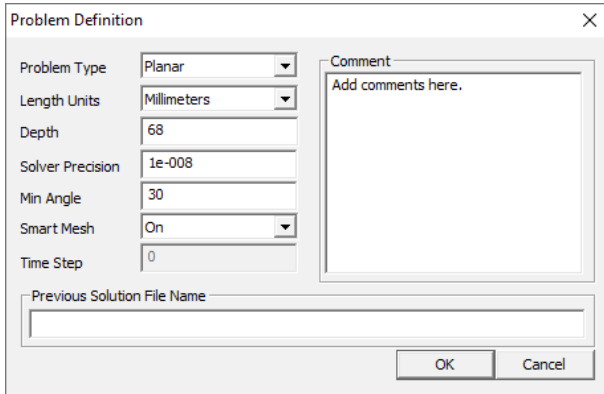
Рис. 16. Результат моделирования трансформатора в плоскости X-Z

Результат моделирования может выглядеть так, как показано на рис. 16. В окне FEMM Output отображаются координаты курсора, а также указана температура в этих координатах, $T = 358.3$ K. В данном случае курсор наведен на наиболее нагретый участок обмотки. Чтобы узнать температуру в любом другом месте модели, достаточно навести на это место курсор и щелкнуть левой кнопкой мышки. Результат измерений появится в окне FEMM Output. Наиболее важные температуры перечислены в табл.4

Таблица 4. Температуры трансформатора в плоскости X-Z

Место измерения	К	°С
Температура окружающей среды	303	30
Максимальная температура обмотки	362.5	89.5
Средняя температура обмотки	360.3	87.3
Темп. сердечника внутри обмотки	344.3	71.3
Темп. внешнего участка сердечника	340.7	67.7

Согласно результатам исследования, максимальная температура обмотки и температура внешнего участка сердечника близки к ожидаемым.



7. Создание модели трансформатора в плоскости X-Y

Тепловая модель в плоскости X-Y позволяет увидеть картину нагрева обмотки трансформатора на участках покрытых и не покрытых сердечником. Процесс создания модели в плоскости X-Y во многом аналогичен ранее рассмотренному.

Рис. 17. Формулировка задачи

После запуска программы FEMM, вызываем и настраиваем окно **Problem Definition** (Формулировка задачи) так, как показано на рис. 17:

- **Problem Type** - Planar (Плоскопараллельная задача);
- **Length Units** — Millimeters;
- **Depth** - 68 (высота обмотки в миллиметрах).

Таблица 5. Координаты узловых точек модели

X	0	0	0	0	0	0	0	16	16	16	16	16	16.5	16.5	18	18	18	41.1	41.1
Y	0	16	16.5	18	41.1	48	64	0	16	41.1	48	64	16.5	0	0	18	41.1	0	18

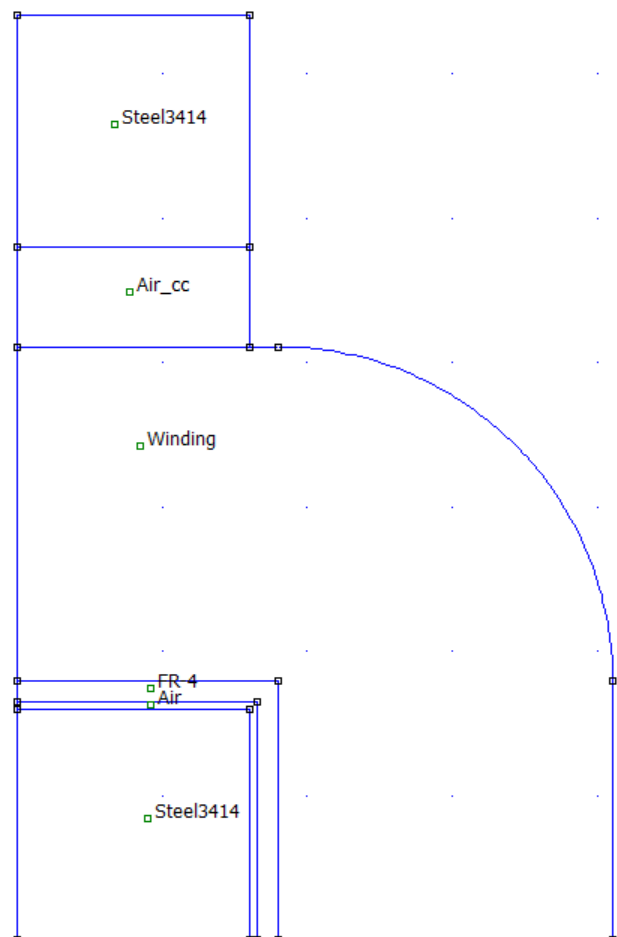
Броневой трансформатор, в исследуемой плоскости, обладает центральной симметрией. Поэтому достаточно моделировать только один из его квадрантов. Координаты точек модели указаны в таблице 5.

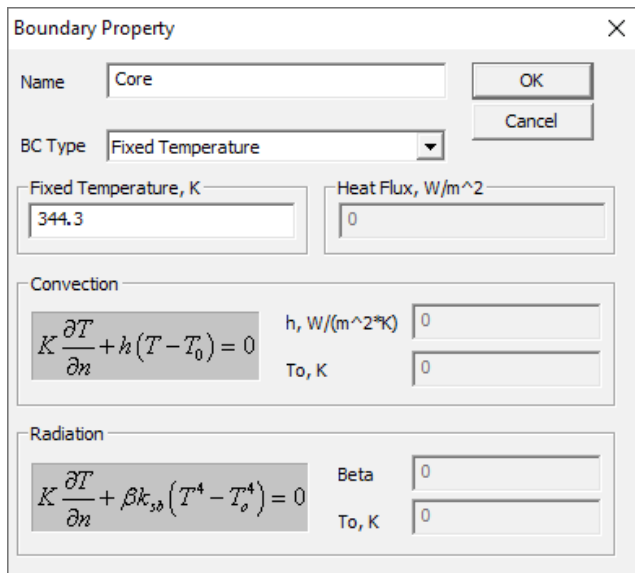
Материалы и граничные условия настраиваются также, как и для предыдущего моделирования.

Соединив узловые точки, создадим шесть блоков и заполним их материалами, как показано на рис.18.

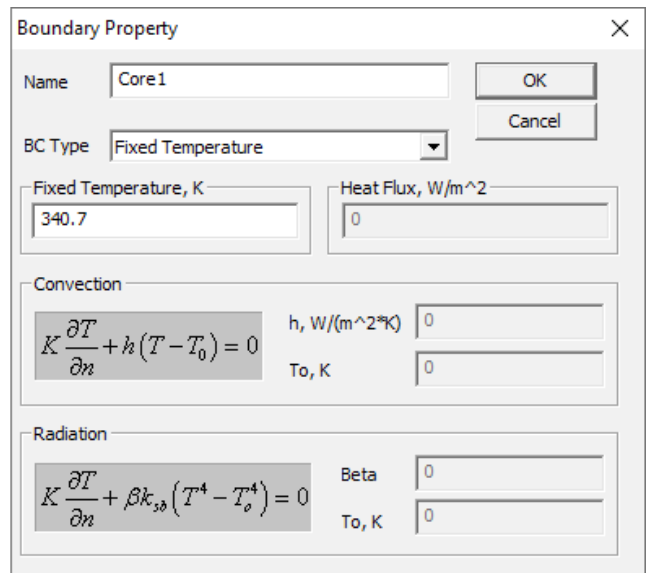
Рис. 18. Итоговый вид модели →

Внимательный читатель сразу заметил, что в этой модели сердечник почему-то получился разбитым на два изолированных фрагмента. Но в реальности сердечник цельный и изображенные на рис.18 фрагменты должны быть связанными перемычками, имеющими высокую теплопроводность! К сожалению, программа FEMM, из-за своей 2-х мерности, не позволяет учесть эту связь. Однако, ситуация не безнадежна. На предыдущем этапе моделирования мы определили температуру внутреннего (окруженного обмоткой) и внешнего фрагментов сердечника трансформатора. Если, каким-то образом, этим фрагментам в текущей модели присвоить значения температур, найденных в предыдущем моделировании, то это решило бы проблему. И такая возможность в FEMM имеется. Для этого, можно использовать специальные граничные условия, которые жестко зафиксируют температурный режим нужных фрагментов. На рис. 19 изображены примеры заполнения полей в окне **Boundary Property** для граничных условий внутреннего (Core) и внешнего (Core1) участков сердечника.





а)



б)

Рис. 19 Заполнения полей в окне **Boundary Property**: а) — для граничного условия Core; б) — для граничного условия Core1.

На рис. 20 изображено присвоение граничных условий.

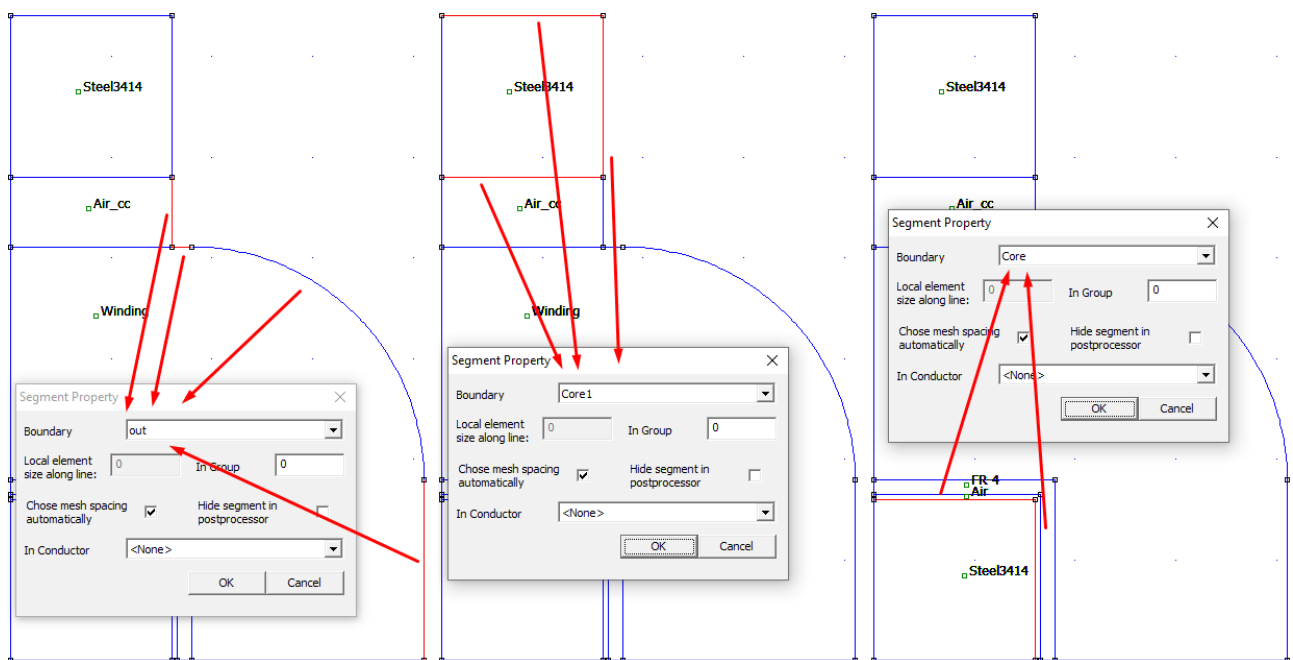




Рис. 20 Присвоение граничных условий.

8. Исследование модели трансформатора в плоскости X-Y

8.1. Перед началом исследования, необходимо разбить модель на конечные элементы. Кнопка **Run mesh**

generator  позволяет произвести такое разбиение автоматически.

8.2. Для запуска расчета модели, нажимаем кнопку **Run Analysis** .

8.3. Для отображения результатов, нажимаем кнопку **View result** .

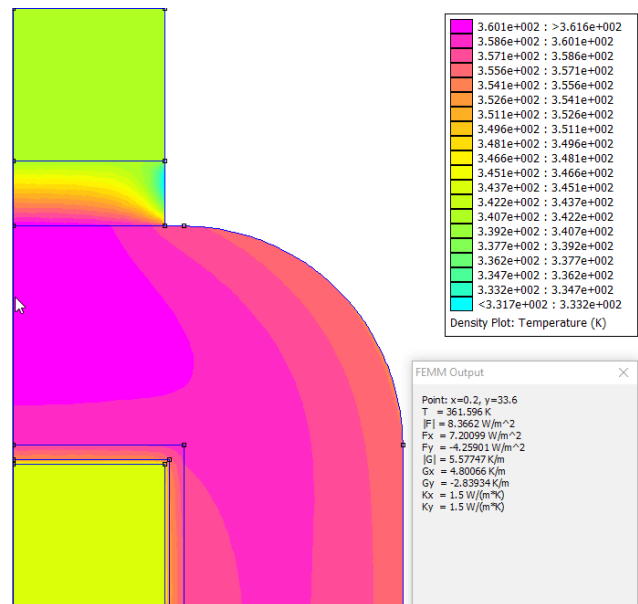
Результат моделирования трансформатора в плоскости X-Y показан на рис. 21. В окне FEMM Output отображаются координаты курсора, а также указана температура в этих координатах, $T = 358.3$ К. В данном случае курсор наведен на наиболее нагретый участок обмотки. Наиболее важные температуры перечислены в табл.6

Рис. 21. Результат моделирования трансформатора в плоскости X-Y

Таблица 6. Температуры трансформатора в плоскости X-Y

Место измерения	К	°С
Температура окружающей среды	303	30
Максимальная температура обмотки	361.6	88.6
Средняя температура обмотки	358.9	85.9

В данном исследовании, по сравнению с предыдущим, получена несколько меньшая температура обмотки. Это различие объясняется тем, что на предыдущем этапе моделировался только фрагмент обмотки покрытый сердечником. При этом не учитывался поток тепла, текущий в сторону фрагмента обмотки, не покрытого сердечником. Соответственно, теперь, когда моделируется вся обмотка и этот поток тепла учитывается, температура обмотки получается меньше.



Литература:

1. А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. Москва: Радио и Связь, 1988 год.
2. Г. Н. Дульнев, Э. М. Семяшкин. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Ленинград: Издательство "ЭНЕРГИЯ", 1968 год.
3. Справочник. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. Г.С. Найвельта. Москва: Радио и Связь, 1985 год.