

# МАГНИТНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ С КЛИНОВИДНЫМИ ПОЛЮСАМИ

*Бершадский И.А., аспирант*

В [1] обосновывается целесообразность установки стационарных указателей тока короткого замыкания (УТКЗ) и приведено описание феррогидродинамического УТКЗ (ФУТКЗ). В настоящее время ведется работа по его модификации и разработке конструкции для воздушной линии. В связи с этим возникает необходимость расчета магнитной проводимости таких устройств.

На рис. 1 приведен один из вариантов магнитной системы указателя. В магнитной системе ФУТКЗ воздушный зазор соизмерим с размерами полюсов. Соотношение линейных размеров составляет  $\delta_{cp} / h_n \approx 0,5$ . ( $\delta_{cp}$  – средний размер воздушного зазора,  $h_n$  – высота полюса).

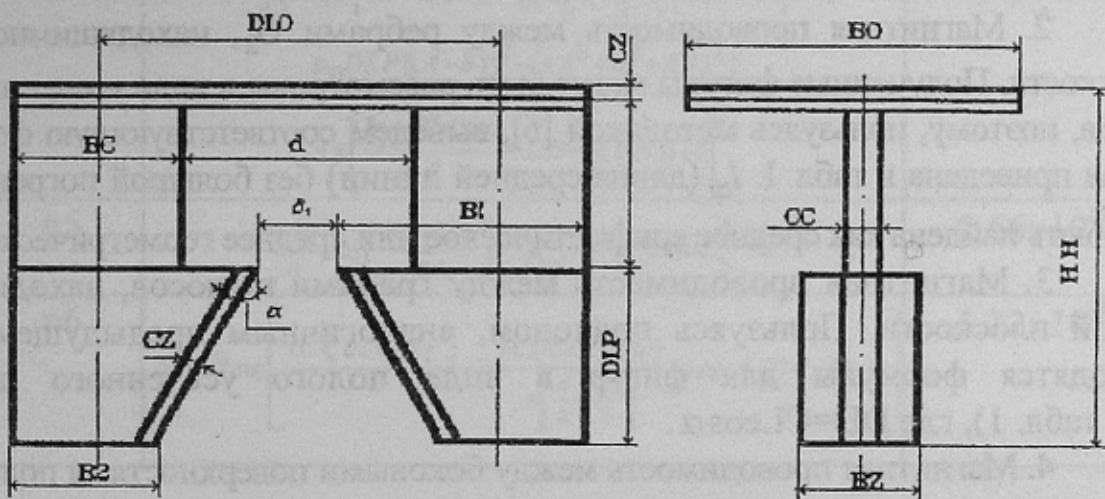


Рисунок 1 – Вариант конструкции ФУТКЗ

Для оценочного расчета магнитных проводимостей удовлетворительную точность позволяет достичь метод вероятного пути потока (Ротерса) [2, 3]. Используемые в технической литературе основные фигуры [2, 3] не могут достаточно полно описать поле ФУТЗ, поэтому ниже выводится ряд дополнительных формул.

1. Магнитная проводимость между поверхностями, торцевые плоскости которых расположены под углом. Проводимость между торцами двух полюсов с переменной шириной полюса  $b$ , но с одинаковыми длинами  $a$  и полярными расстояниями  $g$ . Магнитная проводимость элементарного слоя, заключенного между двумя смежными линиями магнитной индукции.

$$g = \mu_0 \frac{b(x)_i \Delta x}{\varphi x_i},$$

где  $b_i$  — ширина полюса в  $i$ -й точке между  $b_2$  и  $b_1$ ;

$x_i$  — текущая координата  $i$ -го слоя.

Для всего полюса магнитная проводимость

$$G = \frac{\mu_0}{\varphi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{b(x) dx}{x}. \quad (1)$$

Здесь  $b(x)$  — закон изменения формы полюсов вдоль координаты  $x$ . Для клиновидных полюсов  $b$  изменяется по прямой. Согласно [5] записываем уравнение прямой, проходящей через две точки и получаем соответствующую расчетную формулу (см. табл. 1), где  $k = \frac{b_2 - b_1}{r_2 - r_1}$ ;  $r_1$ ,  $r_2$  — внутренний и внешний радиусы схождения полюсов.

2. Магнитная проводимость между ребрами  $G_2$ , находящимися в одной плоскости. Полученные фигуры могут быть рассмотрены в виде усеченных полуконов, поэтому, пользуясь методикой [6], выведем соответствующую формулу, которая приведена в табл. 1.  $l_{cp}$  (длина средней линии) без большой погрешности может быть найдена как среднее арифметическое или среднее геометрическое [2].

3. Магнитная проводимость между гранями полюсов, находящимися в одной плоскости. Пользуясь подходом, аналогичным предыдущему пункту, выводятся формулы для фигур в виде полого усеченного полуконов (см. табл. 1), где  $DD = CL \cos \alpha$ .

4. Магнитная проводимость между боковыми поверхностями полюсов. Считая среднюю линию окружностью радиусом  $R_{cp}$ , находим значение  $G_4$  (см. табл. 1).

5. Магнитная проводимость между парами граней, расположенными в плоскостях, находящихся под углом друг к другу. Для вывода выражения проводимости используется формула части кольца [6].

В конструкции ФУТКЗ, магнитная цепь которого может набираться из нескольких листов или из пакета, имеются небольшие технологические воздушные зазоры. Они требуют соответствующего увеличения намагничивающей силы. По [2] принимаем зазор между точно обработанными поверхностями, соединенными без давления равным 0,035 мм и вычисляем проводимость по формулам для призмы.

Рассматривая поле потоков рассеяния между стержнями магнитопровода (рис. 1) нужно учесть, что в данном случае стержни магнитопровода представляют собой прямоугольники с соизмеримыми размерами. Поэтому реальное трехмерное поле заменяется приближенно, но с достаточной для практики



точностью плоскопараллельным полем, и расчет производится по формулам Ротерса с использованием поправочных коэффициентов [1].

Таблица 1 – Сводная таблица расчетов магнитной проводимости

Проводимость	Фигура	Расчетная формула	Значение Гн/м
G1	п1	$\frac{\mu_0}{2\alpha} \left[ \frac{(BZ_2 - BZ_1)(R_2 - R_1 - R_1 \ln(R_2/R_1))}{R_2 - R_1} + BZ_1 \ln(R_2/R_1) \right]$	$5,88 \times 10^{-3}$
G2	п2	$\mu_0 DLP \frac{(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_1 \delta_2)}{12\pi(\delta_1 + \delta_2)^2}$	$6,22 \times 10^{-9}$
G3	п3	$\mu_0 DLP \frac{DD(\delta_1 + \delta_2) + 2DD^2}{2\pi(\delta_1 + DLP \operatorname{tg} \alpha + DD)^2}$	$1,73 \times 10^{-9}$
G4	п4	$A = (\delta_1/2 + DD); B = (\delta_1/2 + DD);$ $\frac{\mu_0 DLP [(A+B)^2 - \frac{1}{3}(A^2 + B^2 + AB)^2]}{4\pi \left[ \frac{\delta_1 + DLP \operatorname{tg} \alpha}{2} + DD + \frac{1}{4}(B_1 + B_2) \right]^2}$	$2,25 \times 10^{-9}$
G5	п5	$\frac{\mu_0 BZ}{\alpha} \ln \left( \frac{R_5 + CZ}{R_5} \right), R_5 = \delta_2/2 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right)$	$2,66 \times 10^{-9}$
GSS	п6	$G_s = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \left[ \frac{CC(DLC - Z_c)}{d} + 2 \frac{BC(DLC - Z_b)}{\pi \left[ \frac{d}{2} + \frac{BC}{2} \right]} + 2g_{SP}(DLC - Z_c) \right]$	$5,72 \times 10^{-8}$

Проводимость потока рассеяния состоит из проводимости  $g_{sb}$  между внутренними гранями СС сердечников, двух проводимостей  $g_{sb}$  между гранями ВС этих стержней и двух проводимостей между "ребрами" внутренних граней  $g_{sp}$ ,  $Z_a'$ ,  $Z_b'$ ,  $Z_c'$  – координаты поля выпучивания.

Расчет указанных проводимостей в воздушном зазоре магнитной системы ФУТКЗ приведен в табл. 1 для  $DLO=0,075$  м,  $BC=0,005$  м,  $d=0,05$  м,  $B1=0,038$  м,  $B2=0,03$  м,  $CZ=0,002$  м,  $\alpha=8^\circ$ ,  $DLP=0,061$  м,  $DLC=0,042$  м,  $BZ=0,018$  м,  $\delta_1 = 0,017$  м.

Полученные данные позволяют перейти к оценочному расчету магнитной системы электромагнита ФУТКЗ (см. табл. 1) для различных параметров, аппроксимировать картину трехмерного магнитного поля в воздушном зазоре и повысить точность расчета в рамках данного метода, так как обычно пользуются более грубым разбиением и не вполне учитывают реальную картину поля.

## Список литературы

1. Белый М.В., Дробот В.К., Елиософ В.А. и др. Указатели тока короткого замыкания УТКЗ-50-2000/200-0.6 // Энергетика и электрификация, №1, 1996, с. 24-27.
2. Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1970.
3. Буль Б.К. Основы теории расчета магнитных цепей. – М.: Энергия, 1964.
4. Основы теории электрических аппаратов / И.С.Таев и др. – М.: Высшая школа. 1987.
5. Фролов С.В., Шостак Р.Я. Курс высшей математики. – М. : Высшая школа, 1973.
6. Буль О.Б. Расчет магнитных проводимостей плоскопараллельных и плоскомеридианных полей с помощью простых фигур. – Известия вузов, Электромеханика, 1969, №1.