

Моделирование стержня обмотки, расположенного в прямоугольном пазу и состоящего из транспонированных проводов

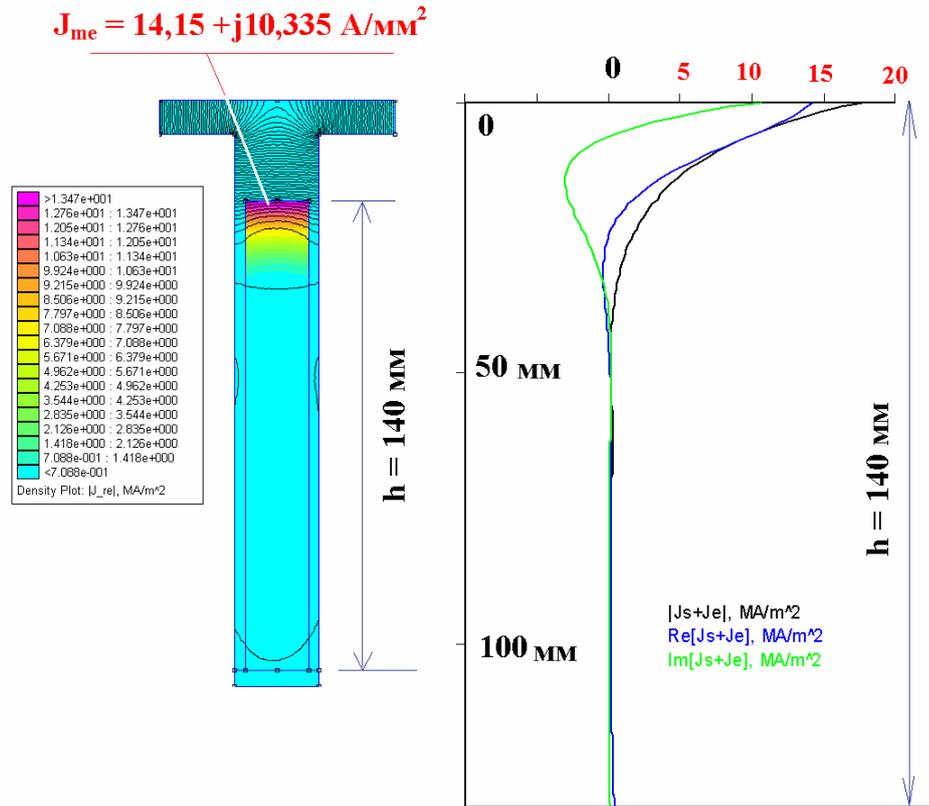
Предварительные замечания

Задача о распределении переменного электромагнитного поля в массивном стержне, размещенном в прямоугольном пазу электрической машины, решена Ф. Эмде в 1908 г. Допущения, принятые при постановке этой задачи и результаты аналитического решения обсуждались на лекциях (см. конспект лекций по курсу «Электромагнитные расчеты»).

Проявление поверхностного эффекта в проводах обмоток, имеющих относительно большую площадь поперечного сечения, приводит к повышению активного сопротивления на переменном токе и, следовательно, к увеличению потерь в проводе. Для улучшения использования материала провода большого сечения (эффективного проводника или, как говорят, стержня обмотки) и снижения потерь его разбивают на несколько соединенных параллельно, но **транспонированных** элементарных проводников. Транспозиция представляет собой такое переплетение элементарных проводников, при котором каждый из них последовательно занимает все возможные положения в пазу, и таким образом, активные и индуктивные сопротивления элементарных проводов оказываются одинаковыми. Это обстоятельство позволяет при расчетах параметров и моделировании считать элементарные проводники включенными последовательно, т.е. обтекаемыми одним током.

Разбиение массивного стержня на ряд элементарных может быть выполнено с большей или меньшей эффективностью. При малом числе элементарных проводов, пусть и транспонированных, может оказаться, что активное сопротивление стержня и потери в нем возрастают, а не уменьшаются. Не так просто найти этому объяснение, анализируя расчетные формулы, конечно-элементная модель в этом смысле значительно более наглядна, особенно если воспользо-

ваться цветной диаграммой распределения плотности тока по сечению стержня.



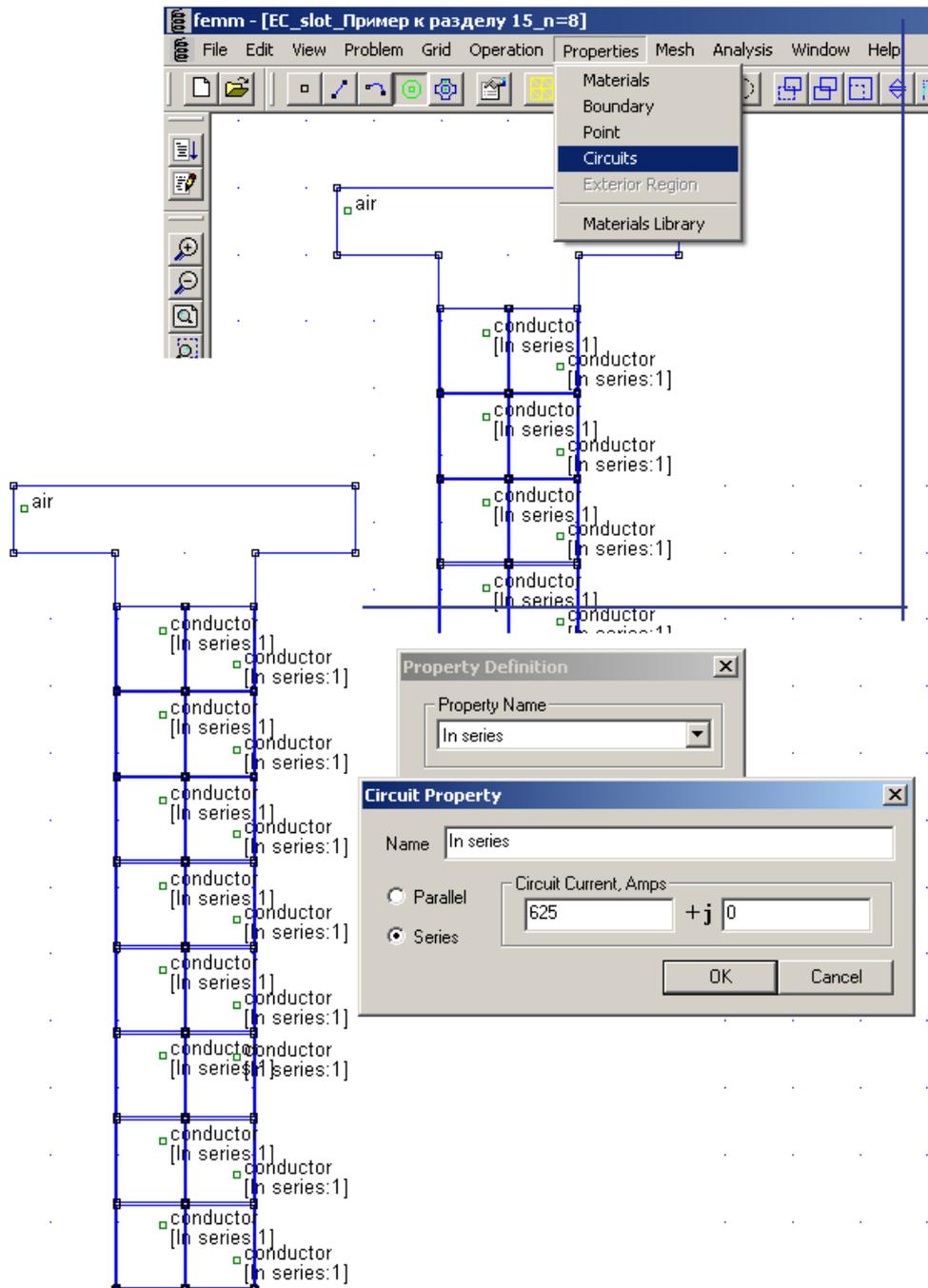
На рисунке показана картина поля пазового рассеяния и диаграмма распределения плотности тока по сечению стержня, справа показан график распределения плотности тока по высоте стержня (результаты моделирования, иллюстрация к примеру расчета, приведенному на лекции).

При моделировании стержня, состоящего из элементарных транспонированных проводов, следует задать дополнительное условие, обеспечивающее протекание в них равных токов. Это условие состоит в том, что элементарные провода объединяются в последовательную цепь.

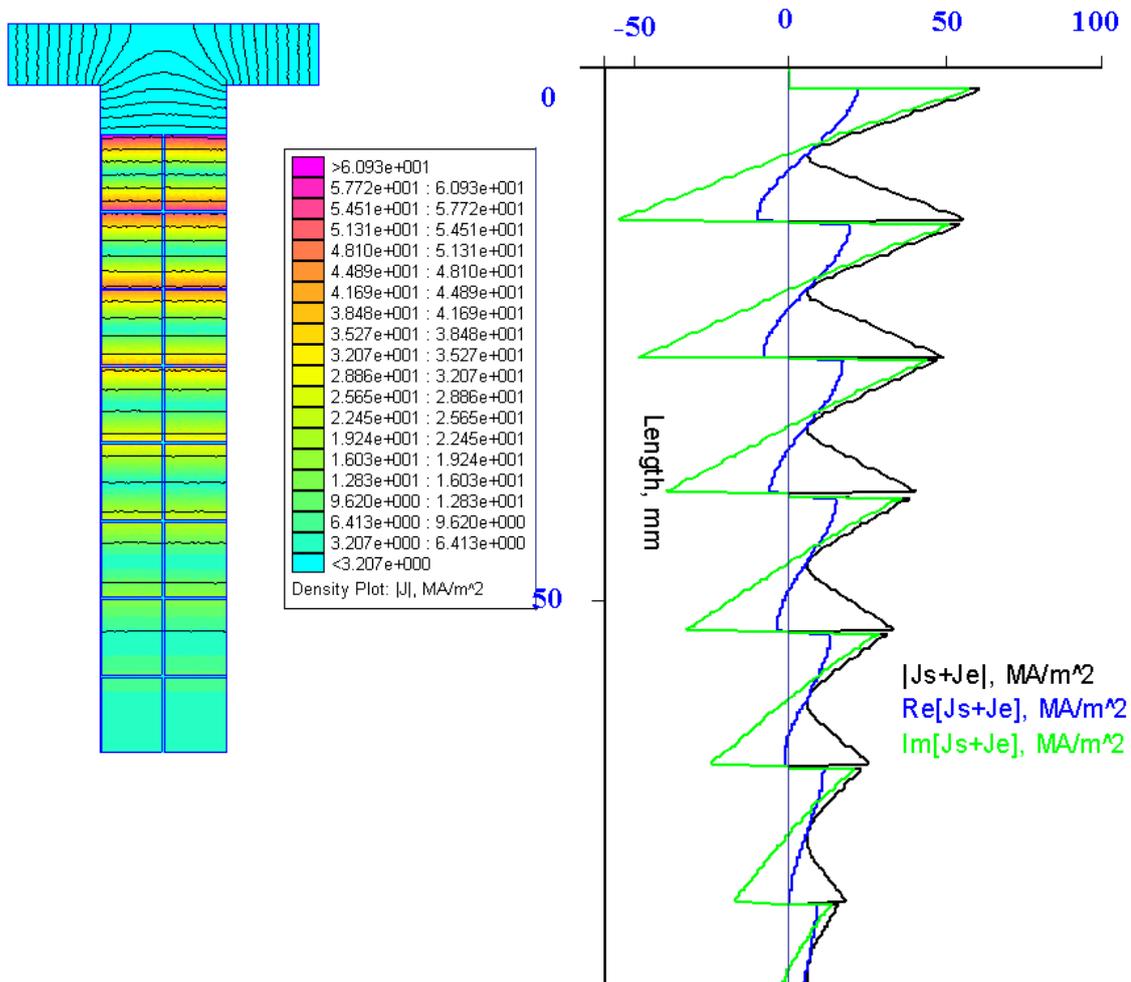
На приведенном ниже рисунке показано, как определить принадлежность элементарных проводов последовательной (*Series*) цепи (*Circuit*), по которой, а следовательно, и по каждому из проводов, протекает ток в 625 А. Суммарный

ток стержня, состоящего из шестнадцати элементарных проводов, равен 3000 А.

При моделировании стержня, состоящего из $2n$ элементарных проводов (n проводов по высоте стержня при двух элементарных проводах по ширине паза) ток в цепи следует задавать равным $I_n/2n$.



На следующем рисунке приведены результаты моделирования: диаграмма распределения плотности тока и график распределения плотности тока по высоте стержня.



Программа работы

1) Ознакомиться с теоретическим материалом по теме работы (см. конспект лекций по курсу «Электромагнитные расчеты»). По исходным данным, приведенным в таблице, рассчитать полные и активные сопротивления стержня переменному току и сопротивление постоянному току, определить коэффициент увеличения активного сопротивления. При расчетах учесть, что общая ширина двух элементарных проводов меньше ширины паза.

2) По исходным данным, построить конечно-элементную модель задачи. По результатам моделирования определить те же величины, что рассчитаны по аналитическим выражениям в п. 1. Сравнить результаты моделирования и расчета и оценить точность моделирования.

3) Сделать выводы и составить отчет о работе.

Исходные данные для расчетов и построения конечно-элементной модели

Материал проводов – медь, рабочая температура – 120°С, число элементарных проводов по ширине паза равно двум.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
f, Гц	50	50	50	50	50	50	60
$b_{п}$, мм	22	26,5	27,7	22	26,5	27,7	27,7
$h_{п}$, мм	185	230	206	185	230	206	206
h, мм	147	186	193	147	186	193	193
$b_{эл.пр.}$, мм	8,00	10,00	12,50	8,00	10,00	12,50	12,50
$\Delta_{из}$, мм	0,27	0,33	0,36	0,27	0,33	0,36	0,36
n	21	27	40	42	54	80	80
I_m, А	5000	6000	7000	5000	6000	7000	7000

В таблице обозначено:

f – частота тока;

$b_{п}$ и $h_{п}$ – ширина и глубина паза;

h – высота стержня;

$b_{эл.пр.}$ – ширина элементарного провода;

$\Delta_{из}$ – двусторонняя толщина изоляции элементарного провода;

n – число элементарных проводов по высоте стержня;

I_m – амплитудное значение тока стержня.