

**«Исследование поверхностного эффекта и  
эффекта близости в массивных проводниках»  
*постановка лабораторной работы***

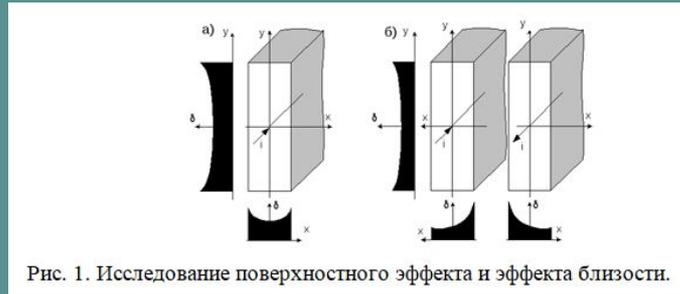
*Четвертак Ю.С.*  
ст. преп каф “ТОЭ и ОЭ”,  
магистрант каф “Электрические машины”,  
Кыргызский Технический Университет им. И. Раззакова  
г. Бишкек . Кыргызстан

**Цель работы:** Разработка лабораторного стенда для измерения и расчета распределения плотности тока по ширине медного ленточного проводника, при разных расположениях шин для исследования эффекта близости и поверхностного эффекта и построение математической модели с помощью FEMM.

#### **Запланированные этапы работы:**

1. Теоретический анализ лабораторной схемы.
2. Моделирование лабораторной работы с помощью компьютерных программ.
3. Изготовление и подбор элементов для лабораторной схемы.
4. Построение лабораторной модели.
5. Проведение опыта.
6. Обработка опытных данных. Сравнение с расчетными показателями.

## Теоретический анализ лабораторной схемы.



В данной работе исследуется распределение тока в ленточных медных проводниках толщиной 5 мм и шириной 30 мм при их различном взаимном расположении (рис. 2).

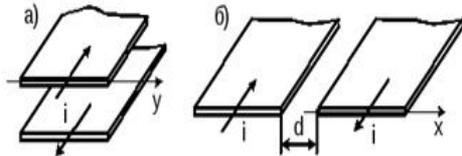
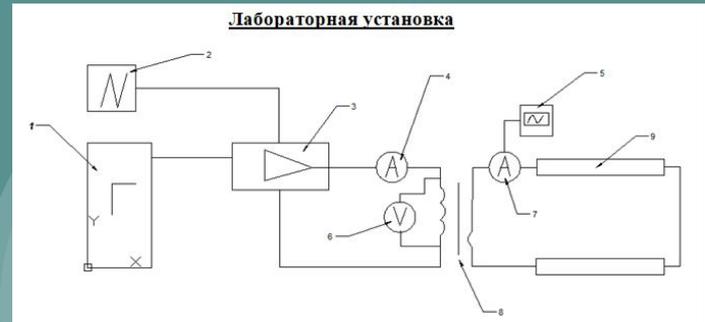


Рисунок 2. Ленточный медные проводники

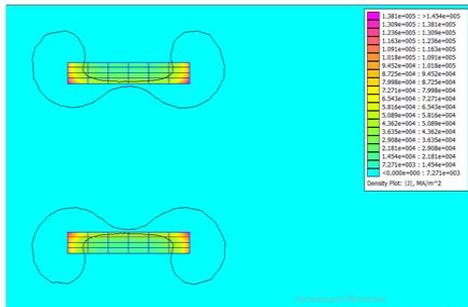


1. Генератора
2. Сеть 220 В.
3. Усилителя для получения тока вторичной цепи 10 А, подключенный к сети 2.
4. Амперметр фиксирует ток в первичной цепи трансформатора.
5. Осциллограф через токовые клещи фиксирует ток во вторичной цепи.
6. Вольтметр показывает напряжение первичной цепи трансформатора.
7. Во вторичной цепи с помощью токовых клещей и осциллографа измеряется ток, протекающий в шинах ( $I=10\text{ А}$ ).
8. Трансформатора ( $w_1=50$ ,  $w_2=1 \cdot 2$ ,  $I_2=10\text{ А}$ ).
9. Двух медных шин, длиной 400 мм, шириной  $\approx 30\text{ мм}$  и высотой  $\approx 5\text{ мм}$ , расстояние между которыми можно изменить по горизонтали в пределах от 0,5 до 90 мм, по вертикали от 25 до 90 мм.
10. Милливольметра

# Моделирование лабораторной работы с помощью компьютерных программ.

## График распределения плотности тока по ширине шины

При вертикальном расположении шин, расстояние между которыми  $d=3.5\text{ cm}$



Геометрическая модель для построения картины поля

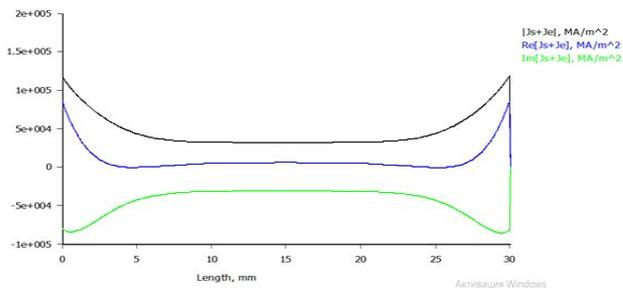
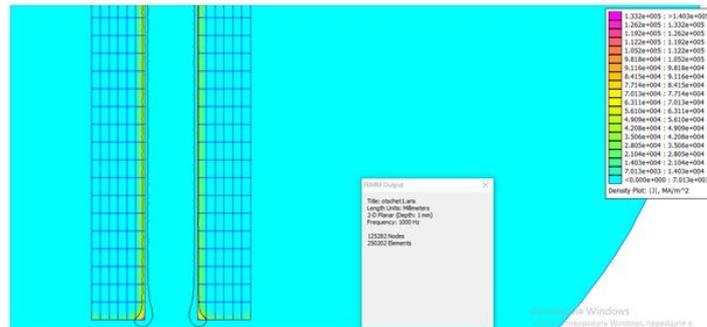


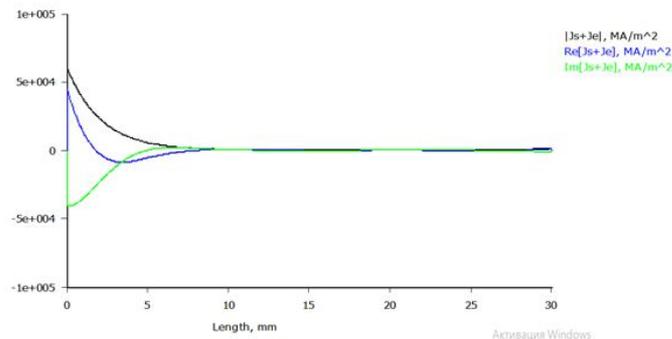
График распределения плотности тока по ширине шины

## Симуляция распределения плотности тока с помощью FEMM

Горизонтальное расположение шин при расстоянии между ними  $d=3\text{ cm}$



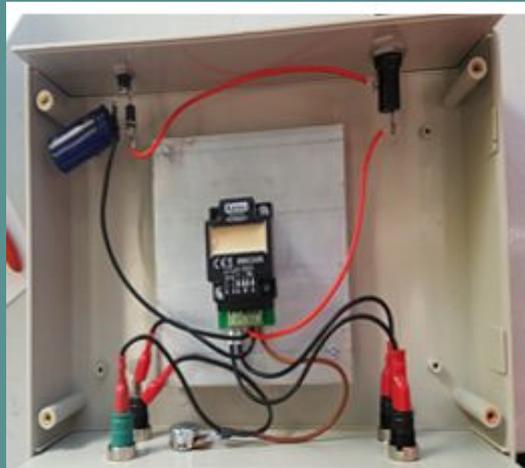
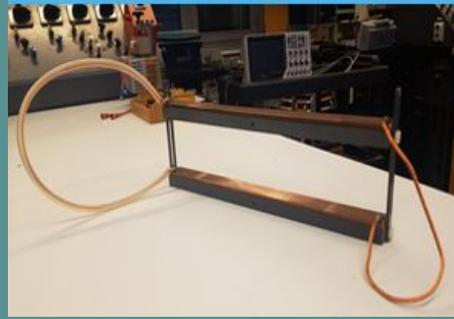
Геометрическая модель для построения картины поля

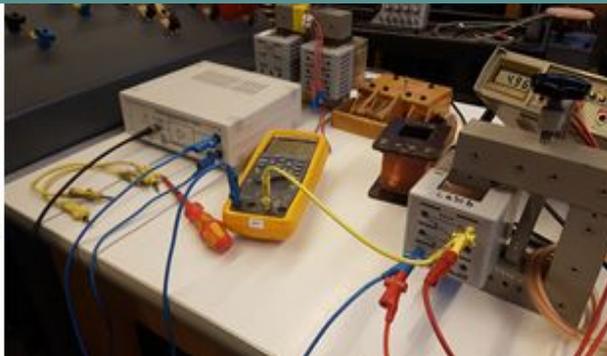


# Изготовление элементов

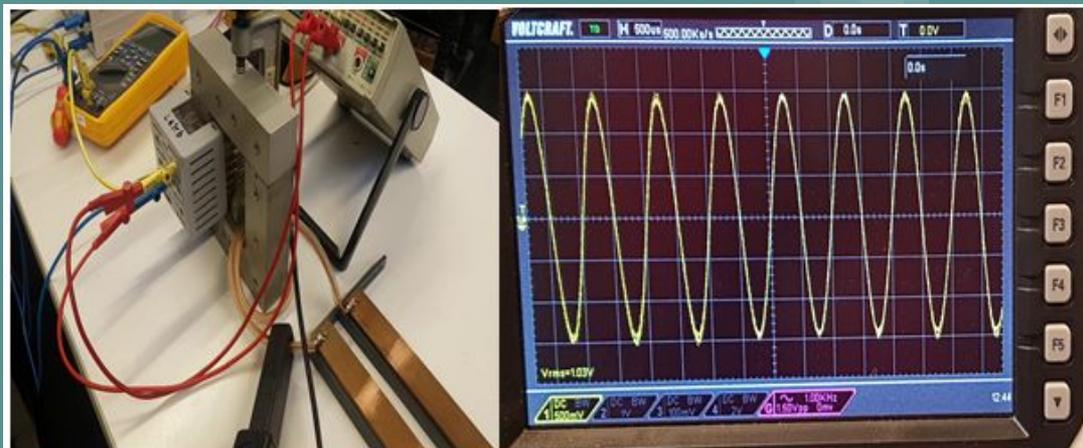


# Изготовление элементов

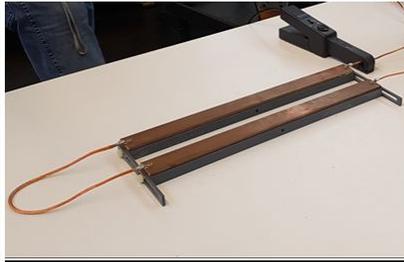




Построение лабораторной модели.



Горизонтальное положение.



Вертикальное положение



# Проведение опыта

	d=0.5cm	d=1cm	d=2cm	d=3cm	d=4cm	d=5cm
<b>Измерения на шине</b>	U,V	U,V	U,V	U,V	U,V	U,V
<b>0см</b>	23*10 <sup>-3</sup>	21*10 <sup>-3</sup>	18*10 <sup>-3</sup>	16.5*10 <sup>-3</sup>	13*10 <sup>-3</sup>	17*10 <sup>-3</sup>
<b>0.5см</b>	15*10 <sup>-3</sup>	17*10 <sup>-3</sup>	12*10 <sup>-3</sup>	12*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	11*10 <sup>-3</sup>
<b>1см</b>	10*10 <sup>-3</sup>	11*10 <sup>-3</sup>	9*10 <sup>-3</sup>	9*10 <sup>-3</sup>	8.5*10 <sup>-3</sup>	7.5*10 <sup>-3</sup>
<b>1.5 см</b>	8*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>
<b>2 см</b>	8*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>
<b>2.5 см</b>	8*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>
<b>3 см</b>	8*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>

	d=2.5cm	d=3.5cm		d=4.5cm		d=5.5cm	
<b>Измерения на шине</b>	U <sub>в</sub> ,V	U <sub>в</sub> ,V	U <sub>в</sub> ,V	U <sub>в</sub> ,V	U <sub>в</sub> ,V	U <sub>в</sub> ,V	U <sub>в</sub> ,V
<b>0см</b>	11*10 <sup>-3</sup>	23*10 <sup>-3</sup>	12*10 <sup>-3</sup>	22*10 <sup>-3</sup>	13*10 <sup>-3</sup>	24*10 <sup>-3</sup>	13*10 <sup>-3</sup>
<b>0.5см</b>	9*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>	9*10 <sup>-3</sup>	18*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>
<b>1см</b>	7*10 <sup>-3</sup>	18*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>	16*10 <sup>-3</sup>	9*10 <sup>-3</sup>	16*10 <sup>-3</sup>	9*10 <sup>-3</sup>
<b>1.5см</b>	6*10 <sup>-3</sup>	16*10 <sup>-3</sup>	7*10 <sup>-3</sup>	14*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	15*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>
<b>2см</b>	7*10 <sup>-3</sup>	19*10 <sup>-3</sup>	8*10 <sup>-3</sup>	16*10 <sup>-3</sup>	9*10 <sup>-3</sup>	16*10 <sup>-3</sup>	9*10 <sup>-3</sup>
<b>2.5см</b>	9*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	18*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	19*10 <sup>-3</sup>	11*10 <sup>-3</sup>
<b>3см</b>	11*10 <sup>-3</sup>	22*10 <sup>-3</sup>	12*10 <sup>-3</sup>	21.5*10 <sup>-3</sup>	13*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>	13*10 <sup>-3</sup>

# Обработка опытных данных с помощью компьютерной программы MATLAB.

## Сравнение с расчетными показателями

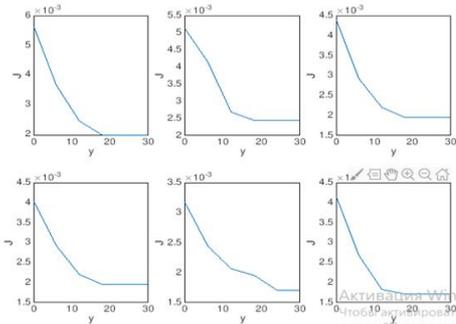
### Расчет с помощью компьютерной программы MATLAB

```

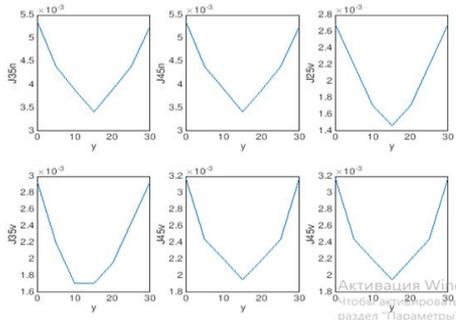
clc,clear
Y=58.47,l=240,y=0.6:30;

%Горизонтальное положение%
%d=0.5cm%
U05=[23*10^-3,15*10^-3,10*10^-3,8*10^-3,8*10^-3];
%d=1cm%
U1=[21*10^-3,17*10^-3,11*10^-3,10*10^-3,10*10^-3];
%d=2cm%
U2=[18*10^-3,12*10^-3,9*10^-3,8*10^-3,8*10^-3];
%d=3cm%
U3=[16.5*10^-3,12*10^-3,9*10^-3,8*10^-3,8*10^-3];
%d=4cm%
U4=[13*10^-3,10*10^-3,8.5*10^-3,8*10^-3,7*10^-3];
%d=5cm%
U5=[17*10^-3,11*10^-3,7.5*10^-3,7*10^-3,7*10^-3];
J05=Y*(U05/l)
J1=Y*(U1/l)
J2=Y*(U2/l)
J3=Y*(U3/l)
J4=Y*(U4/l)
J5=Y*(U5/l)
subplot(2,3,1),plot(y,J05),xlabel('y'),ylabel('J')
subplot(2,3,2),plot(y,J1),xlabel('y'),ylabel('J')
subplot(2,3,3),plot(y,J2),xlabel('y'),ylabel('J')
subplot(2,3,4),plot(y,J3),xlabel('y'),ylabel('J')
subplot(2,3,5),plot(y,J4),xlabel('y'),ylabel('J')
subplot(2,3,6),plot(y,J5),xlabel('y'),ylabel('J')
Ergebnis

J05 = 0.0056 0.0037 0.0024 0.0019 0.0019 0.0019
J1 = 0.0051 0.0041 0.0027 0.0024 0.0024 0.0024
J2 = 0.0044 0.0029 0.0022 0.0019 0.0019 0.0019
J3 = 0.0040 0.0029 0.0022 0.0019 0.0019 0.0019
J4 = 0.0032 0.0024 0.0021 0.0019 0.0017 0.0017
J5 = 0.0041 0.0027 0.0018 0.0017 0.0017 0.0017
    
```

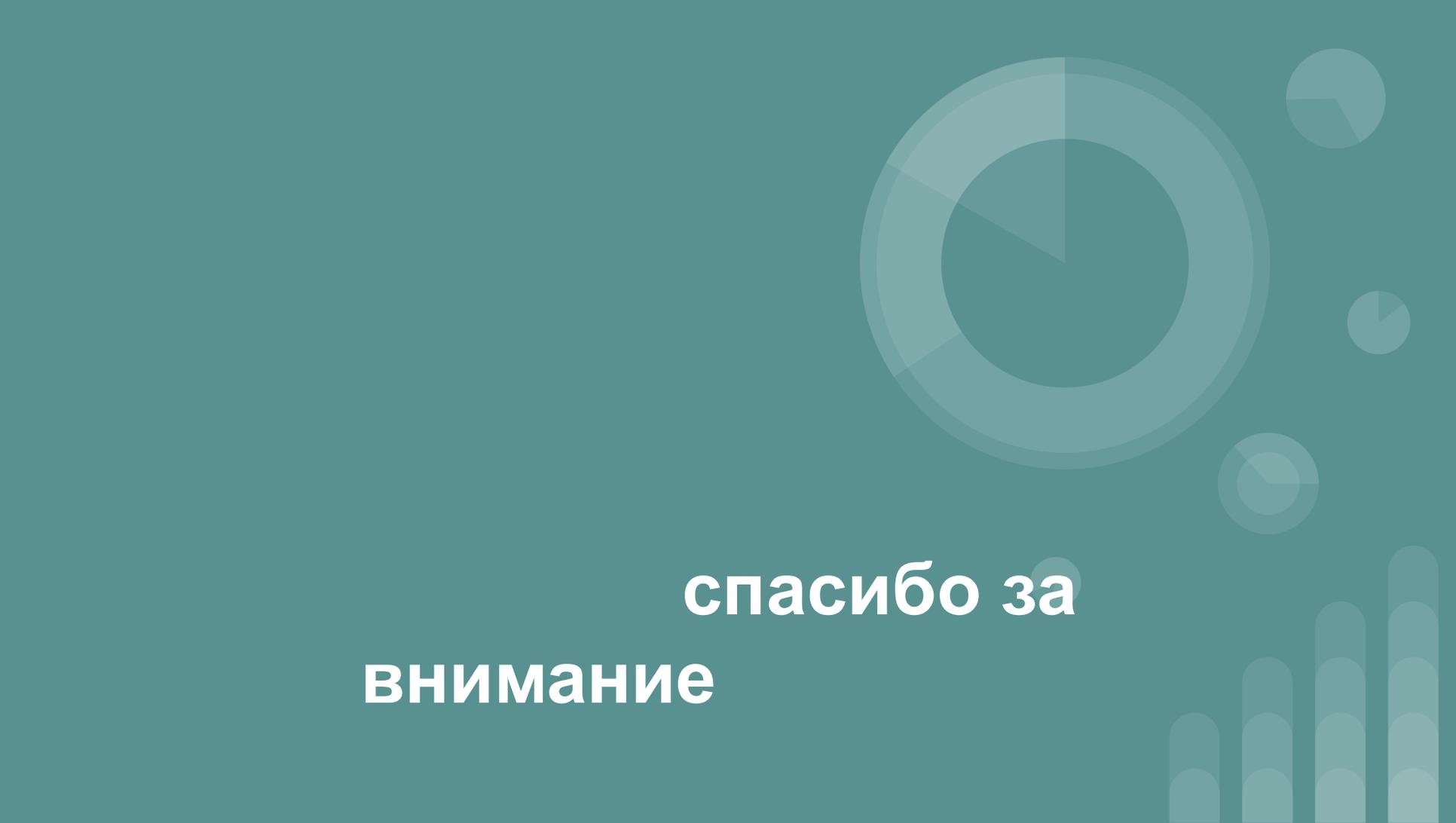


Распределение плотности тока в горизонтальном положении несимметрично



**Вывод:** При горизонтальном расположении шин наблюдается несимметричная картина поля, обусловленная не только поверхностным эффектом, но и эффектом близости, при котором можно наблюдать вытеснение тока на поверхности шин, обращенного друг к другу (внутренние поверхности), так как ток противоположные стороны. При увеличении расстояния между шинами влияние эффекта близости уменьшается, и картина поля становится симметричной относительно середины проводника, так как сказывается влияние поверхностного эффекта.

Скин - эффект также обуславливает распределение плотности тока при вертикальном расположении шин. Аналогичные картины поля и графики распределения плотности тока вдоль ширины проводника можно наблюдать при компьютерном моделировании с помощью FEMM.



**спасибо за  
внимание**