

## О ВЛИЯНИИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. Сипайлов, В. Ф. Кулаков, В. И. Попов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей обмотки статора ударного генератора составляет значительную часть сверхпереходного сопротивления, в особенности в конструкциях с большим отношением полюсного деления к длине. С целью получения максимальной ударной мощности следует уменьшать рассеяние лобовых частей, что достигается, с одной стороны, выбором такой конфигурации обмотки, в которой поток рассеяния будет возможно малым, и, с другой стороны, экранированием лобовых частей электропроводящими капками или экранами.

Вихревые токи экрана ослабляют поле лобовой части, что приводит к уменьшению ее индуктивности и уменьшению электродинамических усилий.

Вопрос о необходимости и эффективности экранирования потока рассеяния лобовых частей обмоток ударных генераторов до настоящего времени не выяснен. Некоторые авторы считают применение токопроводящих экранов нецелесообразным и рекомендуют крепить лобовые части обмоток статора генераторов разрывной и ударной мощности гетинаксовыми плитами [1]. Другие предполагают, что рассеяние лобовых частей может быть снижено на 50—60% [2, 3]. Экспериментальные исследования экранирующего и демпфирующего действия экранов из материалов с различной проводимостью, проведенные в Томском политехническом институте [4], показывают значительно большую их эффективность.

Попытки решить задачу экранирования, представляя экран как цепь с определенной индуктивностью, взаимоиндуктивностью и т. д., приводят к весьма приближенным результатам [5]. Общий метод решения состоит в том, чтобы экранируемое пространство и экран рассматривать как область, в которой исследуется и рассчитывается магнитное поле. Такой метод исследования приводит к интегрированию уравнений Максвелла в области, частью которой является и тело экрана.

В данном случае решение задачи проводим с помощью функции векторного потенциала  $A$  в прямоугольной системе координат методом, в принципе подобном изложенному в [6]. Действие экрана наиболее эффективно, если последний находится в непосредственной близости к лобовым частям обмотки. При малой кривизне лобового пространства и при достаточно близком расстоянии от экранов до обмотки искажение поля, вносимое непрямолинейностью, оказывается незначительным. Поэтому в первом приближении искажением поля из-за непрямолинейности лобовой структуры в случае применения экранов можно пренебречь.

Рассмотрим группу стержней одной фазы лобовой части однослой-

ной обмотки, окруженную немагнитным экраном с электропроводностью  $\gamma$  и магнитной проницаемостью  $\mu = \mu_0$  (рис. 1). Стержни имеют одинаковую длину, равное сечение и равномерно расположены по ширине  $2a$  экрана.

Разобьем рассматриваемое пространство на три области (рис. 1), в которых потенциальные функции  $A_I$ ,  $A_{II}$ ,  $A_{III}$  должны удовлетворять уравнениям

$$\frac{\partial^2 A_I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_I}{\partial y^2} = -\nu_0 \Delta \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 A_{II}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{II}}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 A_{III}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{III}}{\partial y^2} = jk^2 A_{III} \quad (3)$$

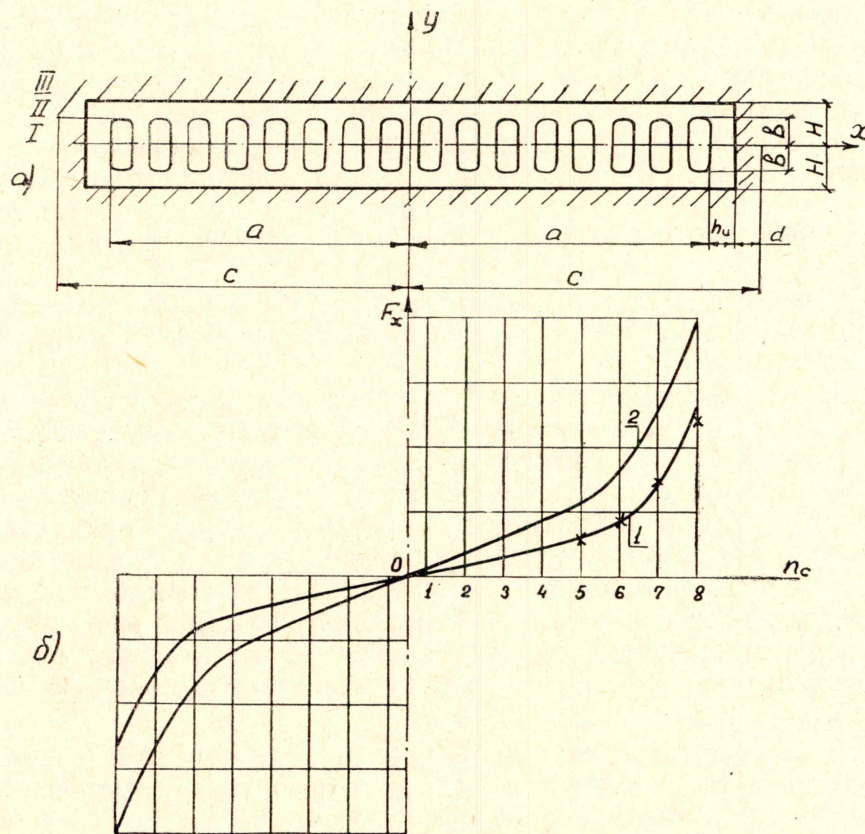


Рис. 1

Поскольку начало координат расположено в центре, плотность тока  $\Delta$  удобно задать разложением в ряд косинусов:

$$\Delta = \frac{a}{c} \Delta_0 + \sum \frac{2}{\pi} \Delta_0 \frac{1}{n} \cos na \cdot \cos nx, \quad (4)$$

где

$$\Delta_0 = Ie^{j\omega t} \frac{N}{4ab};$$

$$m = \frac{\pi}{c} \cdot n; \quad k = \sqrt{\omega \gamma \mu_0};$$

$i$  — амплитуда тока,  
 $N$  — число экранированных стержней,  
 $\omega$  — угловая частота,  
 $n$  — любое целое число,  
 $c = a + h_{из} + d$  — полупериод разложения,  
 $h_{из}$  — толщина изоляции.

Решение уравнений: (1), (2), (3):

$$A_I = -\mu_0 \Delta_0 \left[ \frac{a}{2c} x^2 + \sum \left( I_1 B \operatorname{ch} my - \frac{2 \cos ma}{\pi \cdot n \cdot m^2} \right) \cos mx \right] \quad (5)$$

$$A_{II} = \mu_0 \Delta_0 \sum I_1 (D \operatorname{sh} my + E \operatorname{ch} my) \cos mx \quad (6)$$

$$A_{III} = \mu_0 \Delta_0 \sum I_1 F e^{-\sqrt{m^2 + k^2} y} \cos mx, \quad (7)$$

где

$$I_1 = \frac{2}{\operatorname{cm}^3} k_1$$

$$k_1 = \frac{a}{c} (\sin ma - ma \cos ma) + \cos ma.$$

Неизвестные коэффициенты  $B, D, E, F$  могут быть найдены из граничных условий и в случае, когда глубина проникновения  $d = \frac{\sqrt{2}}{k} \ll c$ , характерном для рассматриваемой задачи, принимают вид:

$$B = \frac{1}{\operatorname{sh} mb + \operatorname{ch} mb} + \operatorname{sh} mb (1 - \operatorname{th} mH) \quad (8)$$

$$D = \operatorname{sh} mb; \quad (9) \quad E = \operatorname{sh} mb \operatorname{th} mH \quad (10)$$

$$F = \frac{m}{k} \operatorname{sh} mb e^{\frac{H}{d}(1+j)} e^{-j \frac{\pi}{4}}, \quad (11)$$

Картина поля (рис. 2), построенная в эквипотенциальных линиях  $A = \text{const}$  по уравнениям (5), (6), (7) для одной четверти экранируемого пространства, дает представление о характере распределения потоков лобовой части обмотки и экрана.

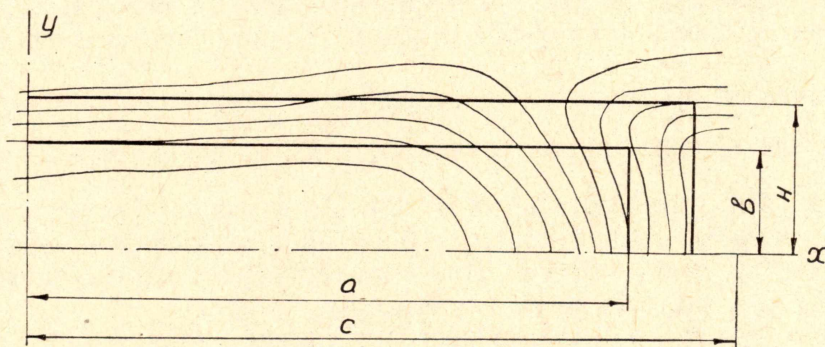


Рис. 2. Картина поля экранированных проводников

Индуктивность экранированной системы проводников определяется интегрированием квадрата индукции в пространстве, занятом полем, т. е. в I, II, III областях

$$L = \frac{1 \int \int B^2 dy dx}{\mu_0 i^2} \quad (12)$$

где  $B^2 = B_x^2 + B_y^2$ ;

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}; \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x},$$

$l$  — длина экранированных стержней.  
После преобразований получаем:

$$\dot{L} = \mu_0 l N^2 \frac{c^4}{8a^2 b^3} \sum \dot{\lambda}, \quad (13)$$

где  $\sum \dot{\lambda} = \dot{\lambda}_I + \dot{\lambda}_{II} + \dot{\lambda}_{III}$ ,

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_I = \frac{a^5 b}{3c^6} + \sum \kappa_n \left[ B^2 \text{sh} 2mb + 2\kappa_a^2 mb - 4\kappa_a B \text{sh} mb + \right. \\ \left. + \frac{8a}{c} \frac{\cos \pi n}{l_1 m^2} (B \text{sh} mb - \kappa_a mb) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{II} = \sum \kappa_n \text{sh}^2 mb [(\text{sh} 2mH - \text{sh} 2mb)(1 + \text{th}^2 mH) - \\ - 2\text{th} mH(\text{ch} 2mH - \text{ch} 2mb)]; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{\lambda}_{III} = 2\sqrt{2} d e^{-j \frac{\pi}{4}} \sum \kappa_n m \text{sh}^2 mb; \quad (16)$$

где  $\kappa_n = \frac{\kappa_1^2}{\pi^5 n^5}$ ;  $\kappa_a = \frac{\cos ma}{\kappa_1}$ .

Индуктивность  $\dot{L}$  является комплексной величиной. Мнимая ее часть  $R_{вн} = J_m L$  обусловлена потерями от вихревых токов в экране и, как показывают расчеты, составляет для реальных конструкций от 1 до 10% полной индуктивности лобовых частей.

Суммарная проводимость  $\sum \dot{\lambda}$  потока рассеяния экранируемой части обмотки определяется отношением размеров ее поперечного сечения, расстоянием до экрана, соотношением этих размеров и глубины проникновения.  $\dot{\lambda}_I$  определяет рассеяние потока непосредственно в зоне проводников обмотки,  $\dot{\lambda}_{II}$  в области между проводниками и экраном, занятой изоляцией и  $\text{Re} = \dot{\lambda}_{III}$  рассеяние в теле экрана. Практическое вычисление коэффициентов проводимости для конкретной геометрии лобовой части по формулам (14, 15, 16) не представляет особых трудностей, поскольку ряды хорошо сходятся и обычно достаточно рассчитать 3—4 члена.

В качестве примера, иллюстрирующего степень экранирования, на рис. 3 представлены кривые зависимости  $\sum \dot{\lambda}$  от отношения  $\frac{b}{c}$  и  $\frac{b}{H}$  для стержней обмотки, высота которых  $2b = 5$  см наиболее характерна для крупных ударных генераторов. Глубина проникновения в медный экран при частоте 50 гц  $d = 0,94$  см. Для сравнения рассчитаны проводимости рассеяния для частоты 25 гц (пунктирные кривые).

Как видно из графика, существует сильная зависимость индуктивности лобовых частей от расстояния между стенками экрана и медью обмотки и когда отношение  $\frac{b}{H}$  приближается к единице, то индуктивность почти полностью определяется полем внутри системы проводников и рассеянием в скин-слое.

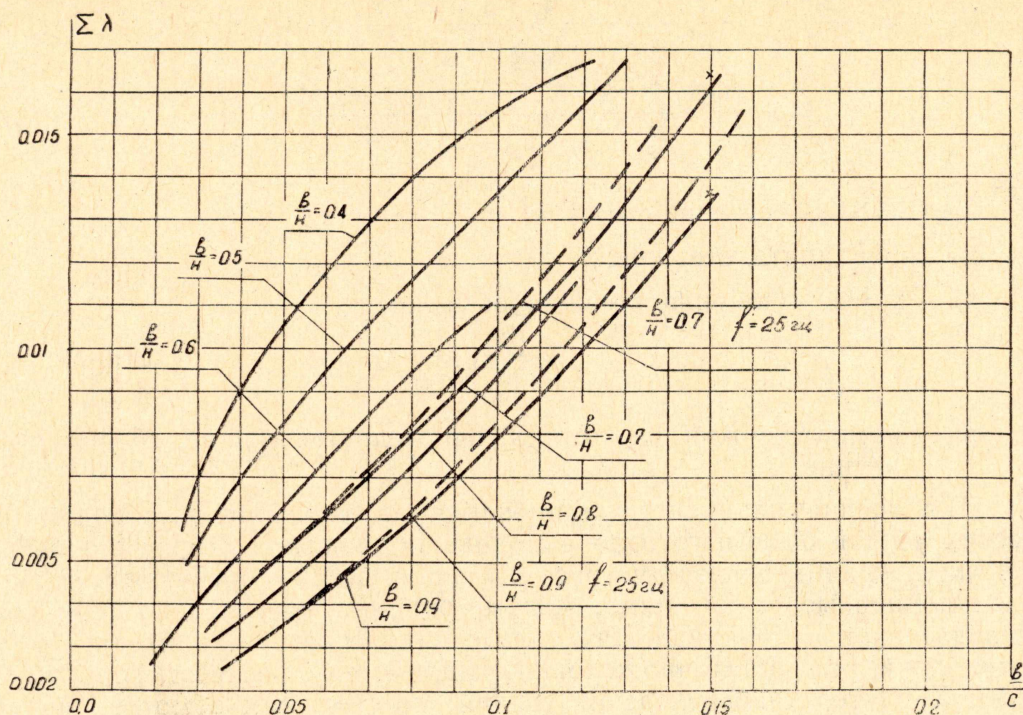


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость проводимости рассеяния от относительных размеров экранируемой системы

Экспериментальная проверка индуктивности экранированной системы проводников производилась на простой модели, представляющей собой плоскую кольцевую катушку диаметром около 35 см. Отношение высоты обмотки к ширине ее поперечного сечения составляло  $\frac{b}{a} = 0,15$ .

Относительно малые радиальные размеры позволяют пренебречь кривизной катушки, помещенной в экране. Измерение производилось на частоте 1000 гц, при которой глубина проникновения  $d = 2$  мм. Условие модельности  $\frac{b}{d} = \text{idem}$  позволяет сравнить результаты эксперимента с расчетными данными, представленными на рис. 3. Видно, что точки, соответствующие опыту, довольно хорошо совпадают с результатами расчета по изложенной методике.

Известный закон распределения поля позволяет также найти электродинамические усилия, действующие на проводники экранированной части обмотки.

$$F_x = \frac{II}{S_{cm}} \int_{-b}^{+b} \int_{x_1}^{x_2} B_{yI} dx dy \quad (17)$$

$$F_y = \frac{II}{S_{cm}} \int_{-b}^{+b} \int_{x_1}^{x_2} B_{xI} dx dy. \quad (18)$$

Составляющая усилий  $F_y$  на любой стержень равна нулю, если проводники расположены симметрично относительно стенок экрана.

После интегрирования выражения (17) тангенциальные усилия на стержни обмотки определяются как

$$F_x = \mu_0 \frac{2I^2 N}{\pi^4} \frac{c^3}{ab} \frac{l}{a_c b} \sum \frac{1}{n^4} \left( \frac{\pi n b}{c} - \text{Bch} n b \right) \cdot \kappa_1 \cdot \sin \times \\ \times \frac{\pi n (x_2 + x_1)}{2c} \sin \frac{\pi n (x_2 - x_1)}{2c}, \quad (19)$$

где

$2a_c \cdot b = S_{cm}$  — сечение стержня,

$x$  — координата стержня,

$x_2 - x_1 = a_c$  — ширина стержня обмотки,

$$x_2 + x_1 = \frac{2a}{N} (2n_c - 1),$$

$n_c$  — номер стержня, на который определяется усилие, считая от середины.

Для оценки влияния экранирования на величину электродинамических усилий была изготовлена модель, общий вид которой со снятым верхним экраном показан на рис. 4. Усилия, действующие на проводники, помещенные в массивные медные экраны, измерялись с помощью тензодатчиков и 4-канального тензометрического усилителя. Измерения показали достаточно хорошую сходимость с расчетом по формуле (19). Характер распределения усилий по стержням обмотки модели

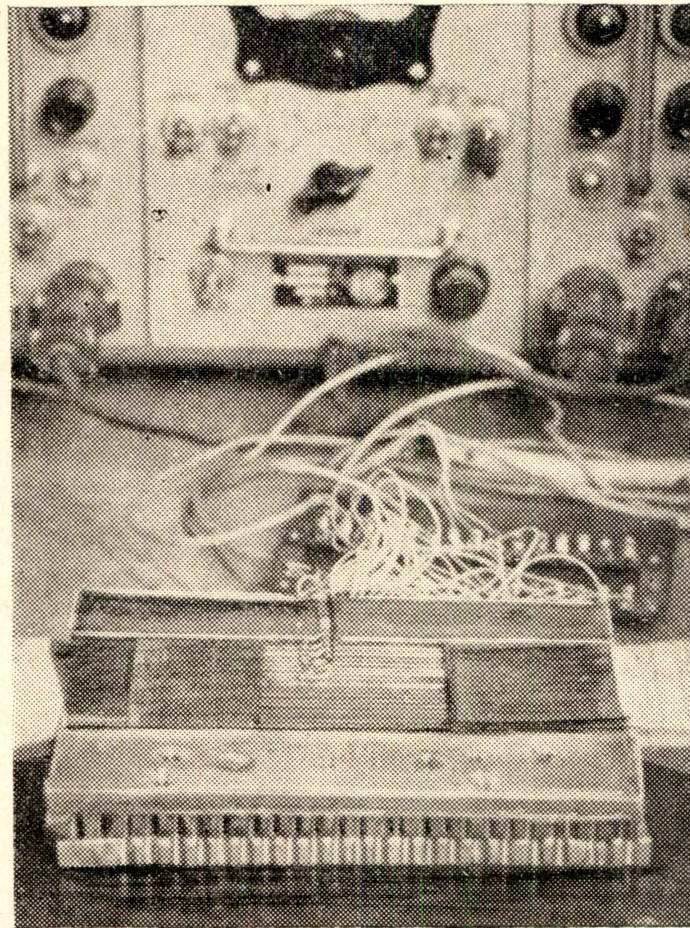


Рис. 4. Вид модели для тензометрических измерений усилий в экранированных проводниках

представлен на рис. 1,б. Относительное расстояние до экрана  $v/H$  составляло около 0,4, но даже при таком значительном удалении экранов усилия уменьшились приблизительно на 40% (кривая 1) в сравнении с усилиями на проводники, размещенными в воздухе (кривая 2). Точки, соответствующие расчету по формуле (19), достаточно хорошо совпадают с опытной кривой 2.

Теоретические и экспериментальные исследования полного экранирования проводников в токопроводящих экранах позволяют сделать вывод о целесообразности и эффективности применения немагнитных экранов высокой электропроводности, например медных. Степень экранирования лобовых частей зависит от близости экранов к обмотке. Экран существенно разгружает лобовую часть от электродинамических усилий, облегчая проблему крепления проводников. Увеличение толщины экрана больше  $3d$  не усиливает эффекта экранирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. I. Tittel. Der neue 4300 Mva Stoßleistungsgenerator für das Schaltwerk der Siemensschuckertwerke, Siemens — Zeitschrift, 1962, H. 8, s. 562—575.
2. И. М. Постников. Труды ЛПИ, № 2, 1937.
3. Mitsubishi Denki Giho, 1964, v. 38, N 9, p. 9—10.
4. К. А. Хорьков. Вопросы проектирования генераторов ударной мощности. Диссертация, г. Томск, 1964.
5. I. Nak. Abschirmung von eisenlosen Spulen durch Platten und geschlossene Gefäße, Hochfr. u. Electroak., 45. 1935.
6. В. Ф. Кулаков, Г. А. Сипайлов. Сверхпереходное индуктивное сопротивление ударного генератора с немагнитным активным слоем, Известия ТПИ, т. 212.