

А. О. ОГАНЯН, Г. А. СИПАЙЛОВ, В. Э. ХОРЬКОВА

## АНАЛИЗ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАССЕЯНИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Генератор ударной мощности — специальная электрическая машина типа синхронной, предназначенная для получения больших импульсов мощностей. В качестве источника импульсной энергии генератор ударной мощности используется для питания соленоидов установок для исследования веществ в сверхсильных магнитных полях, для питания обмоток управляющего магнитного поля ускорителей заряженных частиц, для питания соленоидов установок для исследования плазмы и т. д. Амплитуда импульса тока ударного генератора в значительной степени определяется сверхпереходным индуктивным сопротивлением генератора, основную долю которого составляет сопротивление рассеяния обмотки статора. Индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей обмотки статора  $x_1$  составляет до 50% полного индуктивного сопротивления рассеяния обмотки. На величину  $x_1$  оказывают существенное влияние ферромагнитные и токопроводящие поверхности, окружающие лобовую часть.

Представляет интерес, особенно на стадии проектирования ударного генератора, оценить влияние на индуктивность рассеяния лобовых частей ферромагнитных и токопроводящих сред, а также геометрии самой лобовой части.

Исследованию этих вопросов на примере однофазного генератора посвящена настоящая статья. Для однофазного ударного генератора наилучшим типом обмотки считается однослойная концентрическая обмотка с подразделенными лобовыми частями.

Индуктивность рассеяния лобовых частей при отсутствии токопроводящих экранов определялась методом участков [1]:

$$L = \sum_{k=1}^n L_k + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m M_{k(i+1)} \quad (1)$$

где  $L_k$  — собственная индуктивность  $k$ -го участка;  $M_{ki}$  — взаимная индуктивность  $k$ -го и  $i$ -го участков.

Влияние ферромагнитных поверхностей торца статора, щитов и корпуса учитывалось взаимной индуктивностью отрезков лобовой части с их зеркальными отображениями в ферромагнитных поверхностях с учетом их взаимного пространственного расположения. Конструкция лобовой части обмотки статора представлена на рис. 1. Индуктивность прямолинейных участков лобовой части определялась как

$$L_{k(1)} = \frac{\mu_0 w^2}{2\pi} l_s \left| \ln \frac{2l_s}{g_s} + \frac{a_s}{l_s} + \frac{q_s^2}{4l_s^2} - 1 \right|, \quad (2)$$

где  $w$  — число витков в секции;  $g_s$ ,  $a_s$ ,  $q_s$  — среднее геометрическое, среднесрифметическое и среднеквадратичное расстояние участка от самого себя;  $l_s$  — длина прямолинейного участка.

Индуктивность криволинейной части лобового вылета определялась по выражению:

$$L_{k(2)} = \frac{\mu_0 w^2}{2\pi} D_s \frac{\theta}{2} \left| \ln \frac{4D_s}{g_s} + \frac{4}{\theta} \left( \sin \frac{\theta}{2} + C \right) - 2 \right|, \quad (3)$$

где  $D_s$  — диаметр осевой линии криволинейной части лобового вылета;  $\theta$  — центральный угол, охватываемый лобовой частью;  $C$  — коэффициент

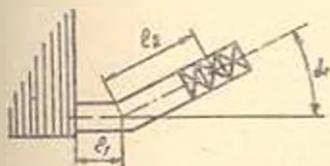
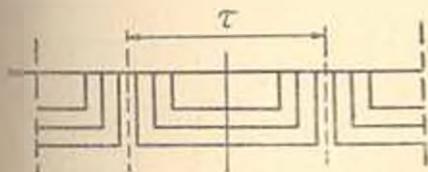


Рис. 1. Схема конструкции лобовой части

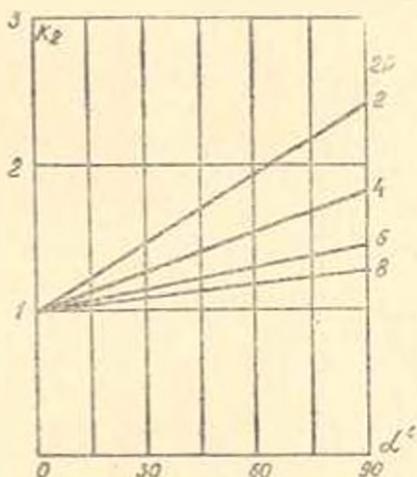


Рис. 2. Зависимость  $k_2$  от угла отгиба лобовой части в оси машины и числа полюсов

счит, зависящий от величины угла  $\theta$ ;  $g_s$  — среднее геометрическое расстояние сечения лобовой части от самого себя.

Взаимная индуктивность прямолинейных участков определялась как

$$M_{kl} = \frac{\mu_0 w^2 \cos \varphi}{2\pi} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (-1)^{k+l} F_{kl} \quad (4)$$

$$F_{pq} = x_p \ln(y_q - x_p \cos \varphi + d_{pq}) + y_q \ln(x_p - y_q \cos \varphi + d_{pq}) + \frac{2a}{\sin \varphi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left( \frac{x_p + y_q + d_{pq}}{a} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right), \quad (5)$$

где  $x_p, x_q, y_p, y_q$  — координаты, соответствующие началам и концам участков;  $d_{pq}$  — среднегеометрическое расстояние участков друг от друга;  $\varphi$  — угол между проекциями участков на одну плоскость;  $2a$  — расстояние между осевыми линиями участков. При расчете взаимной индуктивности катушек лобовой части с их зеркальными отображениями в ферромагнитных поверхностях лобовые дуги заменялись ломаной линией из трех прямолинейных участков. Расчеты проведены для двухполюсных и многополюсных ( $2p = 4; 6$  и  $8$ ) ударных генераторов при углах наклона лобовых частей к оси машины, изменяющихся от  $0$  до  $90^\circ$ . Расчеты показывают, что при одних и тех же диаметрах расточки статора (при вылете лобовой части под углом  $\alpha = 0$ ) индуктивные сопротивления рассеяния лобовых частей уменьшаются с увеличением числа полюсов машины прямо пропорционально  $p$ . С увеличением угла отгиба лобовых частей индуктивные сопротивления рассеяния растут.

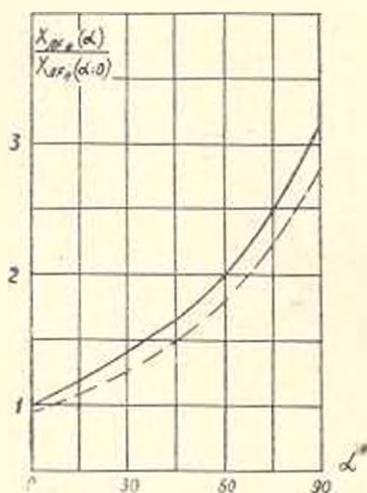


Рис. 3. Зависимость  $\chi_{\text{лр}}(\alpha)/\chi_{\text{лр}}(\alpha=0)$  и функции угла наклона лобовой части к оси машины

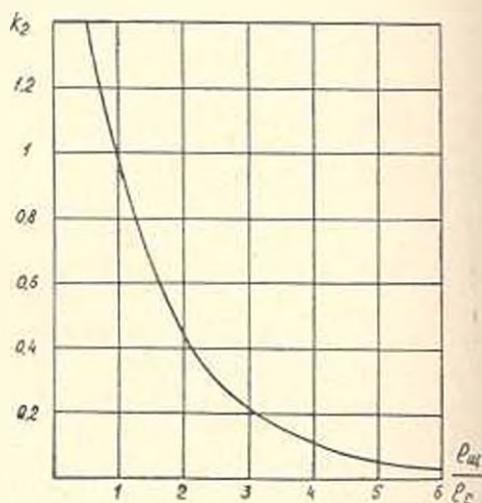


Рис. 4. Зависимость  $k_2$  и функции  $\frac{l_m}{l_c}$

Это увеличение  $\chi_{\text{л}}$  можно учесть с помощью коэффициента  $k_{\alpha}$ , построенного нами для машин с разным числом полюсов по результатам обработки многочисленных расчетов  $\chi_{\text{л}}$  на ЭВМ (рис. 2). Возрастание  $\chi_{\text{л}}$  с увеличением угла  $\alpha$  определяется с одной стороны увеличением диаметра лобовых дуг, а с другой стороны — увеличением влияния торцевой поверхности статора. Расчеты показывают, что для ударных

генераторов любой полюсности возрастание составляющей индуктивного сопротивления рассеяния лобовых частей за счет влияния торцовой поверхности статора при увеличении угла  $\alpha$  практически одинаково и характеризуется зависимостью рис. 3, где пунктиром показана практическая кривая, полученная на физической модели. Например, величина  $x_2$  при угле наклона лобовых частей, равном нулю градусов для двухполюсных ударных генераторов равна 16%, для четырехполюсных генераторов равна 12%, для шестиполюсных—9%, и для восьмиполюсных—7,5% от величины индуктивного сопротивления рассеяния лобовых частей без учета влияния ферромагнитных поверхностей. При увеличении угла до 90° величина  $x_{2F}$  возрастает более, чем в 3 раза и составляет: для двухполюсных генераторов 60%, для четырехполюсных—40%, для шестиполюсных—30% и для восьмиполюсных—25% от  $x_{20}$ .

Влияние ферромагнитной поверхности торцового щита генератора определяется расстоянием от лобовой части обмотки статора до щита  $l_{\text{ш}}$ . В случае, если  $l_{\text{ш}}$  равно расстоянию от лобовой части до торца статора  $l_c$ , влияние обеих ферромагнитных поверхностей одинаково. При увеличении  $l_{\text{ш}}$  доля индуктивного сопротивления рассеяния за счет влияния ферромагнитной поверхности щита уменьшается. Это уменьшение учитывается коэффициентом  $k_1$  (рис. 4). При выполнении генератора с однофазной концентрической обмоткой при  $\alpha = 0$  расстояние от лобовой части щита примерно в 2–3 раза больше расстояния до торца статора. С увеличением угла это расстояние еще больше увеличивается. Следовательно, доля индуктивного сопротивления рассеяния лобовой части за счет влияния щита генератора невелика. При  $\alpha = 0$  и  $l_{\text{ш}}/l_c = 2$  для двухполюсных генераторов она составляет 7%, для четырехполюсных—5,5%, для шестиполюсных 3,6% и для восьмиполюсных—3,4% от  $x_{20}$ . При  $\alpha = 90^\circ$  влиянием щита на  $x_2$  можно пренебречь. Влияние ферромагнитной поверхности корпуса на  $x_2$  незначительно и при отгибе лобовых частей на угол 90° составляет менее 4% от  $x_{20}$ . При уменьшении угла  $\alpha$  это значение уменьшается практически до нуля.

Таким образом, нами получены долевые значения величины составляющих индуктивного сопротивления рассеяния лобовых частей обмотки статора за счет влияния ферромагнитных поверхностей, окружающих лобовую часть при изменении угла отгиба от нуля до 90°. Соотношение между индуктивным сопротивлением рассеяния лобовых частей с учетом окружающих ферромагнитных поверхностей и индуктивным сопротивлением „идеализированной“ лобовой части, т. е. лишенной ферромагнитного окружения, определяется коэффициентами  $k_{F1}$

$$x_2 = k_{F1} x_{20} \quad (6)$$

Величины коэффициента  $k_{F1}$ , полученные обработкой расчетов  $x_2$  на ЭВМ и физических моделях, представлены в табл. 1.

Таблица 1

2p	Величины коэффициента $k_{\text{гг}}$ при значениях $\alpha$					
	0°	30°	45°	60°	75°	90°
2	1,23	1,29	1,32	1,38	1,46	1,66
4	1,18	1,22	1,25	1,29	1,35	1,46
6	1,13	1,16	1,22	1,25	1,25	1,38
8	1,11	1,14	1,16	1,19	1,23	1,30

При заключении лобовой части обмотки в токопроводящие экраны, например, медные экраны-каппы, переменное электромагнитное поле лобового рассеяния затухает в направлении распространения в токопроводящей среде согласно зависимости  $e^{-k_1 z}$  [2], где  $z$ —толщина экрана в направлении распространения поля;  $k_1$ —коэффициент затухания:

$$k_1 = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu_0 \gamma}{2}}; \quad (7)$$

$\omega$ —угловая частота тока обмотки статора;  $\gamma$ ,  $\mu_0$ —электропроводность и магнитная проницаемость материала.

Электромагнитное поле, проникающее через экран, уменьшается до 50% своего значения до экрана при толщине экрана  $3h$ , где  $h$ —

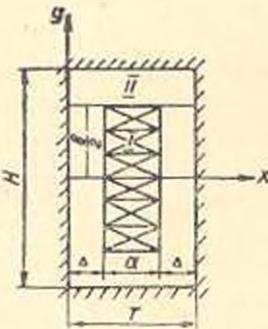


Рис. 5. Расчетная схема решения задачи экранирования лобовых частей

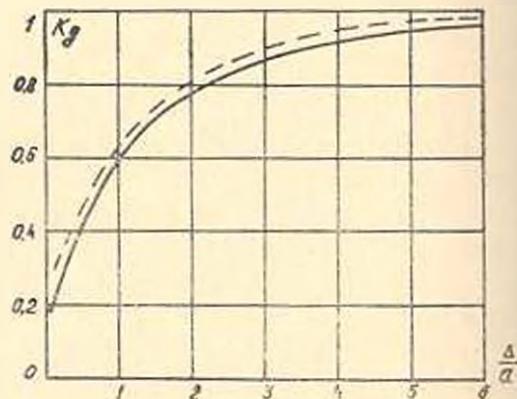


Рис. 6. Зависимость  $k_g$  в функции  $\Delta/\alpha$

глубина проникновения электромагнитного поля в тело экрана. Для медных экранов ( $\gamma = 0,58 \cdot 10^6 \text{ 1/ом см}$ ;  $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ гн/см}$ ) эта величина составляет 2,8 см. При достаточной толщине токопроводящих капп можно считать потоки лобового рассеяния к ферромагнитным поверхностям полястью уничтоженными. Благодаря этому, индуктивное сопро-

тивление рассеяния лобовых частей снижается на величину  $\frac{1}{K_{Fe}}$  (табл.

1). Кроме экранирующего действия, каппы оказывают деформирующее действие на потоки лобового рассеяния, являясь по отношению к лобовым частям обмотки статора короткозамкнутыми контурами. Демпфирующее действие токопроводящих экранов определяется путем интегрирования уравнений Максвелла для электромагнитного поля в экранируемом пространстве [3]. В выбранной системе координат рис. 5 для области I справедливо уравнение Пуассона, а для области II уравнение Лапласа, т. е.

$$\Delta A_I = -\mu_0 \delta; \quad \Delta A_{II} = 0, \quad (8)$$

где  $\delta$  — плотность тока в рассматриваемой области;

$$\delta = \frac{4I}{ab} \sum_{n=1,3,5} \frac{1}{n} \cos k \Delta \sin kx; \quad (9)$$

$k = \frac{n\pi}{T}$  — полу период разложения;

$\Delta$  — расстояние от поверхности стержня с током до токопроводящей поверхности экрана.

При определении векторного потенциала исходим из следующих граничных условий:

1. В плоскости  $y=0$  отсутствует тангенциальная составляющая индукции, т. е.

$$\frac{\partial A_I}{\partial y} = 0. \quad (10)$$

2. На границе областей I и II касательные и нормальные составляющие индукции непрерывны, т. е. при  $y=b/2$

$$\frac{\partial A_I}{\partial y} = \frac{\partial A_{II}}{\partial y}; \quad \frac{\partial A_I}{\partial x} = \frac{\partial A_{II}}{\partial x}. \quad (11)$$

3. На поверхности токопроводящего экрана значение векторного потенциала равно 0, т. е. при  $y=H/2$

$$A_{II} = 0. \quad (12)$$

Решив систему дифференциальных уравнений и определив составляющие индукции  $B_x$  и  $B_y$  в областях I и II, находим выражение для расчета индуктивности рассматриваемой системы через энергию магнитного поля:

$$L = \frac{2}{\mu_0 I^2} \int_V B^2 dV. \quad (13)$$

Индуктивность экранированной лобовой части на единицу длины получается равной

$$L = \frac{8\mu_0}{\pi^2} \frac{T^2}{a^2 b^2} \sum_{n=1,2,3} \frac{1}{n^2} \cos^2 k\Delta \left( N_I + \frac{N_{II}}{2} \right), \quad (14)$$

где

$$N_I = \frac{kb}{2} + \frac{\operatorname{ch} k\Delta \operatorname{sh} k \frac{b}{2}}{\operatorname{ch} k \frac{H}{2}} \left( \frac{\operatorname{ch} k\Delta \operatorname{ch} k \frac{b}{2}}{\operatorname{ch} k \frac{H}{2}} - 2 \right); \quad (15)$$

$$N_{II} = \frac{\operatorname{sh}^2 k \frac{b}{2}}{\operatorname{ch}^2 k \frac{H}{2}} \operatorname{sh} 2k\Delta.$$

Полученное выражение дает возможность рассчитать индуктивное сопротивление рассеяния лобовой части при различных расстояниях от меди лобовых частей до токопроводящих экранов, а следовательно, оценить демпфирующее действие капи. На рис. 6 представлены значения коэффициента  $k_x$ , учитывающего уменьшение индуктивного сопротивления рассеяния лобовых частей токопроводящими каппами в зависимости от геометрии лобовой части и величины  $\Delta$ . В современных ударных генераторах ширина меди в пазу достигает 20 мм. При напряжении на зажимах обмотки статора в 15,7 кВ двусторонняя толщина изоляции в пазу достигает 14 мм, а в зоне лобовых частей до 20 мм. То есть отношение между  $\Delta$  и  $a$  близко к 1. Следовательно, в идеальном случае при сверхпроводящих экранах  $k_x$  снижается за счет демпфирующего действия экранов в 2,0—2,5 раза. Проведенные эксперименты с медными экранами показали снижение  $k_x$  в 1,8 раз.

Таким образом, индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей с учетом экранирующего и демпфирующего действий токопроводящих капи может быть найдено как

$$x_{II} = x_I \frac{k_x}{k_{Fe}}. \quad (16)$$

С целью проверки теоретических положений и расчетов на ЭВМ были проведены экспериментальные исследования на физических моделях лобовых частей статора ударного генератора, которые дали удовлетворительное совпадение с результатами расчета.

Полученные данные могут быть использованы при проектировании ударного генератора для оценки влияния конструктивных факторов на индуктивное сопротивление лобовых частей обмотки статора.

Լ. Չ. ՕՇԱՆՅԱՆ, Գ. Ա. ՍԻՊԱՏՆԻՍԻ, Վ. Չ. ԿՈՐԿՈՎԱ

**ՀԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ԳՆՆԵՐԱՏՈՐԻ ՍՏԱՏՈՐԻ ՓԱԹՈՒՅԹԻ ՃԱԿԱՏԱՅԻՆ ՄԱՍԵՐԻ ՑՐՄԱՆ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎ ԳԻՄԱԳՐՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒՅՈՒԹՅՈՒՆ**

**Ա. մ փ ո փ ու մ**

Հոդվածում վերլուծության են ենթարկված հարվածային զններատորի ստատորի փաթույթի ճակատային մասերի ցրման ինդուկտիվ դիմադրության բաղադրիչները: Ուսումնասիրությունները կատարված են պաշտի տեսության մեթոդով և ֆիզիկական մոդելացմամբ: Թվային անալիզը կատարված է ԷԷՄ-ի վրա:

Ստացված են ստատորի փաթույթի ճակատային մասերի ցրման ինդուկտիվ դիմադրության բաղադրիչների մեծությունների բաժնեհասարակությունները՝ հաշիվ ճակատային մասը շրջափակող ֆեռոմագնիսական մակերևութների ազդեցության, երբ ճակատային մասի ծովածքի անկյունը փոփոխվում է 0-ից մինչև 90°, ճակատային մասերը հոսանքատար էկրաններով շրջափակելու ցույց է տրված մարման գործակցի կախումը ճակատային մասերի և էկրանի մակերևութի միջև եղած հեռավորությունից:

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1. Калантаров П. А., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей (справочная книга), Изд. „Энергия“, Л., 1970.
2. Купалян С. Д. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Изд. „Энергия“, 1970.
3. Шимони К. Теоретическая электротехника. Изд. „Мир“, 1964.