

УДК 621.313.3

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_53

## **УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ**

**А.Ю. Смирнов**

АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова»  
Нижний Новгород, Россия  
a\_yu\_smirnov@mail.ru

**Е.Н. Александрова**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия  
aleksandrovaen1973@gmail.com

**В.В. Исакичев**

АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова»  
Нижний Новгород, Россия  
toe@nttu.ru

Описывается цифровая модель магнитного поля в области паза индукторной машины, примененная для определения обобщенных кривых, характеризующих убыль энергии в воздушном зазоре. Причиной убыли энергии является уменьшение его магнитной проводимости, используемое при расчете электромагнитного момента. Усовершенствована методика расчета индукторных двигателей с развитыми зубчатыми структурами на роторе и статоре, дополненная нелинейным расчетом фрагментарной модели магнитной цепи. Данный расчет выполняется графоаналитическим методом, до и после перемещения ротора из положения максимальной магнитной проводимости воздушного зазора на половину зубцового деления по отношению к зубцам на полюсном наконечнике статора.

Размагничивание ферромагнитных участков магнитной цепи является критерием правильности выбора геометрических параметров зубцовой зоны и электромагнитных нагрузок. Оно устанавливается расчетом на нелинейной модели, после поворота ротора на половину зубцового деления из соосного положения. Полученные графические характеристики выявили отсутствие существенной зависимости между уровнем проводимости зазора под пазом и его формой паза со стороны его дна.

**Ключевые слова:** индукторная машина, синхронный двигатель зубцовая зона, статор, ротор, электромагнитный момент, метод конечных элементов.

**Для цитирования:** Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Исакичев В.В. Уточнение параметров магнитного поля в области зубцовой зоны индукторной машины // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 53-63. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_53

## **REFINING OF MAGNETIC FIELD PARAMETERS IN TOOTH ZONE OF INDUCTOR MACHINE**

**A.Yu. Smirnov**

JSC “Afrikantov OKBM”  
Nizhny Novgorod, Russia  
a\_yu\_smirnov@mail.ru

**E.N. Aleksandrova**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
aleksandrovaen1973@gmail.com

**V.V. Isakichev**

JSC “Afrikantov OKBM”  
Nizhny Novgorod, Russia  
toe@nntu.ru

**Abstract.** A digital model of the magnetic field in the groove area of an inductor machine is described. The model is used to determine generalized curves that characterize the energy loss in the air gap. The reason for the loss of energy is the decrease in its magnetic conductivity, which are used in the calculation of the electromagnetic moment.

The method of calculation of inductor motors with developed gear structures on the rotor and stator is improved. The method is supplemented by a nonlinear calculation of the fragmentary model of the magnetic circuit. The calculation is performed by the graphoanalytic method, before and after moving the rotor from the position of the maximum magnetic conductivity of the air gap by half the tooth division with respect to the teeth on the pole tip of the stator.

It is noted that the demagnetization of the ferromagnetic sections of the magnetic circuit is a criterion for the correct choice of the geometric parameters of the tooth zone and electromagnetic loads. Demagnetization is established by calculation on a nonlinear model, after turning the rotor by half of the tooth division from the coaxial position.

The obtained graphic characteristics revealed the absence of a significant relationship between the level of conductivity of the gap under the groove and its shape of the groove on the side of its bottom.

**Keywords:** inductor machine, synchronous motor, tooth zone, stator, rotor, electromagnetic torque, finite element method.

**For citation:** A.Yu. Smirnov, E.N. Aleksandrova and V.V. Isakichev, “Refining of magnetic field parameters in tooth zone of inductor machine”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 53-63, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_53

## I. Введение

При изменении углового положения ротора бесконтактной синхронной машины индукторного типа поле под зубцами полюсов статора периодически изменяется: от максимального уровня, при котором имеет место совпадение осей зубцов статора и ротора, до минимального уровня, при совпадении осей зубцов статора с осями пазов на роторе. Перепадом магнитного потока и до, и после поворота ротора на половину зубцового деления обусловлена способность индукторной машины развивать вращающий электромагнитный момент. При этом момент машины и ее габариты зависят исключительно от переменной составляющей поля и ее индукции  $B_\delta$ , тогда как постоянная составляющая потока в зазоре в преобразовании энергии не участвует. Она не зависит от положения ротора, дополнительно намагничивает машину и по своему действию относится к потоку рассеяния. Для уточнения доли этого потока в общем потоке в зазоре под гребенчатыми зубцовыми зонами статора и ее учета при проектировании проведены расчетные исследования на модели фрагмента зубцовой зоны индукторного двигателя.

## II. Описание модели

Модель предназначена для воспроизведения поля ротора при минимальной проводимости воздушного зазора. Она представлена участками зубцовых зон статора и ротора на протяжении половины зубцового деления, с совпадающими осями паза одного магнитопровода и зубца другого магнитопровода, 1 и 2, и участком воздушного зазора  $\delta$  между ними (рис. 1). Участки магнитной цепи статора и ротора замкнуты между собой внешним магнитопроводом 3, отделенным линией  $MN$ , в пазу которого, на достаточно удаленном расстоянии от его стенок, существенно превышающем зазор  $\delta$ , расположена катушечная сторона 4 обмотки возбуждения, которая воспроизводит МДС магнитов ротора.

Вследствие значительного магнитного сопротивления пазовых участков зубцовой зоны, ферромагнитные участки магнитной цепи модели остаются ненасыщенными. Поэтому их свойства представлены постоянной магнитной проницаемостью  $\mu$ , которая определяется наклоном начального участка кривой намагничивания, она принимается равной  $10000\mu_0$ . Ширина зубцов  $b_Z$  модели зависит от длины зубцового деления  $t_Z$  и задается в методиках проектирования [1, 2] в соответствии с условием:

$$b_z = \left( \frac{t_z}{2} - 2 \cdot \delta \right), \quad (1)$$

а высота их прямоугольных участков (длина отрезка РМ на рис. 1):

$$h_{np} = 0,6 \cdot (t_z - b_z). \quad (2)$$

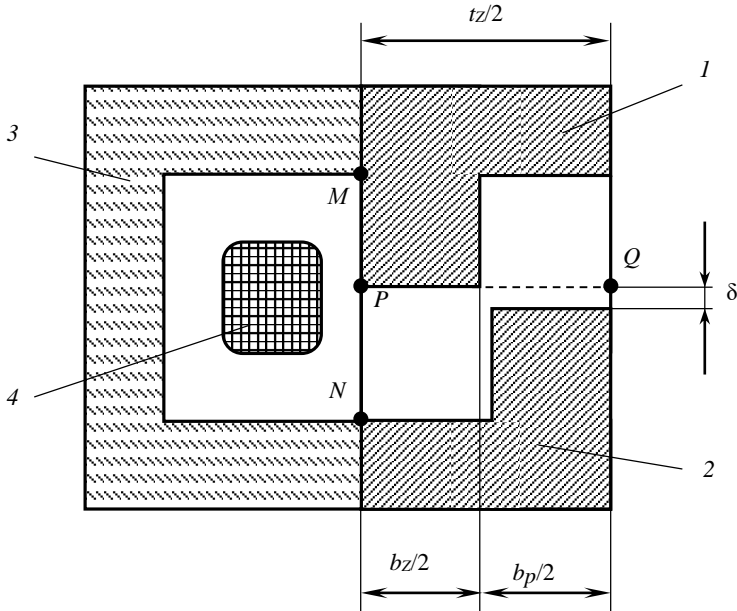


Рис. 1. Модель фрагмента зубцовой зоны индукторного двигателя

Fig. 1. Model of a fragment of the toothed zone of an inductor motor

### III. Задача и метод исследований

Задача и метод исследований заключались в точном расчете полей значимости потока, полученного на описанной фрагментарной модели двигателя. Для этого модель рассчитывалась посредством МКЭ относительно удельного, на единицу осевой длины, магнитного потока, пересекающего воздушный зазор по линии  $PQ$  модели при совпадении осей зубцов одного магнитопровода с осями пазов противоположного магнитопровода. В этом положении определялась минимальная магнитная проводимость воздушного зазора  $\Lambda_{\delta\min}$ :

$$\Lambda_{\delta\min} = \frac{\Phi_{PQ}}{F_{\text{кс}}} \quad [\text{Гн/М}], \quad (3)$$

с использованием МДС катушечной стороны  $F_{\text{кс}}$  модели, заданной ее площадью и приложенной плотностью тока. Сеточная модель исследуемой области представлена на рис. 2.

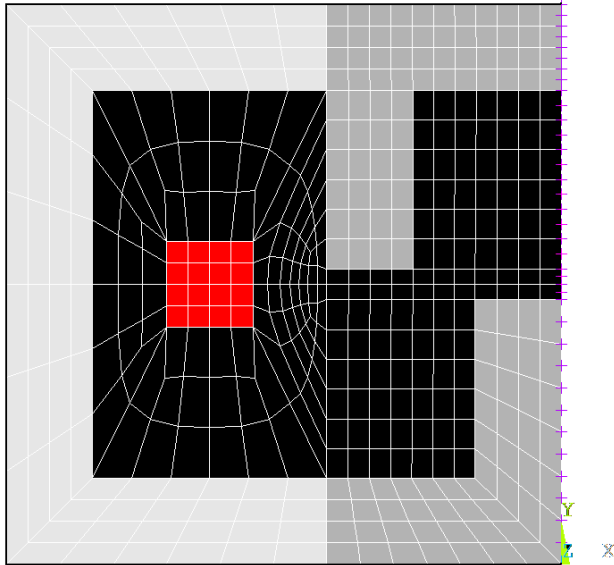


Рис. 2. Сеточная модель зубцовой зоны с прямыми пазами

Fig. 2. Mesh model of the toothed zone with straight slots

Определение доли постоянной составляющей в общей проводимости воздушного зазора осуществлялось путем сравнения значения, найденного по (3) с проводимостью воздушного зазора на протяжении половины зубцового деления при максимальном потоке:

$$\Lambda_{\delta\max} = \frac{\mu_0 \cdot (b_z + 2 \cdot \delta)}{2 \cdot \delta}, \quad (4)$$

и подсчета уменьшающего коэффициента, который входит сомножителем в расчетную формулу для минимального значения индуктивности фазы:

$$k_\Lambda = \frac{\Lambda_{\delta\min}}{\Lambda_{\delta\max} + \Lambda_{\delta\min}}. \quad (5)$$

В силу нечетной симметрии зубцовой зоны в рассматриваемом положении, поток фиксировался только под правой, не искаженной влиянием внешнего магнитопровода, половиной модели (рис. 1), а затем удваивался. Силовые линии магнитного потока рассчитанного поля представлены на рис. 3.

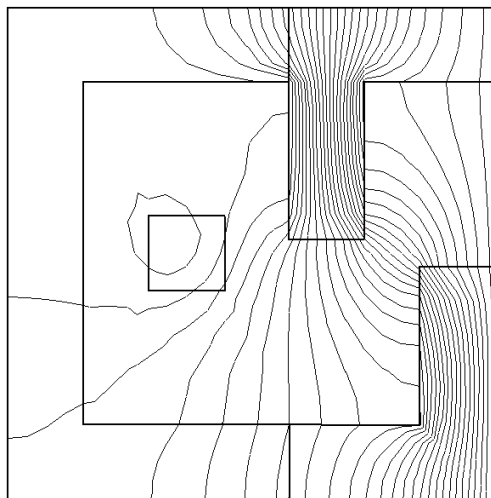


Рис. 3. Распределение индукции в модели зубцовой зоны индукторного двигателя

Fig. 3. Distribution of induction in the model of the toothed zone of the inductor motor

Результаты определения постоянной составляющей магнитной проводимости зубчатого зазора  $k_{\Delta}$  методом конечных элементов при различной относительной, по отношению к зазору, длине зубцового деления  $t_z/\delta$  представлены на рис. 4 (треугольный маркер). Для уточнения характеристик зубцовых зон со скругленными пазами составлена аналогичная фрагментарная модель (рис. 5). Она представлена ключевыми точками, используемыми затем для построения расчетных областей и сетки.

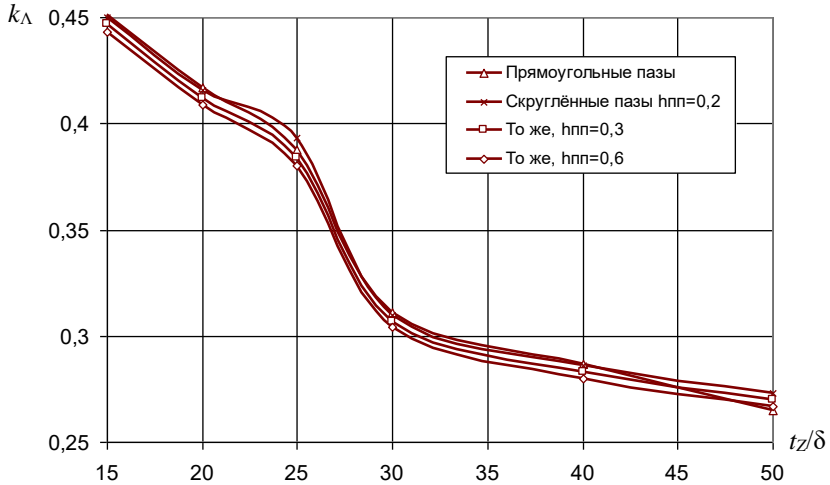


Рис. 4. Значения коэффициента уменьшения магнитной проводимости зазора под пазом  $k_{\Delta}$

Fig. 4. Values of the coefficient of reduction of the magnetic conductivity of the gap under the groove  $k_{\Delta}$

Модель позволяет воспроизводить поле в области скругленных пазов с различной длиной прямоугольной части  $h_{пп}$ . Остановимся на следующих вариантах формы пазов гребенчатых зубцовых зон со скругленными пазами:

- 1) полуцилиндрические пазы с минимальными прямоугольными границами,  $h_{пп} \approx 0$ ;
- 2) с укороченной по высоте зубцовой зоной, за счет уменьшенной в два раза протяженности прямоугольных границ  $h_{пп} = 0,3 b_p$ ;
- 3) с прямоугольными границами протяженностью (высотой) [3]:

$$h_{пп} = 0,6 \cdot (1 - k_z) \cdot t_z = 0,36 \cdot t_z; \quad (6)$$

– полноразмерная по высоте зубцовая зона, рис. 5.

В расчетную модель входят также области, представляющие внешний магнитопровод и катушечную сторону обмотки возбуждения, такие же, как и для рассмотренной выше модели с прямыми пазами. Задача расчета – минимизация высоты паза, представленной суммой  $h_{пп} + b_p / 2$  при сохранении приемлемых соотношений постоянной составляющей проводимости зазора  $k_{\Delta}$ , не превышающей значения этого коэффициента для прямых пазов.

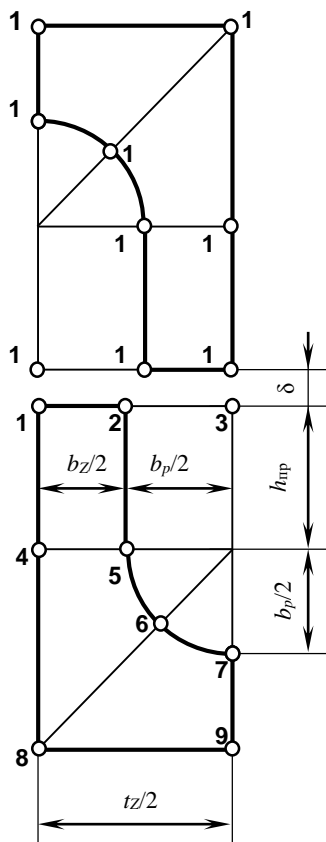


Рис. 5. Обозначение размеров и нумерация ключевых точек фрагмента зубцовой зоны индукторного двигателя со скруглёнными пазами

Fig. 5. Designation of dimensions and numbering of key points of a fragment of the toothed zone of an inductor motor with rounded slots

Результаты расчета параметров зубцовой зоны со скругленными пазами добавлены в рис. 4. С учетом найденного коэффициента определение электромагнитного момента двигателя с безобмоточным зубчатым ротором существенно упрощается. Для этого достаточно один раз рассчитать магнитный поток одной ее фазы в положении максимальной проводимости зазора, т.е., при соосном положении зубцов с катушками этой фазы и зубцов



ротора. Используя графоаналитические методы, можно найти максимальный магнитный поток в зазоре  $\Phi_\delta$  от действия МДС катушек этой фазы [4], после чего, средний, на полупериоде изменения, электромагнитный момент отыскивается из простого выражения:

$$M_{\text{эм}} = \frac{Z}{2\pi} \cdot \Phi_\delta^2 \cdot \frac{1 - k_\Lambda}{k_\Lambda \cdot \Lambda_{\delta\text{max}}}. \quad (7)$$

Из среднего значения можно выделить первую гармонику момента для одной фазы двигателя:

$$M_1 = \frac{4 \cdot M_{\text{ср}}}{\pi} = 1,273 \cdot M_{\text{ср}}, \quad (8)$$

и электромагнитный момент машины в целом:

$$M_{\text{эм}} = \frac{m}{2} \cdot M_1, \quad (9)$$

где  $m$  – число фаз.

Из сопоставления значений коэффициента уменьшения проводимости зазора, рассчитанного при одной и той же ширине открытия паза у зазора (значение  $b_p$ ), но при различной кривизне у его дна, делается вывод о том, что она мало влияет на магнитную проводимость зазора. Можно заключить, что при умеренном насыщении предпочтительными являются пазы прямоугольной формы как имеющие меньший радиальный размер зубцовых зон, более технологичных и позволяющих снизить момент инерции ротора.

#### IV. Заключение

Предварительный расчет поля в области зубцовой зоны индукторной машины методом конечных элементов позволяет повысить точность определения электромагнитного момента машины и вдвое сократить трудоемкость вычислений. Он выполняется один раз для широкого диапазона значений относительной, по отношению к зазору, ширины зубцов и пазов статора и ротора.

© Смирнов А.Ю., 2021

© Александрова Е.Н., 2021

© Исакичев В.В., 2021

Поступила в редакцию 22.03.2021

Received 22.03.2021

### Библиографический список

- [1] Смирнов А.Ю. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями. М.: ИНФРА-М, 2021. – 200 с.
- [2] Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс). М.: Форум, 2015. – 192 с.
- [3] Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.И., Власов А.И., Кузнецов В.А. Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
- [4] Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Зимин А.Ю. Уточнение моделей расчёта момента при проектировании индукторных двигателей // Электричество. 2020. № 11. С. 54-59. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59.

### References

- [1] A.Yu. Smirnov, *Elektroprivod s beskontaktnymi sinhronnymi dvigatelyami [Electric drive with contactless synchronous motors]*. Moscow: INFRA-M, 2021.
- [2] A.Yu. Smirnov, *Induktornye mashiny. Proektirovanie i vychislitel'nyj analiz (special'nyj kurs) [Inductor machines. Design and computational analysis (special course)]*. Moscow: Forum, 2015.
- [3] A.V. Ivanov-Smolensky, Yu.I. Abramkin, A.I. Vlasov and V.A. Kuznetsov, *Universal'nyj metod raschyota elektromagnitnyh processov v elektricheskikh mashinah [Universal method for calculating electromagnetic processes in electric machines]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986.
- [4] A.Yu. Smirnov, E.N. Alexandrova and A.Yu. Zimin, “Refining the torque calculation models in designing salient-pole inductor motors”, *Electricity*, no. 11, pp. 54-59, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Смирнов Александр Юрьевич**, доктор технических наук, ведущий инженер-конструктор АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Alexander Yu. Smirnov**, D. Sci. (Eng.), chief design engineer of the JSC “Afrikantov OKBM”, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Александрова Екатерина Николаевна**, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Ekaterina N. Alexandrova**, senior lecturer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Исакичев Владимир Владимирович**, инженер-конструктор АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Isakichev V. Vladimirovich**, design engineer of the JSC “Afrikantov OKBM”, Nizhny Novgorod, Russian Federation.