

**ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО РАСЧЕТА  
КРИВОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ МЕЖДУ ЗУБЦОМ  
СТАТОРА И РОТОРОМ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ**

**А. Н. Корогодский, С. Л. Медовар, А. М. Меньшикова**

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Анализ индукторной машины с явно выраженной зубчатостью на статоре в ряде случаев осуществим приведением магнитного поля в воздушном зазоре к системе сосредоточенных параметров (эквивалентной схеме магнитной цепи) [1, 2, 3].

Основным параметром эквивалентной схемы является переменная во времени или в зависимости от электрического угла поворота ротора магнитная проводимость между участком статора, охваченным элементарным контуром якорной обмотки (зубцовым делением статора) и эквипотенциальным телом ротора.

Ставится задача построения кривой указанной проводимости в зависимости от электрического угла поворота ротора. Поле в индукторной машине носит плоский характер, поэтому целесообразно ограничиться определением удельной (на единицу аксиальной длины статора) проводимости.

В большинстве случаев ввиду относительно сложной конфигурации границ задача определения удельной проводимости неразрешима аналитическим путем. Численные методы расчета поля требуют применения БЦВМ. В инженерной практике представляется наиболее рациональным использование относительно простых приближенных графоаналитических методов расчета, допускающих в избранном диапазоне основных параметров зубцовой зоны корректировку по экспериментальным данным.

Берем за основу графоаналитический метод Поля [4], который, как показано в [5] и [6], особенно удобен при определении интегральных магнитных проводимостей на зубцовое деление статора и ротора.

По Полю, фиктивные углы наклона стенок в действительности прямоугольных зубцов статора и ротора приняты равным друг другу  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$  и составляют 1—1,1 радиана к горизонтали. При этом силовые трубки поля возбуждения в пазовой области заменяются частью колец, ограниченных дугами концентрических окружностей, проведенными из вершины угла, образованного активной частью и стенкой ближайшего зубца статора. В воздушном зазоре силовые линии проводятся перпендикулярно окружности якоря и представляют собой отрезки длиной  $\delta$ . Реальная картина поля отличается от принятой, в частности, тем, что силовые линии в пазовой области не параллельны друг другу и не направлены по концентрическим окружностям. Реальная силовая трубка утолщается при приближении к границам паза, так как силовые трубки заполняют все сечения паза. Следовательно, удельная проводимость (на единицу длины силовой линии) реальной элементарной трубки проводи-

мости в пазовой области больше удельной проводимости расчетной элементарной трубки. Введение фиктивных углов наклона стенок зубцов, т. е. укорочение расчетных силовых трубок, преследует цель компенсировать указанную погрешность при расчете проводимости трубки.

Итак, фиктивные углы наклона стенок зубцов являются по существу поправочными эмпирическими коэффициентами. Для прямоугольной формы паза удачен выбор фиктивных углов наклона 1,1 радиана. Как отмечалось рядом авторов, погрешность при расчете интегральных проводимостей методом Поля для  $\frac{\tau}{\delta} \geq 25$  весьма мала. А. А. Терзяном [7]

показана возможность применения метода Поля для расчета проводимости гребеночной зубцовой зоны в диапазоне  $3 \leq \frac{\tau}{\delta} \leq 10$  с соответ-

ствующей корректировкой эмпирического коэффициента  $\beta$  в зависимости от геометрии зоны и относительного положения статора и ротора. При отклонении формы паза от прямоугольной изменяются соотношения между удельными проводимостями реальных и расчетных элементарных трубок поля, в связи с чем эмпирические коэффициенты Поля требуют уточнения. В [8] и [9] показано, что применение метода Поля в его непосредственном виде к расчету зубцовых зон с непрямоугольной формой пазов дает значительную погрешность.

Между тем, зачастую в микромашинах с малым диаметром расточки статора имеют место значительные отклонения формы пазов статора и ротора от прямоугольной или сегментной. В частности, в тракторных индукторных генераторах обычно стенки зубцов статора и ротора параллельны (рис. 1, а), и при конформном отображении области воздушного зазора в полосу с выступами (рис. 1, б) преобразуются в сходящиеся

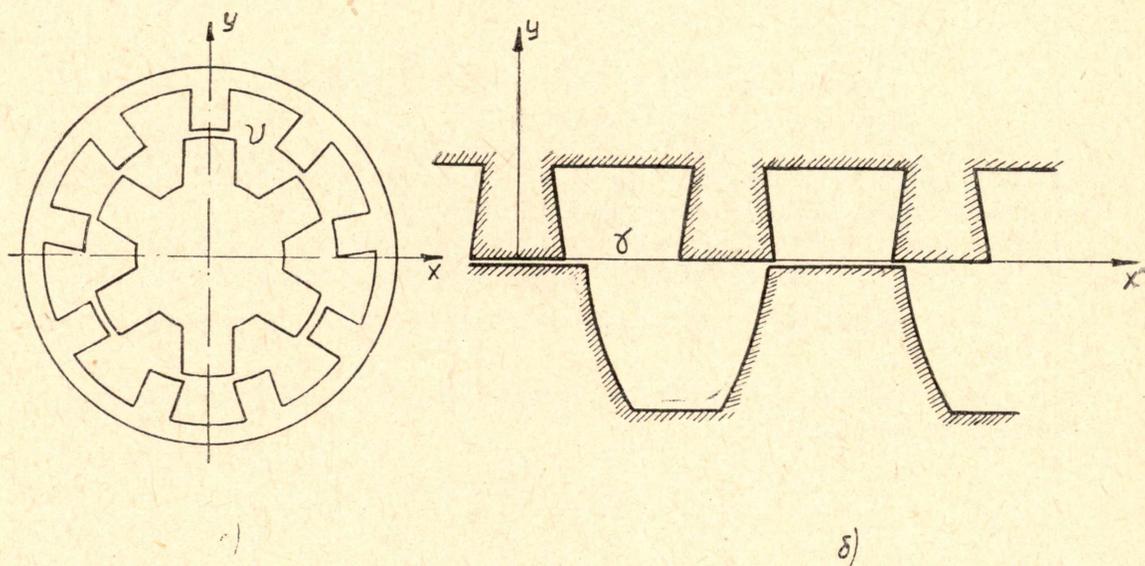


Рис. 1

для статора и расходящиеся для ротора кривые. В данном случае имеют место различные для паза статора и паза ротора отклонения формы пазов от прямоугольной. Интегральная проводимость в пазовой области статора уменьшается по сравнению с пазом прямоугольной формы, а интегральная проводимость пазовой области ротора увеличивается. Следовательно, для данного случая эмпирические коэффициенты Поля должны быть откорректированы следующим образом:

для статора  $\beta_1 \geq \beta$ ,  
 для ротора  $\beta_2 \leq \beta$ ,  
 где  $\beta_1$  — фиктивный угол наклона стенок зубцов статора,  
 $\beta_2$  — фиктивный угол наклона стенок зубцов ротора,  
 $\beta$  — коэффициент Поля для прямоугольного паза  $\beta = 1,1 \text{ рад}$ .

На рис. 2 приведены результаты расчета зубцовой зоны по рис. 1 графоаналитическим методом на основе метода Поля; построены зависимости удельной магнитной проводимости между зубцом статора и ротором от электрического угла поворота ротора. Эмпирические коэффициенты принимались следующими:

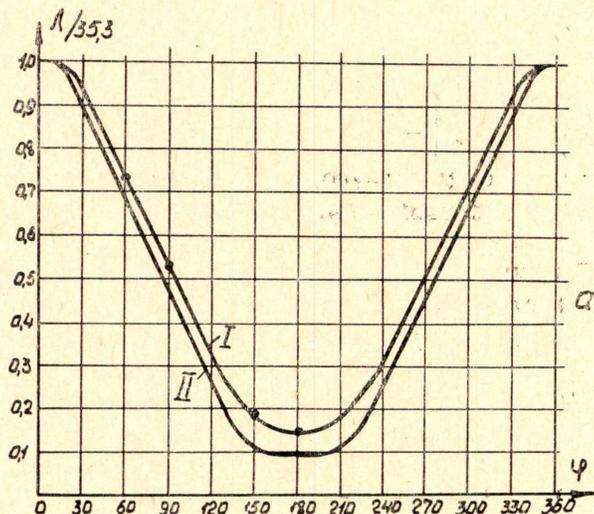


Рис. 2

кривая II  $\beta_1 = 1,1$  радиана,  $\beta_2 = 0,5$  радиана.

кривая I  $\beta_1 = \beta_2 = 1$  радиан,

На графике нанесены точки, полученные экспериментальным путем. Как видно из сравнения расчетных и экспериментальных данных, в данном случае наиболее удачен выбор  $\beta_1 = 1,1$ ,  $\beta_2 = 0,5$ .

Авторами экспериментально исследованы зубцовые зоны машин с параллельными стенками зубцов статора и ротора в следующем диапазоне основных параметров:  $25 \ll \frac{\tau}{\delta} \ll 80$  и  $0,1 \ll \frac{b}{D} \ll 0,35$ . В результате

предлагаются следующие эмпирические формулы для расчетных коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ :

$$\beta_1 \approx 1 + \frac{b_1}{D}, \quad (1)$$

$$\beta_2 \approx 1 - 2 \frac{b_2}{D}, \quad (2)$$

где  $b_1$  — ширина зубца статора,

$b_2$  — ширина зубца ротора,

$D$  — диаметр расточки статора.

По Полю, длина участка силовой линии в пазовой области равняется  $\beta X$  ( $X$  — расстояние от края ближайшего зубца). Поскольку в расчет входит только длина и ширина элементарной силовой трубки, а ее кривизна в расчетных формулах магнитной проводимости не фигурирует, напрашивается следующее упрощение при построении приближенной картины поля: форму силовой линии на всем протяжении от статора до

ротора принимаем за отрезок прямой, перпендикулярный к линии рас- точки статора; фиктивный угол наклона зубца статора принимаем  $\beta'_1$ , а ротора — соответственно  $\beta'_2$ .

$$\beta'_1 = \arctg \beta_1, \quad (3)$$

$$\beta'_2 = \arctg \beta_2. \quad (4)$$

Легко убедиться, что длина и ширина элементарных силовых трубок при этом не изменяются. Разбивка поля на фигуры осуществляется весьма просто (рис. 3). Из вершин всех углов проводятся вертикальные прямые до пересечения с противоположным берегом области.

Фигуры — трапеции образуются двумя отрезками вертикальных пря- мых и соответствующими участками контуров статора и ротора.

Проводимость каждой трапеции вычисляется по формулам:

при  $l_1 = l_2 = l$   $\lambda = \frac{c}{l}, \quad (5)$

при  $l_1 \neq l_2$   $\lambda = \frac{c}{l_2 - l_1} \ln \frac{l_2}{l_1}. \quad (6)$

Эти формулы удобны, когда размеры снимаются с построенной на милли- метровке картины поля, подобной изображенной на рис. 3. Интегральная проводимость на зубцовое деление статора или ротора равна сумме про- водимостей фигур, приходящихся на данное зубцовое деление.

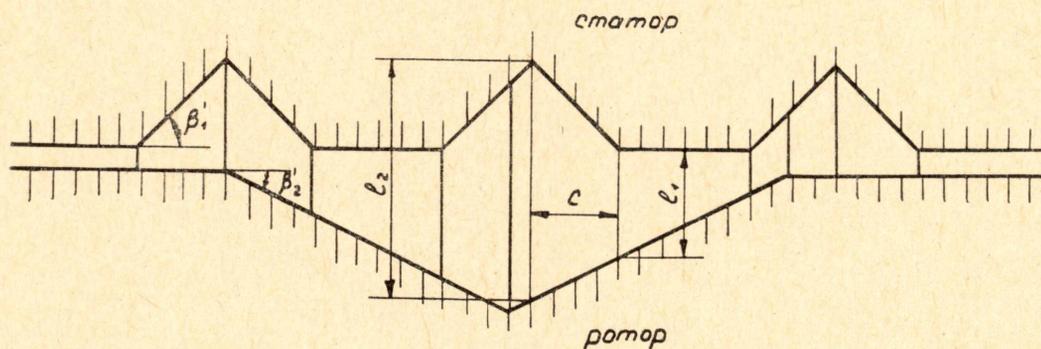


Рис. 3

Для построения плавной кривой проводимости между зубцом стато- ра и ротором обычно достаточно рассчитать поле при семи положениях оси зубца статора относительно оси зубца ротора (0, 30, 60, 90, 120, 150 и 180 электрических градусов). Кривая магнитной проводимости обла- дает симметрией 1 рода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Х. К о н и к. К исследованию влияния зубчатости статора и ротора в электрических машинах. Труды третьей всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, I. Изд. АН Латв. ССР, Рига, 1966.
2. М. М. К р а с н о ш а п к а. Индукторные альтернаторы повышенной частоты. Изд. ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1948.
3. А. Н. К о р о г о д с к и й, С. Л. М е д о в а р. Некоторые вопросы расчета и проектирования индукторных одноименнополюсных генераторов в режиме активной нагрузки. «Автотракторное электрооборудование», 1966, № 8.
4. R. Pohl. Theory of pulsating-field machines. The journal of the JEE, vol. 93, II, 1946, № 31.
5. Л. Э. Д о м б у р. Магнитное поле в воздушном зазоре аксиальной индук-

торной машины при холостом ходе с учетом зубчатости якоря. Бесконтактные электрические машины, IV. Изд. АН Латв. ССР, 1965.

6. В. С. Шаров. Электромашинные индукторные генераторы. М., 1961.

7. А. А. Терзян. О проводимости воздушного зазора зубчатых магнитных систем. Труды третьей всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, I. Изд. АН Латв. ССР, 1966.

8. Н. Я. Альпер. Расчет магнитных полей в зазоре индукторных машин с постоянным потоком. Вестник электропромышленности, 1962, № 3.

9. А. А. Терзян. Магнитное поле в воздушном зазоре индукторных машин с пульсирующим потоком. «Вестник электропромышленности», 1962, № 5.

---