

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА ПРИ НАЛИЧИИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНОВ

Л. О. ОГАНЯН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических
машин и общей электротехники)

Электромагнитное поле в зоне лобовых частей обмотки статора электрических машин имеет сложное распределение. Оно обусловлено многими факторами, основными из которых являются: тип обмотки, применяемой в электрической машине, конфигурации лобовых частей и их пространственное распределение, угол наклона лобовых частей к оси машины, наличие окружающих лобовую часть поверхностей с различными магнитной и электрической проницаемостями. Знание картины поля необходимо для определения электродинамических усилий, действующих на лобовые части обмоток статора и окружающие их конструкции, для определения индуктивного сопротивления лобовых частей, для определения потерь в торцовых частях сердечника статора и в массивных конструктивных элементах торцовой зоны машины.

Среди всевозможных конструктивных решений для получения оптимальных параметров лобовой зоны ударного генератора экраны из немагнитного проводящего материала занимают особое место. С одной стороны, экраны являются элементом крепления лобовых частей и защищают ее от деформирования электродинамическими усилиями. С другой стороны, вследствие наведения в теле экрана вихревых токов ослабляется магнитное поле в зоне лобовых частей, что приводит к уменьшению индуктивности, к уменьшению электродинамических усилий и потерь в торцовой зоне [1]. Поэтому изучение влияния экранов на распределение поля в зоне лобовых частей представляет большой практический интерес.

Попытка расчета электромагнитных полей с целью получения удобных для практических расчетов формул с одновременным учетом вышеперечисленных факторов, влияющих на картину распределения поля, приводит к получению громоздких аналитических выражений, мало пригодных для применения в практике. Поэтому при решении задач по их расчету принимают допущения, которые ускоряют решение задачи и упрощают ее в целом для конкретного случая, не искажая грубо физики явлений, и дают удовлетворительные результаты. Однако в связи с увеличением импульсной мощности ударных генераторов возникает необходимость более точного расчета параметров лобовой зоны, а следовательно, и более точного определения картины поля. Исследования [2] показали, что экспериментальный метод определения картины поля является наиболее эффективным.

В настоящей работе экспериментальным путем исследовано влияние

электромагнитных экранов на распределение поля в зоне лобовых частей обмотки статора ударного генератора в режиме установившегося короткого замыкания.

Исследования проводились на статической модели торцевой части статора двухполюсного ударного генератора с однофазной concentрической обмоткой, лобовые части которой составляют с осью машины угол 90° (рис. 1). Такой тип обмотки позволяет производить экранирование лобовой зоны экранами простой конфигурации и обеспечить достаточную жесткость крепления лобовых частей.

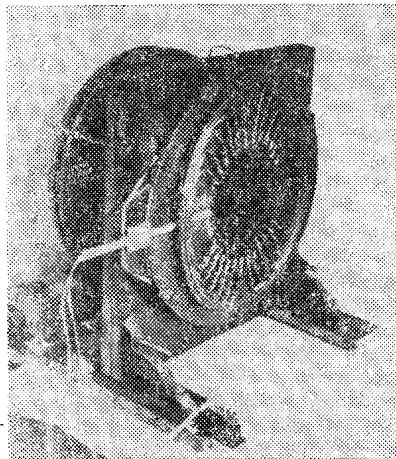


Рис. 1. Модель лобовой части ударного генератора

Статическая модель для исследования магнитного поля в торцевой части статора ударного генератора была выполнена с учетом требований для получения физического подобия явлений [3]. Это позволило значительно упростить модель, а именно: все проводящие и ферромагнитные конструкции, влияние которых в моделируемой области не существенно, выполнить из диэлектрического материала, а также существенным образом сократить длину модели. Моделирующая обмотка состояла из двух последовательно соединенных катушечных групп, по шесть катушек в каждой группе. Катушки наматывались медным проводом прямоугольного сечения размером $10 \times 2,5$ мм и имели по одному витку. В зависимости от постановки задачи эксперимента в модели была предусмотрена возможность изменения расстояния между лобовыми перемычками и торцовым железом. Питание осуществлялось переменным напряжением частотой 50 гц.

Программа исследования влияния экранов на распределение поля выполнялась в два этапа. На первом этапе было исследовано магнитное поле в зоне лобовых частей при их ферромагнитном окружении (на поверхности нажимной плиты и торцового щита), на втором этапе эти исследования были проведены при заключении лобовых частей в медные экраны толщиной 10 мм.

Эксперименты в первом и во втором случаях проводились в идентичных условиях с величиной тока в обмотке 80 а. Аналогичность в проведении экспериментов позволила провести сравнение полученных результатов без большой погрешности.

Для удобства измерений и последующей обработки результатов эксперимента был изготовлен специальный зонд с тремя датчиками Холла, ориентированными по трем взаимно перпендикулярным направлениям:

- а) аксиальному — параллельно оси модели (z),
- б) радиальному — по радиусу машины (x),
- в) тангенциальному — по касательной к окружности с центром на оси машины (y).

При монтаже зонда обращалось внимание на точность совпадения нормалей датчиков с выбранными осями.

Применение датчиков Холла в качестве измерителей магнитного поля обусловлено их простотой и надежностью в работе, возможностью получения на выходе датчика электрического сигнала, точно повторяющего форму магнитного поля относительно малыми размерами, что дает возможность измерять магнитные поля в малых объемах и узких зазорах. Кроме того, напряжение на выходе датчика пропорционально индукции измеряемого поля, а не производной от индукции по времени, как это имеет место в индукционных методах.

Учитывая особенности процесса измерений и свойства датчиков Холла, предопределяющие наличие помех, влияющих на точность измерения, монтаж схемы выполнялся экранированным проводом. Кроме того, паразитные индуцированные напряжения, возникающие в контурах, образуемых проводниками управляющего тока и напряжения, снижались за счет безындукционной укладки (бифилярно) проводников при монтаже измерительного зонда. Компенсация резистивного напряжения была осуществлена согласно схеме [4]. Термостатирование датчиков Холла не производилось ввиду сравнительно малого перепада температуры (порядка $1 \div 2^\circ$) в зоне измерения. Нелинейность характеристики датчиков составляла $1 \div 3\%$. Датчики были отградуированы на специальной установке. Вышеперечисленные мероприятия позволили свести до минимума погрешность измерений и получить на выходе устойчивый сигнал.

Для измерения составляющих магнитной индукции в любой интересующей нас точке применялось устройство, позволяющее перемещать датчики как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. Шаговый переключатель позволял подключать датчики в измерительную цепь в определенной последовательности. Измерение величины э.д.с. на выходе датчика после предварительного усиления осуществлялось многопредельным вольтметром средних значений типа Ф564. При подаче на осциллограф одновременно двух сигналов — один от датчика Холла, другой от тока фазы, питающей модель, — можно было определять сдвиг фазы между ними.

Точки, в которых проводились измерения составляющих индукции, охватывали поверхность нажимной плиты и торцового щита, ограниченную полюсным делением. В данной работе приведен анализ результатов экспериментов в 12 точках, расположенных на геометрической оси модели с шагом 10 мм. На рис. 1 показано положение зонда, соответствующее этим точкам. Выбор точек для анализа обусловлен тем, что в этой части обмотки поле можно считать плоскопараллельным и при расчете поля аналитически по элементарных проводников с током I можно заменить одним проводником с током nI . На рис. 2 показаны линии перемещения датчиков в радиальном направлении модели. Измеренные значения составляющих индукции и их распределение в основных частях лобовой зоны показаны на рис. 3, 4, 5. Величина индукции выражена в относительных единицах, причем за единицу принята аксиальная составляющая индукции, измеренная в точке А по линии 1—1' без наличия экранов и торцового щита, кроме того, на рисунках расположение этой точки принято за начало отсчета координат по осям x и z .

На рис. 3, 4 кривые B_a , B_R , B_t соответствуют исходным данным, по которым в дальнейшем будут сравниваться остальные варианты для качественного анализа влияния на распределение электромагнитного поля конструктивных элементов лобовой зоны.

Как видно из рис. 3, характер распределения индукции на поверхности нажимной плиты для рассматриваемого типа обмотки определяется величиной ее аксиальной составляющей — B_a . Радиальная B_R и тан-

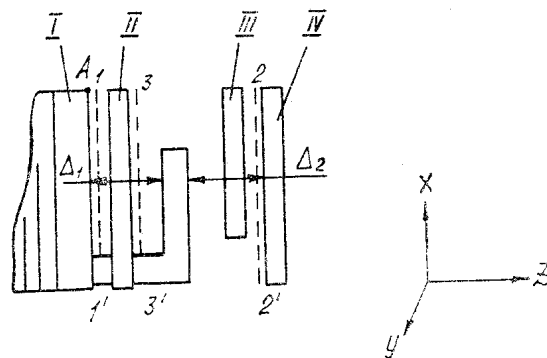


Рис. 2. Эскиз торцевой части модели: I — нажимная плита; II, III — экраны; IV — торцовый щит; 1—1', 2—2', 3—3' — линии перемещения датчиков

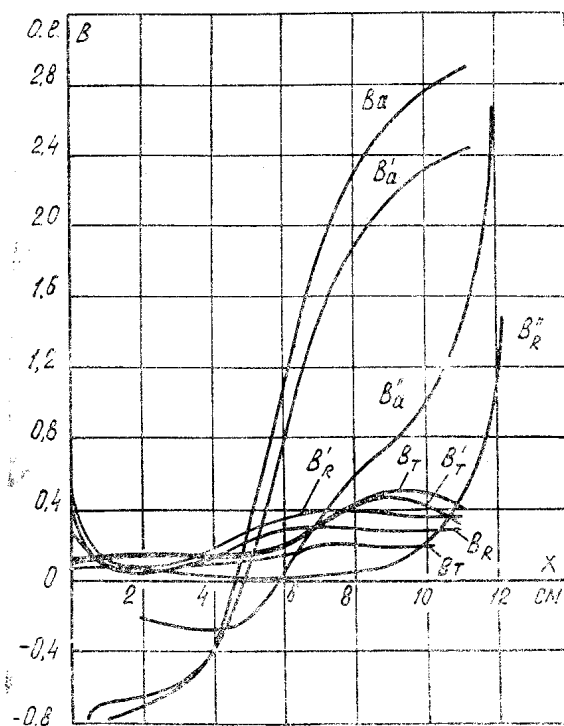


Рис. 3. Распределение составляющих индукции по линии 1—1' при $\Delta_1 = \Delta_2 = 20$ мм. B_a ; B_R ; B_T — без учета торцового щита (IV) и экранов (II) и (III). B_a' ; B_R' ; B_T' — с учетом торцового щита (IV). B_a'' ; B_R'' ; B_T'' — составляющие индукции с учетом торцового щита (IV) и экрана (II)

генциальная B_T составляющие незначительны и в данном случае могут не рассматриваться. Значение угла φ , под которым вектор магнитной индукции входит в граничную поверхность, различно:

$$\varphi = \arctg \frac{B_a}{B_R}. \quad (1)$$

Наименьшее значение угол φ имеет непосредственно под проводниками, в остальных случаях его значение стремится к 90° . Следует отметить увеличение индукции при переходе от внешних поверхностей лобовых

перемычек к внутренним. Наличие торцового щита приводит к увеличению индукции в лобовой зоне, в особенности в зоне нажимной плиты сердечника статора, примыкающего к воздушному зазору. Кривые B_a' , B_R' , B_T' приведены для случая, когда $\Delta_1 = \Delta_2 = 20$ мм. Как показали исследования, при $\Delta_1 < \Delta_2$ влияние торцового щита на распределение индукции в зоне нажимной плиты уменьшается и при $\Delta_2 = 5 \div 6 \Delta_1$ оно полностью исчезает.

Эффективность экранирования нажимной плиты сердечника статора показана кривыми B_a'' , B_R'' , B_T'' (рис. 3).

Благодаря наличию экрана индукция, проникающая к нажимной плите сердечника статора, заметно ослаблена. Это действие экрана можно оценить коэффициентом экранирования

$$k_{\varepsilon} = \frac{B_{\varepsilon}}{B_{Fe}}, \quad (2)$$

где

B_{ε} — величина индукции после экрана,

B_{Fe} — величина индукции до экрана.

По данным эксперимента значение k_{ε} лежит в пределах $0,3 \div 0,6$.

Экранирование нажимной плиты сердечника статора приводит к ослаблению поля и на поверхности торцового щита (рис. 4, кривые B_a' , B_R' , B_T'). Кроме того, ослабления поля на поверхности торцового щита можно добиться экранированием его от потоков рассеяния лобовых частей. Кривые B_a'' , B_R'' , B_T'' (рис. 4) дают характер распределения поля на поверхности торцового щита при наличии экранов (II) и (III). Ввиду того, что экран (III) модели имел меньшую поверхность, чем зона экранирования лобовых частей, и, кроме того, существовал зазор 5 мм между экраном и торцовым щитом, произошел эффект огибания потоком нижней кромки экрана (III) и вытеснения его в зазор. Это привело лишь к эффекту экранирования в наружной части торцового щита.

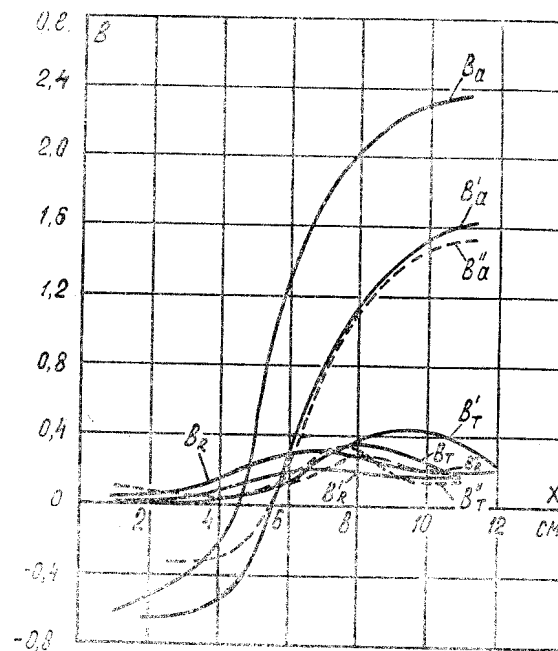


Рис. 4. Распределение составляющих индукции по линии 3—3' при $\Delta_1 = \Delta_2 = 20$ мм. B_a ; B_R ; B_T — без учета влияния экранов (I) и (II). B_a' ; B_R' ; B_T' — с учетом влияния экрана (I). B_a'' ; B_R'' ; B_T'' — с учетом влияния экранов (I) и (II)

Вихревые токи, индуцируемые в теле экрана, не только ослабляют поток в лобовой зоне, но и вызывают его перераспределение, приводящее к вытеснению части потока в зубцовую зону. Это приводит к росту потерь и нагревам зубцов торцовых пакетов железа статора. Поэтому для уменьшения этого эффекта необходимо экранирование зубцовой зоны.

Переменное магнитное поле лобовых частей обмотки статора индуцирует в экранах токи, демпфирующие это поле. Это приводит к перераспределению величины составляющих индукции поля лобового рассеяния. Линии поля как бы скользят вдоль поверхности экрана. В этом случае вектор электромагнитной индукции входит в тело экрана под углом значительно меньшим, чем при ферромагнитном окружении. Это приводит к резкому увеличению радиальной и к уменьшению аксиальной составляющих индукции. Характер распределения поля перед экраном (II) представлен кривыми B_a , B_R , B_T на рис. 5. Кривые B_a' , B_R' , B_T' показывают незначительное изменение составляющих при наличии торцового щита (IV), а B_a'' , B_R'' , B_T'' — при наличии экрана (III).

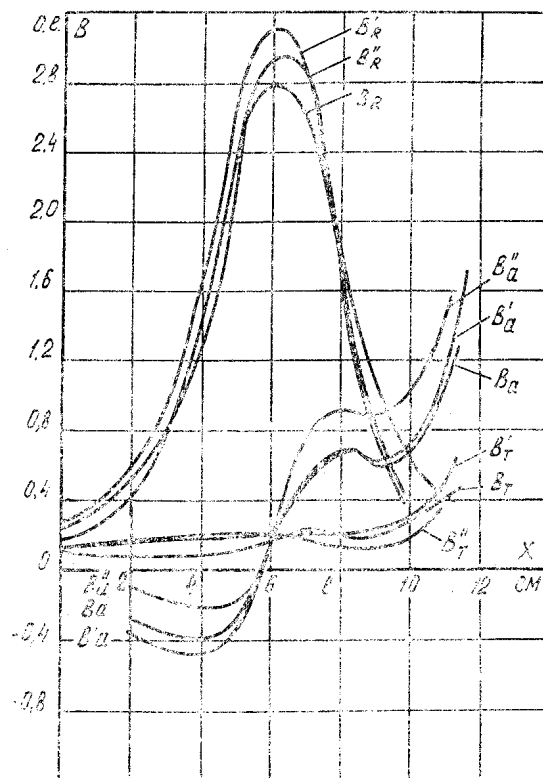


Рис. 5. Распределение составляющих индукции по линии 2—2' при $\Delta_1 = \Delta_2 = 25$ мм. B_a ; B_R ; B_T — без наличия торцового щита (IV) и экрана (III). B_a' ; B_R' ; B_T' — с учетом торцового щита (IV). B_a'' ; B_R'' ; B_T'' — с учетом торцового щита (IV) и экранов (II) и (III).

Эффективность применения экранов зависит от расстояния между лобовыми переключками и поверхностью экрана (Δ). Чем больше это расстояние, тем меньшая эффективность применения экранирования элементов торцовой зоны от полей рассеяния лобовых частей. На рис. 6. показано изменение составляющих индукции по оси z . При увеличении Δ составляющие индукции B_{Fe} и B_z стремятся к величине составляющих индукции в зоне лобовых частей без влияния окружающей среды.

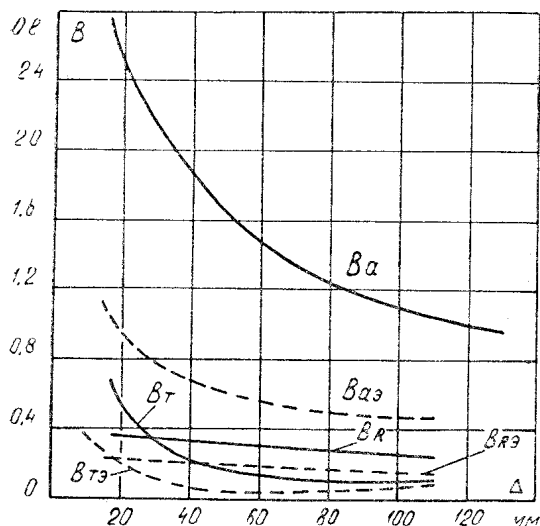


Рис. 6. Изменение составляющих индукции в зависимости от расстояния Δ без учета торцового щита. B_α , B_R , B_τ — в точке на поверхности нажимной плиты (I) без экрана (I). $B_{\alpha\epsilon}$, $B_{R\epsilon}$, $B_{\tau\epsilon}$ — в той же точке с экраном (I)

Таким образом, заключение лобовых частей в экраны из материалов с большой электропроводностью существенно снижает величину индукции в торцевой зоне ударных генераторов. Полученные экспериментальные данные в основном подтверждают общие физические представления о распределении поля в пространстве, окружающем лобовые части.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, В. Ф. Кулаков, В. И. Попов. О влиянии экранирования лобовых частей ударного генератора. Изв. ТПИ, т. 212, 1971.
2. А. С. Мойжес. О способах определения магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора. «Электротехника», 1971, № 11.
3. А. В. Иванов-Смоленский. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. М., «Энергия», 1969.
4. А. Кобус, Я. Тушинский. Датчики Холла и магниторезисторы. М., «Энергия», 1971.