

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ПАРАМЕТРЫ
ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА
УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА**

Л. О. ОГАНЯН

(Представлена объединенным семинаром кафедр электрических машин и аппаратов
и общей электротехники)

Амплитуда импульса тока ударного генератора в значительной степени определяется его сверхпереходным индуктивным сопротивлением, большую часть которого составляет индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей. В генераторах с нормальной зубцовой зоной оно составляет около 50% полного индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, а в генераторах с вынесенной в воздушный зазор обмоткой статора — 70—80%.

Снижение рассеяния лобовых частей обмотки статора ударного генератора достигается заключением лобовых частей переключателей в экраны из материала с высокой электропроводностью (медь, бронза и т. д.).

Действие экранов на параметры лобовой зоны обмотки статора ударного генератора можно учесть коэффициентами демпфирования и экранирования.

Первый учитывает реакцию вихревых токов, наведенных в теле экрана, на поле рассеяния лобовых частей, приводящее к уменьшению их индуктивного сопротивления, второй определяет степень экранирования конструктивных элементов торцевой зоны ударного генератора (щиты, подшипники), выполненных из ферромагнитного материала от потоков рассеяния лобовых частей. Последнее существенно снижает величину потерь в указанных элементах.

Кроме того, следует учесть, что экраны позволяют надежно крепить лобовую часть и предохраняют ее от разрушения электродинамическими усилиями.

Определение вышеуказанных коэффициентов и исследование их зависимости от факторов, характеризующих лобовую зону машины (геометрии лобовых частей, толщины экрана, частоты возбуждающего поля и т. д.), представляет большой интерес на стадии проектирования ударных генераторов.

В настоящей работе исследование коэффициентов демпфирования и экранирования потоков рассеяния лобовых частей проведено на примере однофазного ударного генератора, имеющего однослойную концентрическую обмотку статора с подразделенными лобовыми частями, отогнутыми на угол 90° относительно оси машины.

Расчет индуктивности рассеяния лобовых частей, заключенных в экраны, приводит к исследованию электромагнитных полей лобовой зо-

ны ударного генератора, так как индуктивность определяется через энергию магнитного поля по известному закону [1].

Следует отметить, что в современных ударных генераторах ширина меди в пазу достигает около 20 мм. При напряжении на зажимах обмотки статора в 15,7 кВ двусторонняя толщина изоляции в зоне лобовых частей также составляет около 20 мм. Толщина медных экранов колеблется от 10 до 30 мм. То есть размеры элементов, входящих в рассматриваемую зону, соизмеримы. Пренебрежение любой из них приводит к большим неточностям конечных результатов. По этой причине становится невозможным использование результатов исследования ряда авторов в области экранирования применительно к лобовым частям обмотки статора ударного генератора.

Допущения, принимаемые нами при решении задачи, относятся в основном к конфигурации лобового пространства и лобовых соединений.

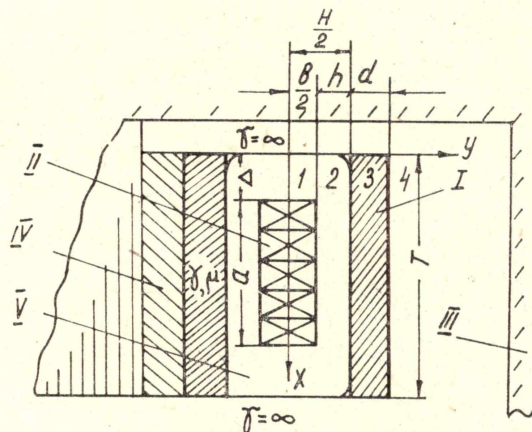


Рис. 1. Расчетная схема решения задачи: I — экраны, II — лобовые перемычки, III — торцовый щит, IV — нажимная плита, V — изоляция, VI — железо статора

многополусных, имеют небольшую кривизну, а размер прямолинейных участков лобовых соединений обмотки статора, зависящий от напряжения машины и технологических факторов, для ударных генераторов с отогнутыми на угол 90° лобовыми соединениями мал по сравнению с криволинейной частью.

Принятые допущения о «сверхпроводимости» ($\gamma = \infty$) экранов по оси y позволяют представить поле в форме тригонометрического ряда. Представление поля в виде суммы ряда пространственных гармоник положено в основу последующего решения задачи.

Расчетная схема лобовой зоны, составленная на основе принятых допущений, представлена на рис. 1. Поле в пространстве между лобовыми частями и экранами в полученной системе можно считать плоскопараллельным. Решение задачи производится с помощью функции векторного потенциала магнитного поля A . При принятой конфигурации рассматриваемой системы удобно электромагнитное поле исследовать в декартовой системе координат, а так как система расположена симметрично относительно оси x , то достаточно рассчитать и исследовать поле только в одной из частей рассматриваемого пространства. Распределение индукции в лобовой зоне можно найти, предварительно определив векторный потенциал магнитного поля как функцию координат. Определение векторного потенциала производится в четырех областях, на

Конфигурация лобовых соединений принимается несколько упрощенной: предполагается отсутствие прямолинейных участков обмотки статора, служащих продолжением ее активной части, лобовое пространство считается развернутым в тангенциальном направлении, т. е. в виде прямоугольного бесконечного параллелепипеда.

Принятые допущения не вносят ощутимой погрешности в расчет поля для данной задачи, так как лобовые соединения концентрической обмотки, применяемой в ударных генераторах, выполненных в предельных габаритах, особенно

которые разбивается исследуемое пространство [2]. В области I при $0 < y < \frac{b}{2}$ справедливо уравнение

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_1}{\partial y^2} = -\mu_0 \dot{\delta}. \quad (1)$$

В областях II и IV при $\frac{b}{2} < y < \frac{H}{2}$ и $\frac{H}{2} + d < y < \infty$ справедливо уравнение

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_{2,4}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_{2,4}}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

В области III при $\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2} + d$ справедливо уравнение

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_3}{\partial y^2} = -j\omega\gamma\mu\dot{A}_3, \quad (3)$$

где

$\dot{\delta}$ — плотность тока,

γ, μ — электрическая и магнитная проводимость материала экрана,

ω — круговая частота.

Представим плотность тока в виде тригонометрического ряда

$$\dot{\delta} = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{\delta}_n(y) \sin kx, \quad (4)$$

где $\dot{\delta}_n(y)$ в общем случае зависит от y и определяется известными формулами Фурье.

Векторный потенциал магнитного поля является периодической функцией от x с тем же периодом, что и $\dot{\delta}$, тогда общее выражение для векторного потенциала будет

$$\dot{A} = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{A}_n(y) \sin kx. \quad (5)$$

Решение уравнений (1)–(3) с учетом (4) и (5) не вызывает особых затруднений. Используя равенства нормальных и тангенциальных составляющих векторов индукций на границах смежных зон, а также учитывая, что при $y \rightarrow \infty$ $\dot{A}_4 = 0$ и при $y = 0$ $\frac{\partial \dot{A}_1}{\partial y} = 0$, определяются постоянные интегрирования для векторных потенциалов соответствующих областей.

Составляющие индукции в любой точке рассматриваемого пространства определяются как

$$\dot{B}_x = \frac{\partial \dot{A}}{\partial y}, \quad \dot{B}_y = -\frac{\partial \dot{A}}{\partial x}. \quad (6)$$

Индуктивность экранированной системы проводников определяется интегрированием квадрата индукции и в пространстве, занятом полем, то есть в областях 1, 2, 3 и 4.

$$\dot{L}_{\text{э}} = \frac{1}{\mu_0 I^2} \sum_{i=1}^4 \int \dot{B}_i^2 d\tau, \quad (7)$$

где

$\dot{B}_i^2 = \dot{B}_{xi}^2 + \dot{B}_{yi}^2$ — индукция в исследуемой области.
 i — номер рассматриваемой области.

После преобразований получаем

$$\dot{L}_{\text{э}} = 8 \mu_0 l \frac{N}{I^2} \Sigma \dot{\lambda}_{\text{э}i}, \quad (8)$$

где

λ — проводимость потока рассеяния лобовых частей.

$$\Sigma \dot{\lambda}_{\text{э}i} = \dot{\lambda}_{\text{э}1} + \dot{\lambda}_{\text{э}2} + \dot{\lambda}_{\text{э}3} + \dot{\lambda}_{\text{э}4};$$

$$\dot{\lambda}_{\text{э}1} = \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{1}{n^5} \left[M \left(1 + \frac{M}{2} \operatorname{ch} k \frac{b}{2} \right) \operatorname{sh} k \frac{b}{2} + k \frac{b}{2} \right] \cos^2 k \Delta; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{\text{э}2} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \{ [2 m^2 \operatorname{sh} k h + (1+m^2) \operatorname{ch} k h] \operatorname{sh}^2 \beta d \operatorname{sh} k h + \\ + m e^{2kh} [m \operatorname{ch} \beta d + (1+m^2) \operatorname{sh} \beta d] \operatorname{ch} \beta d \} \frac{\operatorname{ch}^2 k \frac{b}{2}}{M^2} \cos^2 k \Delta; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{\text{э}3} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \left[\frac{1}{4} (1+m^4) (2 \beta d - \operatorname{sh} 2 \beta d) - \frac{m}{2} (2 \beta d + \operatorname{sh} 2 \beta d) + \right. \\ \left. + (1+m^2) (\operatorname{ch} 2 \beta d - 1) \right] \frac{\operatorname{sh}^2 k \frac{b}{2}}{M^2} \cos^2 k \Delta; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{\lambda}_{\text{э}4} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} m^2 \frac{\operatorname{sh}^2 k \frac{b}{2}}{M^2} \cos^2 k \Delta. \quad (12)$$

В полученных выше выражениях (8) — (12) приняты следующие обозначения:

$$M = m e^{k \frac{H}{2}} \operatorname{ch} \beta d + \left(\operatorname{sh} k \frac{H}{2} + m^2 \operatorname{ch} k \frac{H}{2} \right) \operatorname{sh} \beta d;$$

$$M_1 = \frac{\operatorname{sh} k \frac{b}{2}}{M e^{k \frac{H}{4}}} (1 - m^2) \operatorname{sh} \beta d - e^{-k \frac{b}{2}};$$

$$N = \frac{T^4}{\pi^5} \frac{I^2}{(ab)^2}; \quad k = \frac{n \pi}{T}; \quad m = \frac{\beta}{k};$$

$$\beta = \sqrt{k^2 + p^2} \quad p^2 = j \omega \gamma \mu.$$

Индуктивность является комплексной величиной. Мнимая ее часть обусловлена потерями от вихревых токов в экране. Она составляет до 10% полной индуктивности лобовых частей.

При отсутствии экранов 1 (рис. 1) выражения для (9) и (10) принимают вид

$$\lambda_1 = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \left[2e^{-k\frac{b}{2}} \left(\frac{e^{-k\frac{b}{2}}}{2} \operatorname{ch} k\frac{b}{2} - 1 \right) \operatorname{sh} k\frac{b}{2} + k\frac{b}{2} \right] \cos^2 k\Delta; \quad (13)$$

$$\lambda_2 = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} e^{-kb} \operatorname{sh}^2 k\frac{b}{2} \cos^2 k\Delta. \quad (14)$$

Индуктивность в этом случае, согласно (8), равна

$$L_1 = 8\mu_0 l \frac{N}{I^2} (\lambda_1 + \lambda_2). \quad (15)$$

Из уравнений (8) и (15) можно найти общее выражение для коэффициента, учитывающего уменьшение индуктивности лобового рассеяния

$$k_g = Re \frac{L_3}{L_1} = Re \frac{\sum_{i=1}^4 \lambda_{3i}}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (16)$$

и коэффициента экранирования

$$k_3 = Re \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{32}}. \quad (17)$$

Следует отметить, что выражение (17) при принятых допущениях решения задачи справедливо лишь в том случае, когда ферромагнитные поверхности щитов удалены на сравнительно большое расстояние от поверхности лобовых перемычек. В связи с этим целесообразнее коэффициентом экранирования характеризовать степень уменьшения потоков рассеяния лобовых частей в области торцового щита и других ферромагнитных поверхностей в торцовой зоне ударного генератора

$$k_3 = \frac{|B_{34}|}{|B_{32}|}, \quad (18)$$

где

$|B_{34}|$, $|B_{32}|$ — соответственно модули индукции в областях 4 и 2 при заключении лобовых частей в экраны.

$$|B_{34}| = N_1 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{m}{n^2} e^{-k[y - (\frac{H}{2} + d)]} \frac{\operatorname{sh} k\frac{b}{2}}{M} \cos k\Delta; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} |B_{32}| = N_1 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} & \left\{ \frac{1}{2} \left[(1+m^4) \operatorname{ch} 2k \left(\frac{H}{2} - y \right) + (1-m^4) \cos 2kx + \right. \right. \\ & \left. \left. + 2m^2 \operatorname{sh} 2k \left(\frac{H}{2} - y \right) \right] \operatorname{sh}^2 \beta d + m e^{k(\frac{H}{2} - y)} [(\sin^2 kx + m^2 \cos kx) \cdot \right. \\ & \left. \left. \operatorname{sh} k \left(\frac{H}{2} - y \right) + (\cos^2 kx + m^2 \sin^2 kx) \operatorname{ch} k \left(\frac{H}{2} - y \right) \right] \operatorname{sh} 2\beta d + \right. \end{aligned}$$

$$+m^2 e^{2k\left(\frac{H}{2}-y\right)} \operatorname{ch}^2 \beta d \left| \frac{1}{2} \frac{\operatorname{sh} k \frac{b}{2}}{M} \cos k \Delta; \right. \quad (20)$$

$$N_1 = \frac{4 \mu_0 \delta_0}{\pi^2} T. \quad (21)$$

В частности, при определении величины индукции $B_{\text{э}1}$ и $B_{\text{э}2}$ на границах (соответственно $y = \frac{H}{2}$, $y = \frac{H}{2} + d$) и подстановки их значений в выражение (18), коэффициент $k_{\text{э}}$ будет характеризовать проникновение поля в тело экрана.

Аналитические выражения при определении коэффициентов $k_{\text{д}}$ и k по формулам (16) и (18) получились довольно громоздкие, однако реализация их на ЭЦВМ не представляла большой трудности.

Расчеты показывают исключительное влияние расстояния между лобовыми частями обмотки статора и экранами, а также и геометрических размеров стержней лобовых

Таблица 1

h	L (о. е.)			
	$\Delta=0,5$		$\Delta=1$	
	$\frac{a}{b}=3$	6	3	6
0,1	0,5	0,35	0,6	0,4
0,5	1,45	0,9	1,6	1,08
1,0	2,25	1,42	2,45	1,51

размеров стержней лобовых переемычек на величину индуктивности рассеяния. В табл. 1 приведены расчетные данные индуктивности рассеяния при увеличении h от $0,1b$ ($h=0,1b$ соответствует минимально допустимой толщине изоляции лобовой части обмотки) до $1b$ (где b — ширина стержня лобовой переемычки принята за еди-

ницу), при $\Delta=0,5$ и $0,6$ при отношении поперечных размеров стержня $\frac{a}{b}=3$ и 6 . Расчеты приведены при частоте возбуждающего поля 1000 гц и толщине медного экрана $d=12$ мм.

Как видно из таблицы, с возрастанием величины h в указанных пределах индуктивность системы увеличивается почти в $4-4,5$ раза.

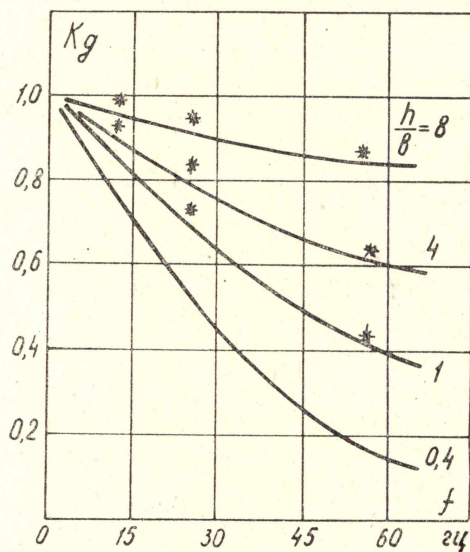


Рис. 2. Зависимость коэффициента $k_{\text{д}}$ от частоты

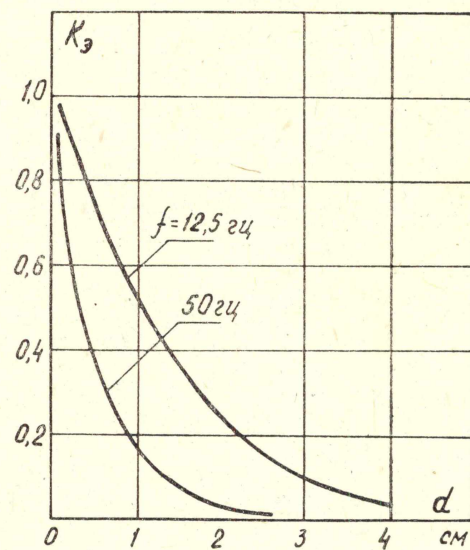


Рис. 3. Зависимость коэффициента $k_{\text{э}}$ от толщины экранов

На рис. 2 показана зависимость коэффициента демпфирования в функции от частоты при отношении $\frac{a}{b} = 4$. Как видно, с уменьшением частоты эффективность применения экранов снижается. Так, при одинаковой толщине экранов и геометрии лобовой части индуктивность уменьшается при 50 $\mu\text{ц}$ в 1,3—1,4 раза, чем при 25 $\mu\text{ц}$ и в 1,9—2, чем при 12,5 $\mu\text{ц}$. Зависимость коэффициента экранирования k_e от толщины экрана d представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что применение экранов с толщиной, равной 3—4 значениям глубины проникновения электромагнитной волны, практически полностью экранирует окружающее пространство от потоков рассеяния лобовых частей.

С целью проверки теоретических положений и расчетов на ЭЦВМ были проведены экспериментальные исследования на физической модели лобовой части обмотки статора ударного генератора. При отношении $\frac{h}{b} = 0,5$ и $\frac{a}{b} = 4$ (данные модели) результаты экспериментальных исследований дали удовлетворительное совпадение с результатами расчета (на рис. 2 экспериментальные данные показаны знаком*).

Таким образом, коэффициенты демпфирования и экранирования являются сложными функциями от многих величин, характеризующих лобовую зону генератора ударной мощности, основными из которых являются материал экрана и его толщина, частота, расстояние между стенками экрана и лобовыми перемычками.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Говорков. Электрические и магнитные поля. М., «Энергия», 1968.
 2. К. Бинс, П. Лауренсон. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М., «Энергия», 1970.
-