

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ УКАЗАТЕЛЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*Баринберг А.Д., к.т.н.,*

*Бершадский И.А. аспирант,*

*Балховитин Д.Л., Инвия М.В., студенты*

Проведение поверочного расчета магнитной системы (МС) ФУТКЗ можно свести к решению обратной задачи – определению магнитного потока в различных частях МС при заданном значении МДС обмотки. В нашем случае роль последней выполняет токоведущий провод фазы воздушной линии (ВЛ) или шина на трансформаторной подстанции. Также считаются заданными геометрические размеры магнитопровода и характеристики материала.

Потери в стали и угловой сдвиг между потоком и МДС учитывается введением в схему замещения индуктивных магнитных сопротивлений. В общем случае составляющие комплексного магнитного сопротивления сердечника длиной  $l$  и поперечным сечением  $S$ :  $R_m = \rho_R l / S$ ,  $X_m = \rho_X l / S$  [4]. Удельные магнитные сопротивления определяются по заданным характеристикам материалов при частоте тока 50 Гц:  $\rho_R = H(|B|)/|B|$ ,  $\rho_X = f(|B|, \omega)$ .

Для расчета используется метод участков, который является хорошо алгоритмизируемым и позволяет учитывать потоки рассеяния и насыщение стали [2]. Поле потоков рассеяния считается плоскопараллельным, провод ВЛ эквивалентуется обмоткой, распределенной по стержням и полюсам. Это допущение позволяет составить электрическую схему замещения магнитной цепи и записать соответствующие системы уравнений. Для нахождения распределения магнитных напряжений и потоков в магнитопроводе построим рекуррентные соотношения. Поток рассеяния между стержнями магнитопровода примем на каждом участке сосредоточенным в его середине. Таким образом, используется Т-образная схема замещения.

В общем случае для  $(i+1)$ -го участка магнитный поток и падение магнитного напряжения

$$\underline{\Phi}_{i+1} = \underline{\Phi}_i + \underline{L}_s X_i (\underline{U}_{mi} - (f - \underline{\Phi}_i \underline{Z}_{mi} / 4) X_i) / (1 - \underline{L}_s X_i^2 \underline{Z}_{mi} / 4), \quad (1)$$

$$\underline{U}_{mi+1} = \underline{U}_{mi} - X_i (2f - (\underline{\Phi}_i + (\underline{\Phi}_i + \underline{L}_s X_i (\underline{U}_{mi} - (f - \underline{\Phi}_i \underline{Z}_{mi} / 4) X_i) + (\underline{Z}_{mi} / 2)) / (1 - \underline{L}_s X_i^2 \underline{Z}_{mi} / 4))), \quad (2)$$

где  $\underline{\Phi}_i$ ,  $\underline{U}_{mi}$  – магнитный поток и магнитное напряжение  $i$ -го участка;  $f$  – комплекс удельной НС обмотки;  $X_i$  – длина  $i$ -го участка;  $\underline{L}_s$  – удельная магнитная проводимость рассеяния;  $\underline{Z}_{mi}$  – комплексное магнитное сопротивление обеих стержней на единицу длины.

Далее рассматривается часть магнитной системы, названная "полюс-зазор", включающая все проводимости рабочего зазора и осредненно учитывающая проводимости полюса и "башмака".

МДС обмотки можно представить в виде суммы падений магнитного напряжения на полюсах, в стержнях, в основании и в нерабочих воздушных зазорах

$$F = DU_{\text{м}}^{\text{п}} + DU_{\text{м}}^{\text{ст}} + DU_{\text{м}}^{\text{осн}} + DU_{\text{м}}^{\text{нр}}. \quad (3)$$

Составленная модель позволила построить универсальную программу, в которой решаются прямая и обратная задачи расчета МС УТКЗ на постоянном и переменном токах. При решении обратной задачи проводится уточнение потока  $\Phi_1$  системы "полюс-зазор" с использованием итерационного алгоритма метода Ньютона (главная программа). На участке цепи "полюс-зазор" рассматривается три магнитных напряжения  $UM(1)$ ,  $UM(2)$ ,  $UM(3)$ . В начале счета задается значение удельной МДС

$$f = (UM(1) + \Phi_1((2DLC + DLO)ZCUD + RMH))/N, \quad (4)$$

где  $DLC$ ,  $DLO$  – длина стержня и основания;  $N$  – число участков стержня и основания;  $RMH$  – сопротивление нерабочих зазоров.

В последующих итерациях значение удельной НС должно уточняться до тех пор, пока не выполняется критерий правильности удельной НС. Невязка

$$Pogr = \Phi_L(ZMO + RMH) + (N - L)f + UM_L, \quad (5)$$

где  $L$  – число участков в стержне.

Отличительной особенностью программы является возможность провести оценочный расчет магнитного поля в рабочем зазоре. При этом допускается упрощающее предположение о длине силовых линий индукции  $XCR$ :

– в пределах полюсов:

$$XCR = 2\alpha(HH + y)/\cos\alpha, \quad \text{где } HH = \delta_1/2\text{tg}\alpha \quad (6)$$

– за пределами полюсов в нижней части – по формуле Гюйгенса:

$$XCR = 2(\delta_2^2/4 + dy^2)^{0.5} + 2/3((\delta_2^2/4 + dy^2)^{0.5} - \delta_2), \quad (7)$$

где  $y$  – вертикальная координата;  $dy$  – приращение координаты.

Для одного из вариантов магнитных систем были проведены экспериментальные исследования измерителем индукции Ш1-8, предварительно градуированным на переменном токе образцовой мерной катушкой [3]. При сравнении результатов расчета и эксперимента сопоставлялись действующие значения напряженности магнитного поля. Источниками тока были шина и обмот-

ки, распределенные по стержням и полюсам ( $I=600$  А). Кривые  $B_m(H)$  и  $\rho_x(H)$  конструкционной стали макета получены опытным путем на образцовом тороиде [5].

Так как в рассматриваемой математической модели шина эквивалентировалась распределенной обмоткой, то реальное поле потоков рассеяния в действительности несколько отличается от расчетного. В связи с этим для оценочного расчета были введены эмпирические поправки, учитывающие разность напряженностей в воздушном зазоре при одинаковых МДС. Эти коэффициенты пропорциональности в ненасыщенной магнитной системе изменяются от 1,16 до 1,3 в зависимости от координаты  $y$ .

Приведенные допущения позволили получить следующие результаты: расхождение значения напряженности в верхней части полюсов – 9%, в средней части – 2,4%, в нижней части – 12,5%.

Выполненные исследования дают возможность проводить оценочные расчеты магнитной системы УТКЗ и в дальнейшем на их основе выбирать предельные размеры магнитной системы с минимальной массой и заданным падением напряжения в магнитопроводе.

### Список литературы

Баринберг О.Д., Єліософ В.А., Старік Ю.М. і др. Показчик коротких замикань. Патент України №1016А., МПК5 G 01R 29/18.

Никитенко А.Г. и др. Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов. – М.: Высш. шк., 1990.

Гринберг И.П., Шумяковский Е.А. Измерители индукции переменных магнитных полей. – К.: Техніка, 1982.

Буль Б.К. Основы теории расчета магнитных цепей. – М.: Энергия, 1964.

Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.-Л.: ГЭИ, 1962.