

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, В. З. ХОРЬКОВА

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

Точный расчет индуктивного сопротивления лобовой части обмотки статора представляет значительные трудности, связанные со сложной картиной магнитного поля в зоне лобовых частей. В практике проектирования электрических машин при определении индуктивности рассеяния лобовых частей обмоток применяются, как правило, эмпирические формулы, которые позволяют с достаточной точностью рассчитывать только при условии геометрического подобия вылетов лобовых частей. При изменении конфигурации лобовой части эти формулы требуют корректировки. Кроме того, эти формулы не отражают физической картины полей рассеяния, поэтому с их помощью невозможно оценить влияния отдельных факторов на величину сопротивления рассеяния лобовых частей, в частности, невозможно оценить влияния окружающих лобовую часть ферромагнитных поверхностей.

Оценка влияния отдельных факторов на индуктивность рассеяния лобовых частей особенно необходима при проектировании лобовых частей обмотки статора ударного генератора, когда требуется получить минимальную величину индуктивности рассеяния.

В настоящей работе изложены результаты исследования влияния ферромагнитной среды на индуктивность рассеяния лобовых частей однослойной концентрической обмотки статора ударного генератора с числом пар полюсов $2p = 2 \div 8$. Теоретическая часть исследования выполнена на цифровых вычислительных машинах, экспериментальная часть — на физических моделях, построенных с учетом законов физического моделирования. В основу методики расчета индуктивности рассеяния лобовых частей положены выражения для индуктивностей сложных контуров, определяемых методом участков.

Собственная индуктивность контура, состоящего из « n » участков и взаимная индуктивность с другими контурами, состоящими из « m » участков, может быть представлена в виде

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

где L_k — собственная индуктивность k -го участка,

M_{ki} — взаимная индуктивность k -го и i -го участков.

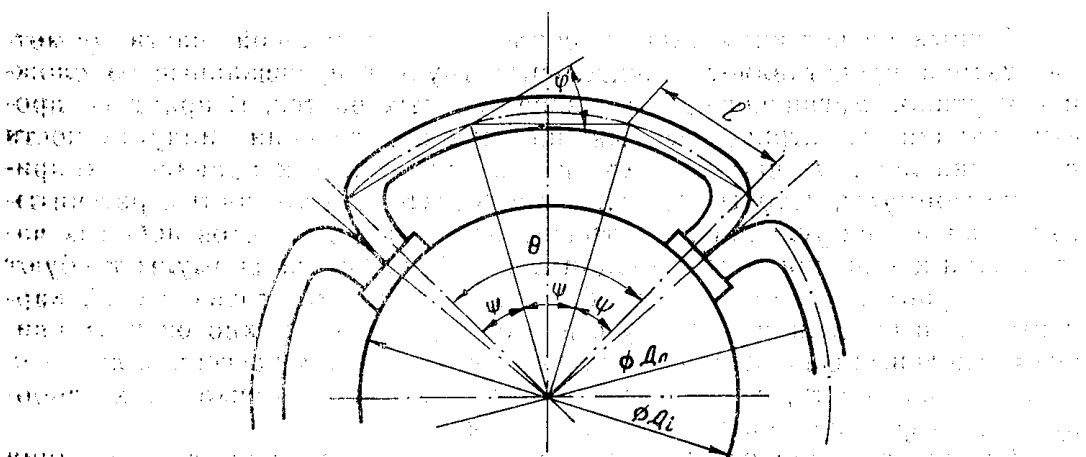
Влияние торцевого железа на индуктивность рассеяния лобовых частей учитывается взаимной индуктивностью отрезков лобовой части с их зеркальными отображениями в ферромагнитной поверхности. При этом делаются общепринятые допущения:

1. Длины участков лобовой части много больше линейных размеров их поперечных сечений.
2. Расстояния от элементов одного контура до элементов другого (в частности, до зеркальных отображений отрезков) много больше линейных размеров поперечных сечений отрезков.
3. Магнитная проницаемость торцевой поверхности статора бесконечна.
4. Вихревые токи в стали торцевой поверхности отсутствуют.

Составление программы расчета

Вылет лобовой части катушки с принятыми обозначениями геометрических величин показан на рис. 1. Расстояние от осевой линии лобовой части до торцевого железа равно:

$$a = l_1 + l_2 \cos \alpha. \quad (2)$$



Вывод: для расчета вылета лобовой части катушки необходимо знать длину лобовой части катушки и радиус статора.

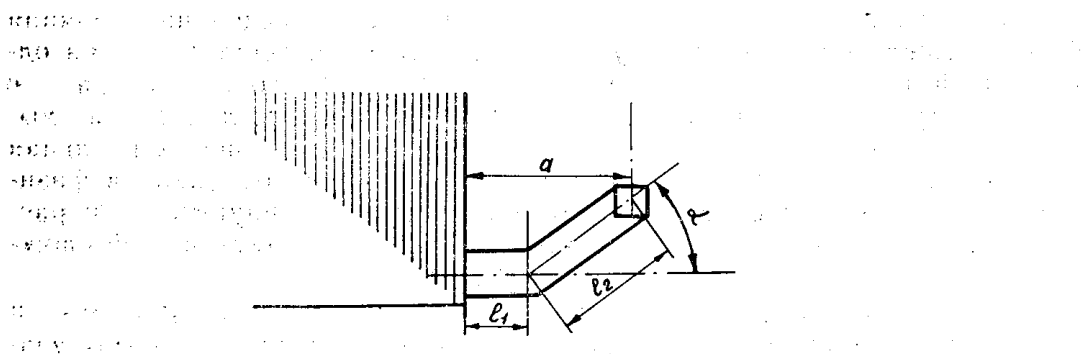


Рис. 1. Вылет лобовой части обмотки статора ударного генератора

Диаметр по осевой линии криволинейной лобовой части

$$D_{\text{л}} = D_1 + h_{\text{п}} + l_2 \sin \alpha. \quad (3)$$

Центральный угол

$$\theta = \frac{\pi}{2} \left(1 - 0,5 \frac{b_{\text{п}}}{\tau} \right). \quad (4)$$

При расчете взаимной индуктивности лобовой части с ее зеркальным отображением лобовую часть аппроксимируем тремя отрезками длиной

$$l = \frac{1}{3} \frac{\pi D_{\text{л}}}{2p} \left(1 - 0,5 \frac{b_{\text{п}}}{\tau} \right). \quad (5)$$

В этих выражениях

$D_{\text{л}}$ — диаметр расточки статора;

$h_{\text{п}}$ — высота паза статора;

$b_{\text{п}}$ — ширина паза статора;

p — число пар полюсов;

α — угол наклона лобовой части к оси машины.

Собственная индуктивность прямолинейных участков лобовой части l_1 и l_2 определяется по выражению:

$$L_{1(2)} = \frac{\mu_0}{2\pi} w_1 l_{1(2)} \left[l_{\text{п}} \frac{2l_{1(2)}}{g_{1(2)}} + \frac{a_{1(2)}}{l_{1(2)}} - \frac{q_{1(2)}^2}{4l_{2(2)}} - 1 \right], \quad (6)$$

где $g_{1(2)}$; $a_{1(2)}$; $q_{1(2)}$ — соответственно среднегеометрическое, среднеарифметическое и среднеквадратичное расстояние отрезков друг от друга.

Взаимная индуктивность лобовой части и ее зеркального отображения рассматривается в виде суммы взаимных индуктивностей ряда прямолинейных участков с учетом их взаимного пространственного расположения (рис. 2):

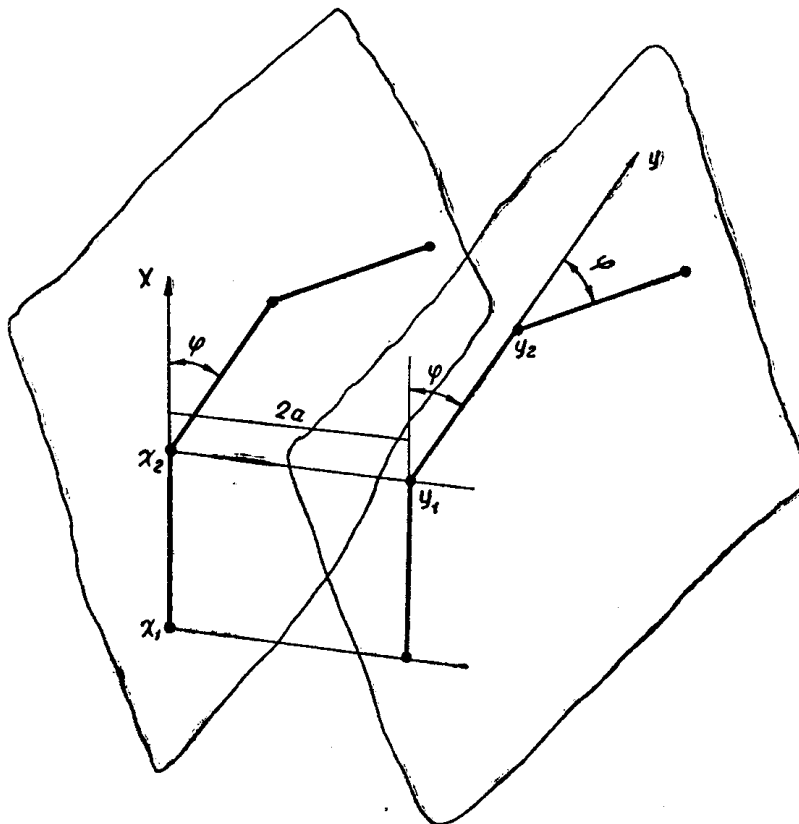


Рис. 2. К расчету взаимной индуктивности лобовой части и ее зеркального отображения

$$M_{\text{ге}} = \frac{\mu_0}{2\pi} w_1^2 \frac{\cos \varphi}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n (-1)^{p+q} F_{pq}, \quad (7)$$

$$F_{pq} = x_p \ln(y_q - x_p \cos \varphi + D_{pq}) + y_q \ln(x_p - y_q \cos \varphi + D_{pq}) + \frac{2a}{\sin \varphi} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_p + y_q + D_{pq}}{a} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right), \quad (8)$$

x_p ; x_q ; y_p ; y_q — координаты, соответствующие началам и концам отрезков,

D_{pq} — среднегеометрическое расстояние между отрезками. Таким образом, индуктивность лобовой части катушки будет равна

$$L_k = 2L_1 + 2L_2 + 2M_{11} + 2M_{22} + M_{Fe} + L_{кр}. \quad (9)$$

При составлении программ расчета были приняты переменными следующие параметры:

τ — полюсное деление машины;

p — число пар полюсов;

l_1 — длина прямолинейного участка;

α — угол наклона лобовой части к оси машины.

Блок-схема программы расчета представлена на рис. 3.

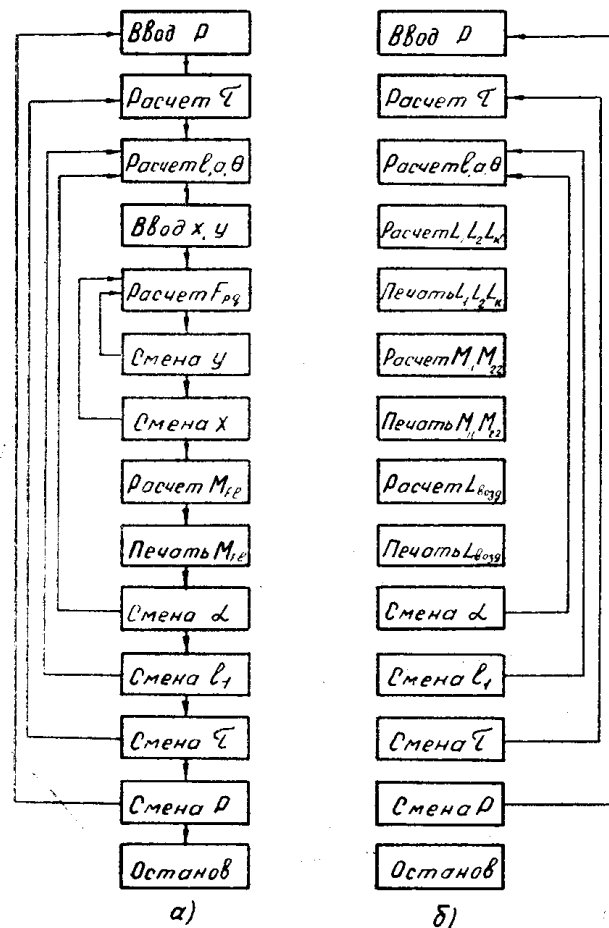


Рис. 3. Блок-схема программы расчета:
а) взаимная индуктивность лобовой части с ее зеркальным отображением, б) собственная индуктивность лобовой части

Результаты расчета

Результаты расчета индуктивности лобовой части, ее взаимоиндуктивности с зеркальным отображением для ряда значений полюсных де-

лений при различных углах наклона лобовой части для 2, 4, 6 и 8-полюсных ударных генераторов, выполненных с одинаковыми диаметрами расточки статора представлены на рис. 4 и 5. Число параллельных ветвей во всех рассматриваемых случаях принято равным 1.

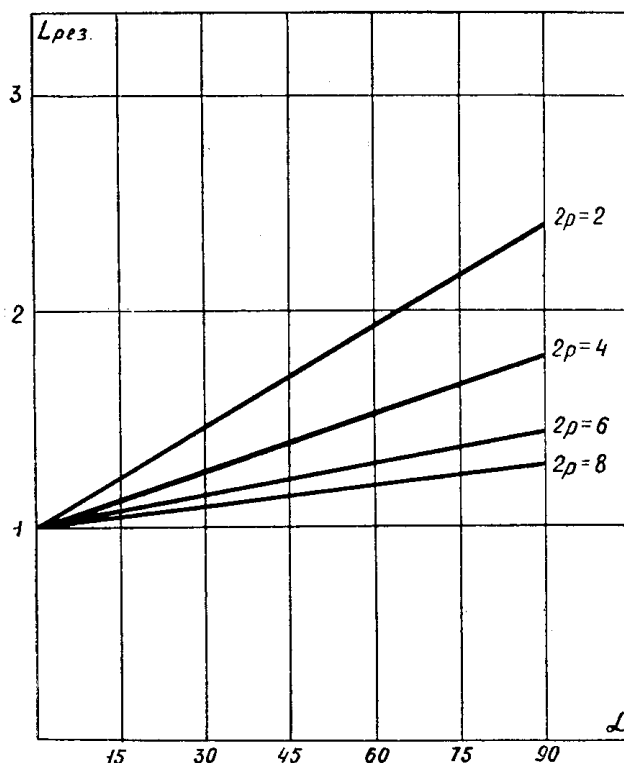


Рис. 4. Зависимость индуктивности лобовой части от угла наклона к оси машины

Расчеты показывают, что при угле наклона лобовой части $\alpha=0$ индуктивность рассеяния лобовых частей обмотки статора практически обратно пропорциональна числу пар полюсов. Однако с увеличением α рост индуктивности рассеяния лобовых частей различен. Наибольшее возрастание индуктивности наблюдается у двухполюсных машин: при изменении α от 0 до 90° индуктивность возрастает в 2,5 раза. С увеличением полюсности рост индуктивности лобовой части снижается, и при $2p=8$ индуктивность увеличивается всего на 30%. Объясняется это тем, что в случае двухполюсных машин абсолютное увеличение длины дуги лобовой части при увеличении угла наклона оказывается более значительным. Естественно, что собственная индуктивность лобовой части (индуктивность в воздухе) и взаимоиндуктивность с ее зеркальным отображением оказывается значительно большей. В относительных единицах зависимость L_K от угла α для ряда P показана на рис. 4.

Расчеты показывают, что индуктивность рассеяния за счет влияния торцевого железа в общей индуктивности лобового рассеяния различна для машин разной полюсности. Наибольшая индуктивность для двухполюсных машин. При $\alpha=0$ L_{Fe} составляет около 12% общей индуктивности рассеяния, а при $\alpha=90^\circ$ возрастает до 37%. С увеличением числа полюсов доля L_{Fe} уменьшается. Для восьмиполюсных машин при $\alpha=0$ L_{Fe} составляет около 6%, а при $\alpha=90^\circ$ достигает 20%. Однако, относительное возрастание взаимоиндуктивности лобовой части с ее зеркальным отображением при увеличении α для машин всех полюсностей одинаково (рис. 5).

С некоторым приближением изменение индуктивности рассеяния

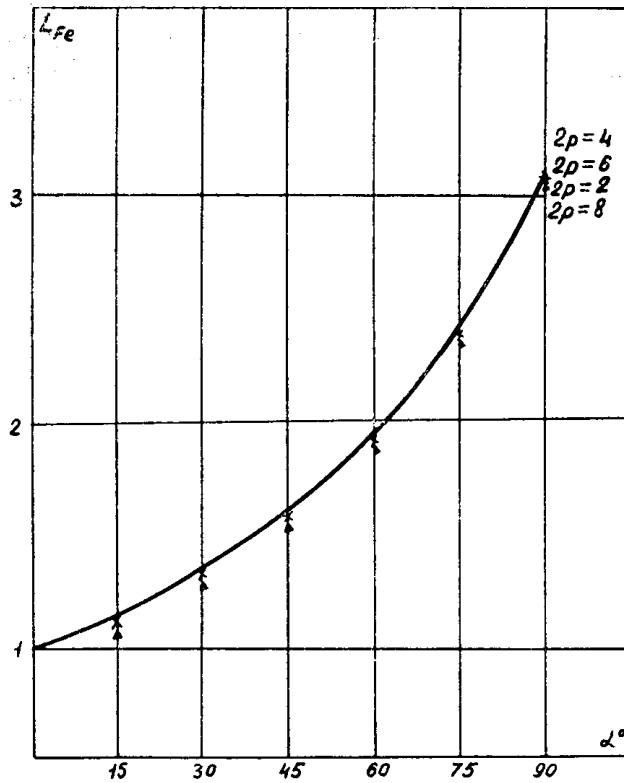


Рис. 5. Относительная взаимоиндуктивность лобовой части с ее зеркальным отображением

лобовых частей с увеличением угла наклона к оси машины можно выразить следующей зависимостью:

$$L_{\text{л}} + L_{\text{ло}} \left[1 + \frac{2,4}{\pi} \alpha (2,17 - K_p) \right], \quad (10)$$

где $L_{\text{ло}}$ — индуктивность рассеяния лобовых частей при нулевом угле наклона.

K_p — коэффициент, учитывающий полюсность машины. Для двухполюсных машин $K_p = 1$, для многополюсных

$$K_p = 2 - \frac{2}{2^{p-1}}. \quad (11)$$

Экспериментальные исследования

Для экспериментальной проверки полученных зависимостей индуктивности рассеяния лобовых частей от угла наклона лобовой части к оси машины была создана экспериментальная установка. Установка состоит из источника тока частотой 1000 гц и трех моделей, выполненных в соответствии с законами физического моделирования и представляющих из себя статорные пакеты, имеющие различные длины активной части в отношении 1:2:3 и уложенную в них концентрическую обмотку с одинаковыми лобовыми частями. Методика выделения индуктивности

рассеяния лобовой части секции из ее полной индуктивности принята по [2, 3]. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

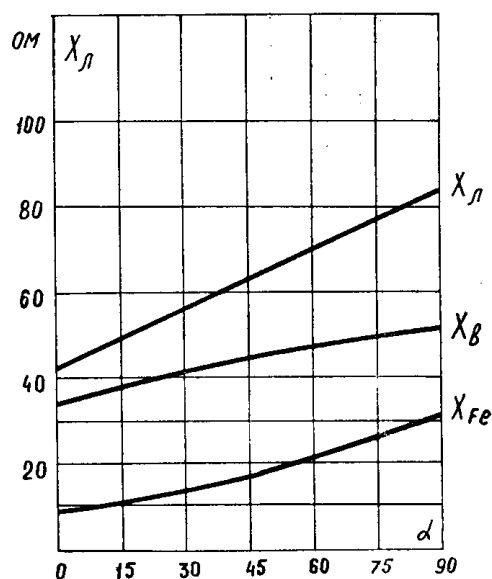


Рис. 6. Экспериментальные зависимости $\chi_{\alpha} = f(\alpha)$

Сравнение экспериментальных и расчетных данных подтверждает справедливость проведенного теоретического анализа. Влияние торцевых щитов на индуктивность рассеяния лобовых частей теоретически может быть рассчитано аналогично влиянию торца пакета. Действительно, эксперименты показывают, что при расстояниях от лобовой части до торца статора и до торцевого щита, равных друг другу, влияние их на индуктивность рассеяния одинаково. Зависимость индуктивности рассеяния лобовой части в долях индуктивности лобовой части при отсутствии щитов в функции отношения расстояния от осевой линии лобовой части до поверхности щита к расстоянию от осевой линии лобовой части до торца корпуса представлены на рис. 7.

На практике отношение $\frac{l_2}{l_1}$ при конструкции лобовой части с отгибом на угол 90° лежит в пределах 3—4, следовательно, индуктивность лобовой части за счет влияния подшипникового щита возрастает не более, чем на 10%, что хорошо согласуется с результатами исследований других авторов [4, 5].

Исследование влияния корпуса машины на индуктивность рассеяния лобовых частей показало, что даже при угле наклона лобовой части 90° , т. е. при минимальном расстоянии между лобовой частью и цилиндрической поверхностью корпуса, увеличение индуктивности рассеяния не превосходит 4%.

Проведенные исследования индуктивности рассеяния лобовых частей с анализом различных факторов, влияющих на χ_{α} , могут быть использованы при проектировании ударных генераторов для предварительной оценки различных конструктивных исполнений лобовых частей обмотки статора.

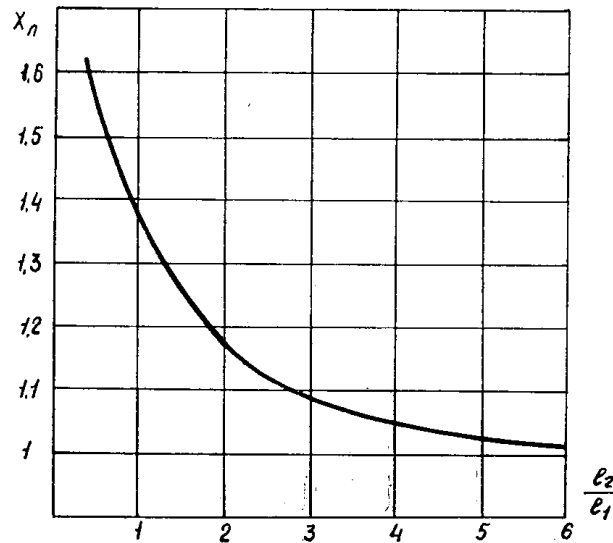
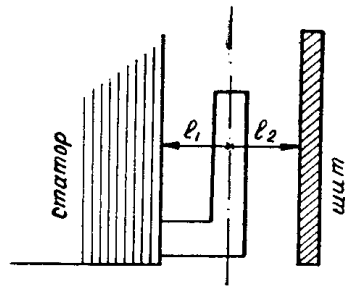


Рис. 7. Зависимость X_n от отношения $\frac{l_2}{l_1}$

ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Калантаров, Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Справочная книга. «Энергия», 1970.
2. В. П. Шуйский. Расчет электрических машин. «Энергия», 1968.
3. И. Майе. Расчет индуктивности лобового рассеяния электрических машин с применением физического моделирования для определения коэффициентов магнитной проводимости. Автореферат кандидатской диссертации. М., МЭИ, 1966.
4. E. C. Barnes. An Experimental Study of Induction Machine. End — Turn Leakage Reactance, TATEE, 1951.
5. P. I. Lawrenson. Calculation of machine end-winding inductances with special reference to turbogenerators. Proc. Inst. Electr. Eng. 117, № 6. 1970.