

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

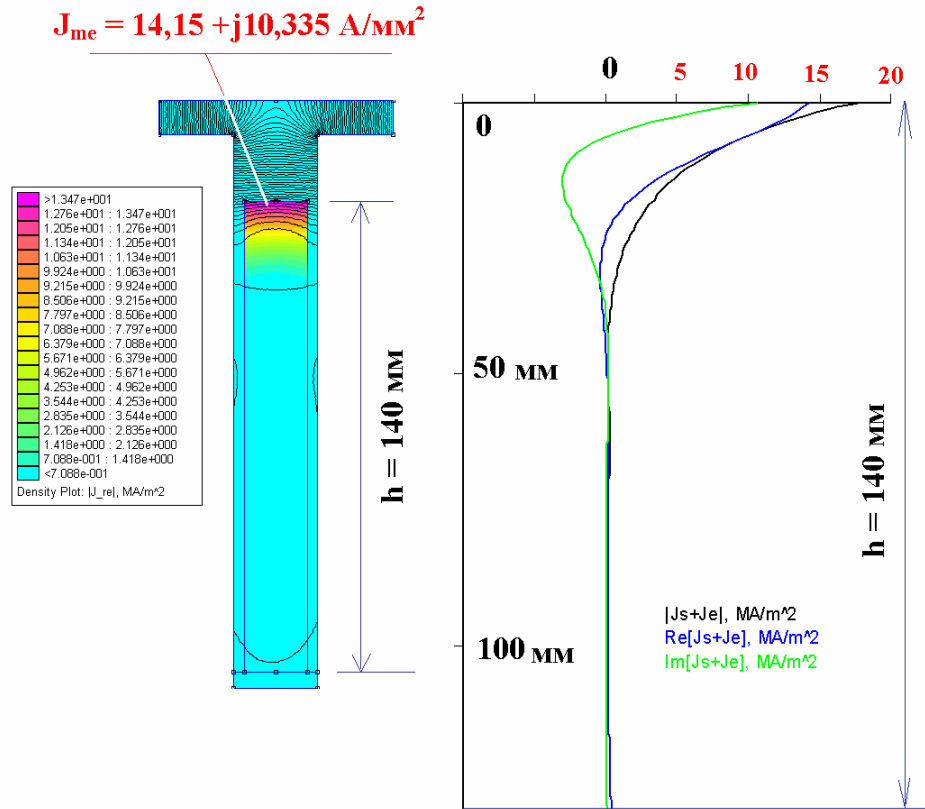
Предварительные замечания

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.



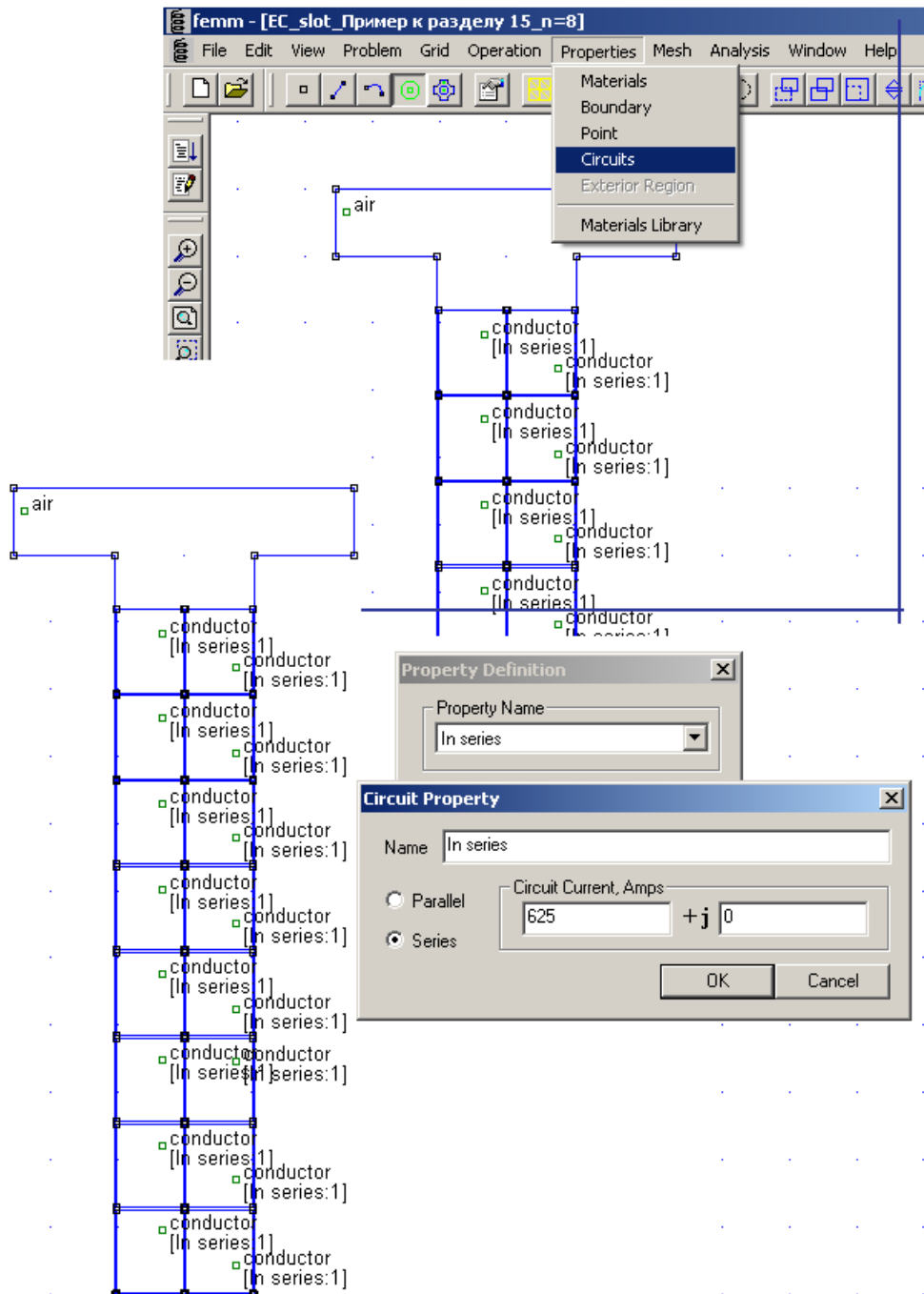
На рисунке показана картина поля пазового рассеяния и диаграмма распределения плотности тока по сечению стержня, справа показан график распределения плотности тока по высоте стержня (результаты моделирования, иллюстрация к примеру расчета, приведенному на лекции).

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.

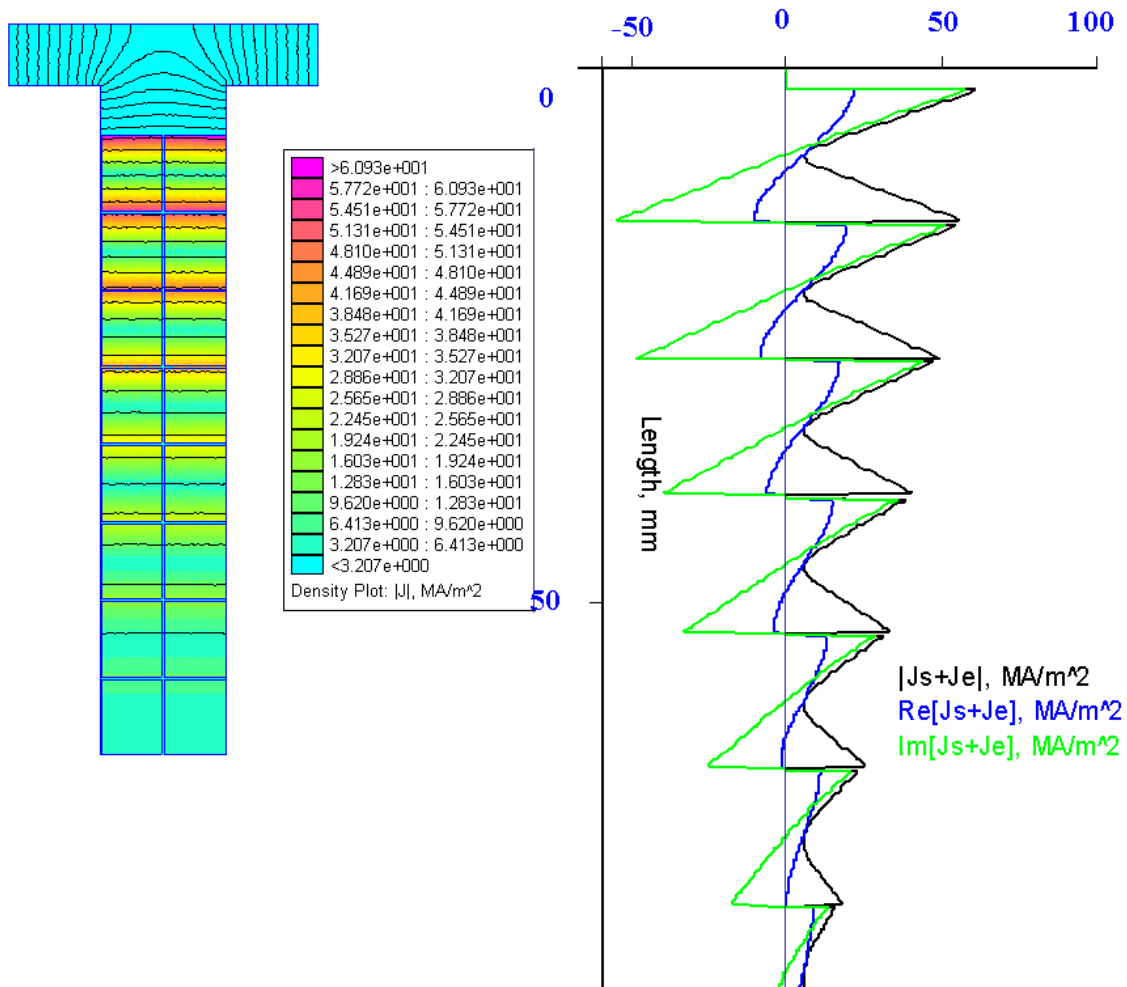
На приведенном ниже рисунке показано, как определить принадлежность элементарных проводов последовательной (*Series*) цепи (*Circuit*), по которой, а следовательно, и по каждому из проводов, протекает ток в 625 А. Суммарный

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.

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

*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.