

**Лабораторная работа №5****Расчет коэффициента проводимости рассеяния по головкам зубцов****Предварительные замечания**

Зона раскрытия паза, называемая в случае полузакрытых или полукрытых пазов также зоной коронок (головок) зубцов, представляет собой один из основных путей, по которому проходит магнитный поток пазового рассеяния. Индуктивные сопротивления пазового рассеяния являются важными параметрами, значительно влияющими на ударные и пусковые токи. В связи с этим к точности расчета этих параметров предъявляются довольно высокие требования. Во многих руководствах по расчету и проектированию электрических машин рекомендуется учитывать проводимость для потоков пазового рассеяния в зоне головок зубцов. Следует заметить, что поле на этом участке существенно неравномерно, в связи с чем проверка расчетных формул с помощью конечно-элементных моделей имеет важное значение.

Сравним формулы для расчета проводимости рассеяния по головкам зубцов, рекомендованные в учебниках А.В. Иванова-Смоленского (т.2, стр. 361) и А.И. Вольдека (1980, стр. 464).

Рассмотрим пока только полузакрытые пазы, расположенные напротив гладкого второго сердечника, при допущении, что либо поле пазового рассеяния в шлице (на некотором участке шлица) становится равномерным, либо по крайней мере одна его силовая линия становится перпендикулярной оси паза.

Проводимостью рассеяния по головкам зубцов будем считать разность проводимостей  $\Lambda'_{\text{шг}}$  и проводимости  $\Lambda'_{\text{ш}} = \mu_0 l \cdot (h'_{\text{ш}} / b_{\text{ш}})$ , где  $h'_{\text{ш}}$  – расстояние, отсчитанное от поверхности зубчатого сердечника до силовой линии, которую можно считать границей равномерного поля в шлице (рис. 1), а  $\Lambda'_{\text{шг}}$  – проводимость, определенная для участка поля пазового рассеяния (т.е. для участка нечетного поля), ограниченного (сверху и снизу) упомянутой силовой линией и

силовой линией, касающейся поверхности гладкого сердечника в точке пересечения ее с осью паза.

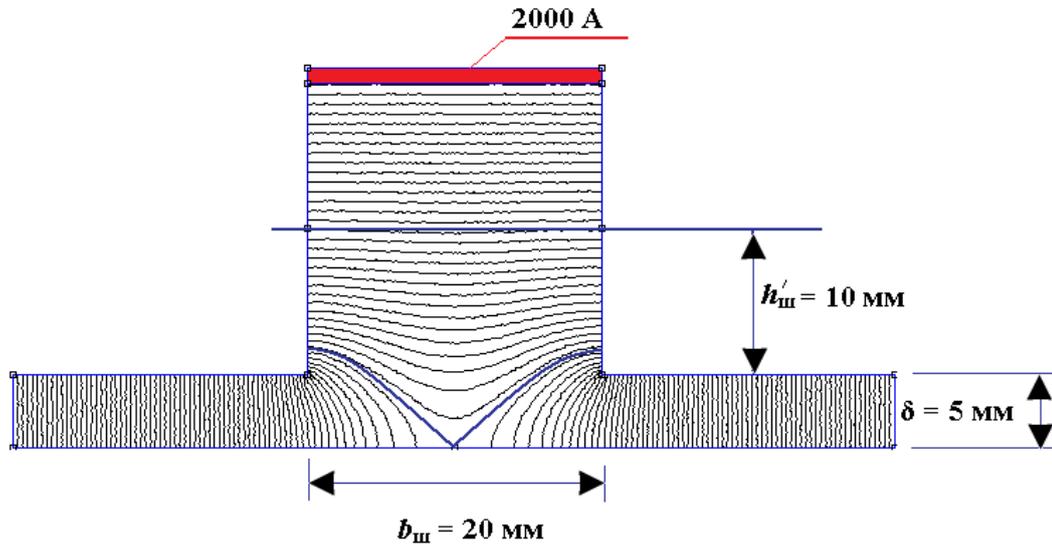


Рис. 1. Поле пазового рассеяния вблизи раскрытия паза

### Расчет по формулам и моделирование

Зададим размеры шлицевой зоны паза и относительный шаг обмотки, характеризующий укорочение:

$$b_{\text{ш1}} := 20 \cdot \text{мм} \quad d_{\text{лт}} := 5 \cdot \text{мм} \quad k_{\delta 2} := 1 \quad \beta_1 := 1$$

#### Расчет по формуле А.В. Иванова-Смоленского

$$a_{01} := \frac{b_{\text{ш1}}^2}{(2 \cdot d_{\text{лт}} \cdot k_{\delta 2})^2} \quad a_{01} = 4$$

$$\lambda_{\text{r1}} := \left[ \frac{1}{2 \cdot \sqrt{a_{01}}} - \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{2}{\sqrt{1 + \left( \frac{1}{a_{01}} \right)}} \right] + \frac{1}{\sqrt{a_{01}}} \cdot \text{atan} \left( \frac{1}{\sqrt{a_{01}}} \right) \right] \right] \cdot \frac{3 \cdot \beta_1 + 1}{4} \quad \lambda_{\text{r1}} = -0.0089$$

#### Расчет по формуле А.И. Вольдека

$$\lambda_{\text{к}} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{d_{\text{лт}}^2}{b_{\text{ш1}}^2} + \frac{1}{4} \right) + 4 \cdot \frac{d_{\text{лт}}}{b_{\text{ш1}}} \cdot \text{atan} \left( \frac{b_{\text{ш1}}}{2 \cdot d_{\text{лт}}} \right) \right) \quad \lambda_{\text{к}} = -0.0089$$

**По результатам моделирования**

$$\text{Current} := 2000 \cdot \text{A} \quad l_z := 1 \cdot \text{мм} \quad h_{\text{ш.прим}} := 10 \cdot \text{мм}$$

**Поток от поверхности гладкого сердечника до установленного уровня равномерного поля в шлице (на 1 мм длины по оси z):**

$$\Phi_{\text{шг.прим}} := 1.22187 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Вб}$$

$$\Phi_{\text{шг.прим}} = 1.222 \times 10^{-6} \text{ Вб}$$

$$\Lambda_{\text{шг.прим}} := \frac{\Phi_{\text{шг.прим}}}{\text{Current}}$$

$$\Lambda_{\text{шг.прим}} = 6.109 \times 10^{-10} \text{ Гн}$$

$$\lambda_{\text{г.фемм}} := \left( \frac{\Lambda_{\text{шг.прим}}}{\mu_0 \cdot l_z} - \frac{h_{\text{ш.прим}}}{b_{\text{шл}}} \right)$$

$$\lambda_{\text{г.фемм}} = -0.014$$

Как видно из приведенного расчета, коэффициент проводимости рассеяния по головкам зубцов, найденный для заданных размеров на конечно-элементной модели, существенно больше значения, найденного по аналитическим формулам, полученным с помощью конформного преобразования. Погрешность обусловлена, по-видимому, недостаточной равномерностью поля в шлице на принятом уровне. При увеличении глубины шлица значение коэффициента проводимости, найденное по результатам моделирования, приближается к теоретическому значению и, начиная с  $h_{\text{ш.прим}} = 24$  мм, становится равной 0,0093.

Следует заметить, что теоретическое значение коэффициента проводимости рассеяния по головкам зубцов достигается при глубине шлица, значительно превышающей реальную, характерную для машин с полузакрытыми пазами.

Более близкие к теоретическим результаты получаются при моделировании машин, в которых раскрытия паза примерно равны зазору (такое соотношение характерно, например, для гидрогенераторов). Так, для конфигурации, показанной на рис. 2, найденное на конечно-элементной модели и по аналитическим формулам значения коэффициента проводимости совпадают с точностью до единиц четвертого знака (0,33068 и 0,32999).

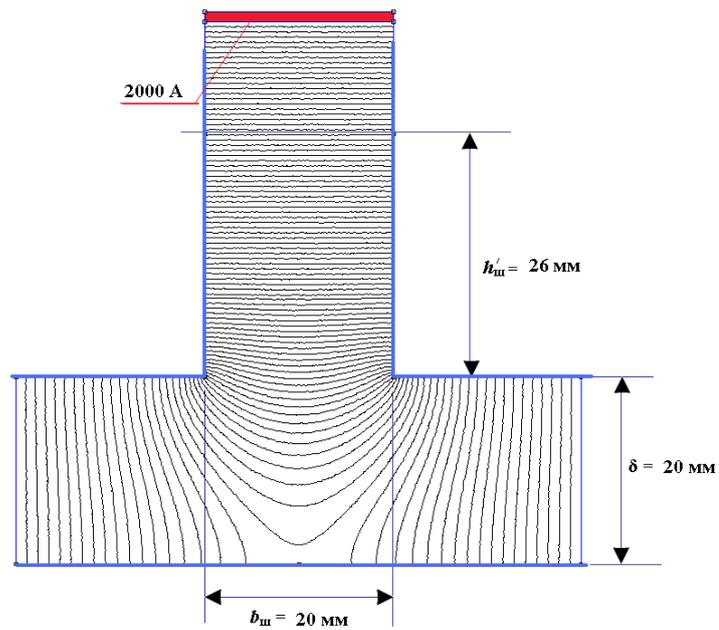


Рис. 2. Поле рассеяния по головкам зубцов при относительно большом зазоре

При меньшей глубине погружения тока в паз (рис. 3) проводимость рассеяния по головкам зубцов изменяется мало: при тех же размерах паза и зазора, что и на рис. 2, но при токе, ближе расположенном к зазору, коэффициент проводимости рассеяния по головкам равен 0,32969.

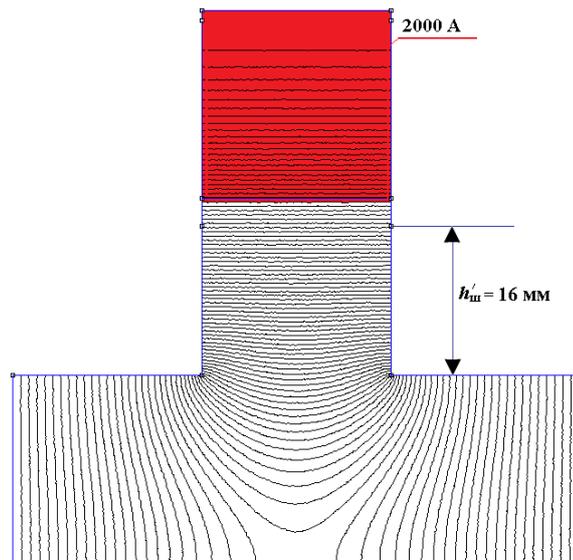


Рис. 3. Поле рассеяния по головкам зубцов при меньшей глубине погружения тока в паз.

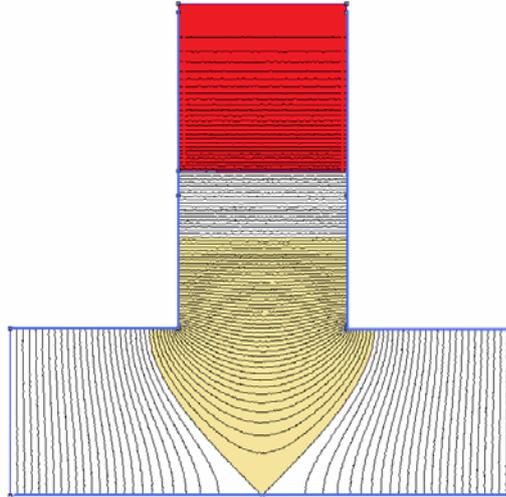


Рис. 4. Поток рассеяния по головкам зубцов для случая, показанного на предыдущем рисунке

### Программа работы

- 1) По заданным размерам смоделировать нечетное поле (т.е. поле в зоне раскрытия паза с током). Расстояние от уровня поверхности зубчатого сердечника до проводов с током взять равным  $0,6b$ . Определить поток, проводимость и коэффициент проводимости рассеяния по коронкам зубцов.
- 2) Сравнить значение коэффициента проводимости, найденное на модели, с расчетом по формулам (1) и (2). Оценить погрешность.
- 3) Оценить погрешность моделирования, связанную с дискретностью конечно-элементной структуры, проведя опыты на трех структурах разной дробности.
- 4) Составить отчет о работе, описав методику моделирования и составив сводную таблицу результатов.

Вариант	1	2	3	4
Ширина паза, $b$ , мм	12	14	22	26
Зазор, $\delta$ , мм	1	0.8	22	20
Зубцовое деление, $t_z$ , мм	25	28	50	50