

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЗАЗОРЕ ТОРЦЕВОГО ДУГОСТАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ОБМОТОК ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ СТАТОРОВ**

**Р.С. Крищук**

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. e-mail: [kr@e-mail.ua](mailto:kr@e-mail.ua)

*Разработан метод расчета магнитного поля в зазоре торцевого дугостаторного асинхронного двигателя (ТДАД) с дисковым ротором с учетом продольного, поперечного и толщинного краевых эффектов и с учетом линейной скорости вращения ротора. Метод учитывает токовую нагрузку для каждого статора как для некомпенсированной однослойной обмотки, так и для компенсированной, а также реальное расположение пазов и лобовых частей, что позволяет рассчитать двигатель с параллельным включением обмоток противоположных от ротора статоров в сеть. Осуществив обратные преобразования, получаем формулу реального распределения индукции магнитного поля в трехмерном пространстве зазора. Библ. 5, рис. 2.*

**Ключевые слова:** торцевой дугостаторный асинхронный двигатель, дисковый ферромагнитный ротор, параллельное питание статоров, компенсированная обмотка.

Для вращения шаровых барабанных мельниц используется электропривод с зубчатой передачей, мощностью до 3 МВт. Проблемы, возникающие с редукторным электроприводом мельниц, описаны, например, в статьях [4, 5]. Избежать их можно, применив предлагаемый в [3] торцевой дугостаторный асинхронный двигатель (ТДАД).

В [3] рассмотрены энергетические показатели ТДАД для последовательного включения противоположных статоров, где также учитывается случай несимметричного расположения дискового ротора в зазоре.

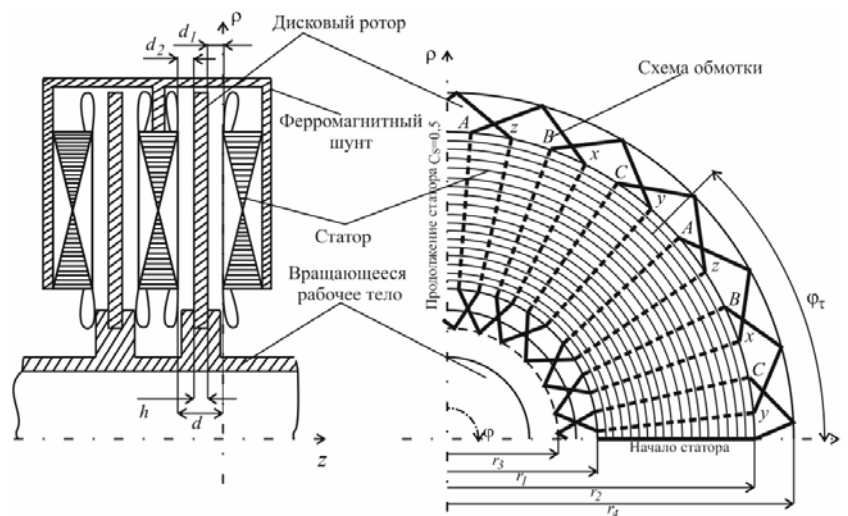
В настоящей статье представлен расчет магнитного поля ТДАД, который состоит из параллельно включенных в сеть дуговых статоров. На рис. 1 в качестве примера показано исполнение ТДАД с двумя дисковыми роторами и четырьмя дуговыми статорами. В каждом зазоре между статорами располагается вторичный элемент – дисковый электропроводящий ротор. Ротор жестко закреплен на вращающемся рабочем теле – барабане мельницы. В случае отклонения положения ротора в зазоре во время работы двигателя на него будут действовать нескомпенсированные магнитные силы. При этом мощность статоров станет неодинаковой.

**Целью работы** является разработка аналитического метода расчета магнитного поля в зазоре ТДАД при параллельном соединении обмоток противоположных статоров с учетом продольного, поперечного и толщинного краевых эффектов и с учетом несимметричного (общий случай) расположения ротора в зазоре.

Расчетную модель двигателя положим аналогично принятой в [3]. Таким образом найдем общее решение преобразованного по  $\varphi$  и  $\rho$  [1, 2] уравнения индукции для области воздушного зазора ( $0 \leq z \leq -d_1$ ) (рис. 1), в области ротора ( $-d_1 \leq z \leq -d_1 - h$ ) и области воздушного зазора ( $-d_1 - h \leq z \leq -d$ )

$$B_{nk1} = C_1 e^{\lambda_{nk} z} + C_2 e^{-\lambda_{nk} z}, \quad B_{nk2} = C_3 e^{\gamma z} + C_4 e^{-\gamma z}, \quad B_{nk3} = C_5 e^{\lambda_{nk} z} + C_6 e^{-\lambda_{nk} z}, \quad (1)$$

где  $C_1 - C_6$  – постоянные интегрирования уравнения индукции,  $\lambda_{nk}$  – собственное число интегрального преобразования в конечных пределах [2],  $\gamma_{nk} = \sqrt{\lambda_{nk}^2 + i\mu\mu_0\sigma\omega(1 - nC_s(1 - s)/p)}$ , где  $\mu$  и  $\sigma$  – относительная магнитная проницаемость и электропроводность дискового ротора,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха,  $\omega = 2\pi f$ ,  $s$  – скольжение,  $f$  – частота трехфазного тока системы питания,  $C_s$  – относительный к замкнутой окружности угол дуги статора,  $p$  – число пар полюсов машины.



**Рис. 1**

Распределение  $z$ -составляющей индукции в зазоре машины определим, исходя из заданной токовой нагрузки каждого статора, представленной в виде суммы  $\rho$ -составляющих комплексных амплитуд поверхностных токов фазных обмоток, сосредоточенных в пределах реальной ширины индукторов  $-(r_1 - r_2)$

$$i_{\rho(0,d)} = i_{\rho A(0,d)} + i_{\rho B(0,d)} + i_{\rho C(0,d)}, \quad (2)$$

$$i_{\rho j(0,d)} = I_{mj(0,d)} s_j \sum_{k=1}^q \sum_{s=1}^p \{ \delta[\rho \chi] - \delta[\rho(\chi - \varphi_\tau)] \} (\Theta(\rho - r_1) - \Theta(\rho - r_2)) + \\ + I_{mC(0,d)} s_k \{ \delta[\rho(\varphi + p\varphi_\tau)] - \delta[\rho(\varphi - p\varphi_\tau)] \} (\Theta(\rho - r_1) - \Theta(\rho - r_2)), \quad (3) \\ \chi = \varphi + p\varphi_\tau - \varphi_j - \varphi_\tau(2k-1)/2mq - 2(s-1)\varphi_\tau, \quad \varphi_\tau = C_s \pi / p.$$

Второе слагаемое в (3) в случае некомпенсированной обмотки равно нулю. Индексом «0» обозначена величина токов обмоток статора при  $z=0$ , а «d» – при  $z=-d$ . Индекс  $j$  пробегает значения (A, B, C) для фаз (A, B, C) соответственно.  $I_{mj(0,d)}$  – комплексная амплитудная величина фазного тока статоров при  $z=0$  и  $z=-d$  в соответствии с индексом,  $s_j$  – число витков в пазу обмотки соответствующей фазы,  $q$  – число пазов на полюс и фазу,  $\varphi_\tau$  – угловая величина полюсного деления (рис. 1),  $\varphi_j$  – угловой пространственный сдвиг фаз обмоток,  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция Дирака,  $\Theta(\cdot)$  – единичная обобщенная функция. Принимается

$$\varphi_\tau = \pi C_s / p, \quad \varphi_A = 0, \quad \varphi_B = \varphi_A + 2\varphi_\tau / m, \quad \varphi_C = \varphi_A + \varphi_\tau / m. \quad (4)$$

Из уравнений  $\text{div} \vec{j} = 0$  и  $\text{div} \vec{B} = 0$ , справедливого в зазоре вплоть до поверхностей статоров, после осуществления дискретного интегрального преобразования по координате  $\varphi$  [1] и интегрального преобразования по координате  $\rho$  [2], найдем, что на поверхностях статоров при  $z=0$  и  $z=-d$  нормальные производные индукции соответственно равны

$$\partial B_{nk(0)} / \partial z = f_{(0)}, \quad \partial B_{nk(d)} / \partial z = -f_{(d)}, \quad (5)$$

$$f_{(0,d)} = -\frac{\mu_0 i_{n(0,d)} \lambda_{nk}^2 r_2}{2\pi i n C_{nk} r_1} \int \rho (Y_n(\lambda_{nk} r_4) J_n(\lambda_{nk} \rho) - J_n(\lambda_{nk} r_4) Y_n(\lambda_{nk} \rho)) d\rho,$$

$$i_{n(0,d)} = I_{mA(0,d)} w_A K_A + I_{mB(0,d)} w_B K_B - I_{mC(0,d)} w_C K_C.$$

Здесь  $i_{n(0,d)}$  – преобразованная по  $\varphi$  величина поверхностных токов фазных обмоток (2). Поскольку в дугостаторных машинах начало катушек фазы C имеет обратное включение, то ток фазы C приобретает множитель  $(-1)$  для  $I_{mC(0,d)}$ . Принимая, что  $\eta$  пробегает значения (A, B, C), получим

$$w_\eta = s_\eta q p, \quad K_\eta = e^{-in p \varphi_\tau + in \varphi_\eta} (1 - e^{in \varphi_\tau}) \frac{1}{q p} \sum_{k=1}^q e^{i \frac{2k-1}{2mq} \varphi_\tau} \sum_{s=1}^p e^{2in(s-1)\varphi_\tau}. \quad (6)$$

Для компенсированной обмотки [3]

$$K_C = K_{(\eta=C)} + 2i \sin(np \varphi_\tau) / p. \quad (7)$$

Согласно условиям (5) общие решения уравнений (1) при  $z=0$  и  $z=-d$  должны удовлетворять условиям

$$C_1 - C_2 = f_{(0)} / \lambda_{nk}, \quad C_5 e^{-\lambda_{nk} d} - C_6 e^{\lambda_{nk} d} = f_{(d)} / \lambda_{nk}, \quad (8)$$

а на границах раздела сред – условиям сопряжения, состоящим из равенства нормальных составляющих индукции и тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля. При  $z=-d$  и  $z=-d_1-h$  соответственно эти условия запишутся так:

$$B_{nk1} = B_{nk2}, \quad \partial B_{nk1} / \partial z = \partial B_{nk2} / \mu \partial z, \quad B_{nk2} = B_{nk3}, \quad \partial B_{nk2} / \mu \partial z = \partial B_{nk3} / \partial z. \quad (9)$$

Определив из системы уравнений (8) и (9) с использованием решения (1) постоянные интегрирования  $C_1 - C_6$  и осуществив обратные преобразования [2] по координатам  $\rho$  и  $\varphi$ , найдем распределение индукции в зазоре двигателя в виде двойного ряда

$$B_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{nk} e^{-in \varphi} (Y_n(\lambda_{nk} r_4) J_n(\lambda_{nk} \rho) - J_n(\lambda_{nk} r_4) Y_n(\lambda_{nk} \rho)), \quad (10)$$

с использованием которого определяются энергетические показатели двигателя по методу, описанному в [3].

На рис. 2 показано распределение индукции на 7 пар полюсов в зазоре  $d_1$  (рис. 1) при несимметричном расположении ротора. Индукция распределяется неравномерно по причине краевых эффектов, усиливающих под действием на первичное магнитное поле размагничивающего вторичного поля дискового ротора, выступающего за пределы статора как по азимутальной координате, так и по радиальной.

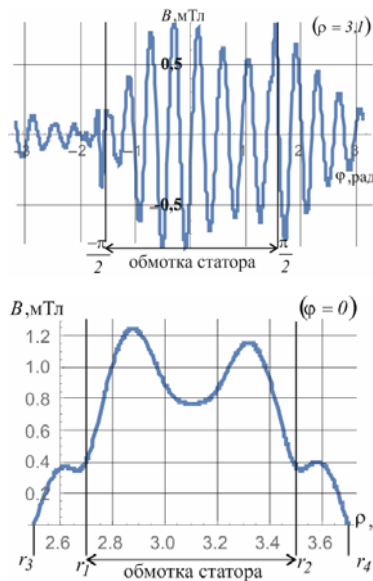


Рис. 2

**Вывод.** Разработан аналитический метод расчета магнитного поля в зазорах торцевого дугостаторного асинхронного двигателя (ТДАД) многостаторного исполнения с учетом линейной скорости вращения ротора, отдельного расчета токов противоположащих от зазора статоров, а также толщинного, поперечного и продольного краевых эффектов. Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать энергетические показатели ТДАД при параллельном включении противоположащих статоров в сеть и при несимметричном расположении дискового ротора в зазоре.

1. Гахов Ф.Д., Черский Ю.И. Уравнения типа свёртки. – М.: Наука, 1978. – 296 с.
2. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.
3. Ращепкин А.П., Крищук Р.С. Енергетичні показники торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з дисковим ферромагнітним ротором та компенсованою обмоткою // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип. «Електричні машини та електро-механічне перетворення енергії». – 2015. – №5(1114). – С. 76–84.
4. Hofmann E.J., McEniery P.M. and Nielsen B. Sugar mill drives — the latest improvements in gear and pinion manufacturing technology // Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. – 2005. – Vol. 27.
5. M. van de Vijfeijken, A. Filidore, M. Walbert, A. Marks. Copper mountain: overview on the grinding mills and their dual pinion mill drives // SAG Conference, Vancouver B.C. – September, 2012.

УДК 621.313

### МАГНІТНЕ ПОЛЕ В ЗАЗОРІ ТОРЦЕВОГО ДУГОСТАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПАРАЛЕЛЬНИМ ВКЛЮЧЕННЯМ ОБМОТОК ПРОТИЛЕЖНИХ СТАТОРІВ

Р.С. Крищук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: [kr@e-mail.ua](mailto:kr@e-mail.ua)

*Розроблено метод розрахунку магнітного поля в зазорі торцевого дугостаторного асинхронного двигуна (ТДАД) з дисковим ротором з урахуванням поздовжнього, поперечного і товщинного крайових ефектів та лінійної швидкості обертання ротора. Метод враховує струмове навантаження для кожного статора як для некомпенсованої одношарової обмотки, так і для компенсованої з урахуванням реального розміщення пазів і лобових частин, що дозволяє розрахувати двигун з паралельним включенням обмоток протилежних статорів у мережу. Здійснивши зворотні до інтегральних перетворення, отримано формулу реального розподілу індукції магнітного поля в тривимірному просторі зазору, враховуючи рівняння струмового навантаження.*

Бібл. 5, рис. 2.

**Ключові слова:** торцевий дугостаторний асинхронний двигун, дисковий ферромагнітний ротор, паралельне живлення статорів, компенсована обмотка.

### THE MAGNETIC FIELD IN THE GAP OF THE AXIAL ARC-STATOR INDUCTION MOTOR WITH THE PARALLEL CONNECTION OF WINDINGS OPPOSING STATORS

R. Kryshchuk

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail: [kr@e-mail.ua](mailto:kr@e-mail.ua)

*The paper is concerned with the method of calculation of the magnetic field in the gap of the axial arc-stator induction motor (AAIM) with disc rotor. It is reported that the longitudinal, transverse and thickness of the edge effects are taken into account. It draws our attention to uncompensated and compensated coil with the real placement of the slots and front parts. It should be noted that the equations of the current load of each stator are presented. It allows to calculate the engine with parallel windings in the opposite stators network. The following conclusions are drawn the real distribution of the magnetic field in the gap with the implementation of inverse to integral transformations.*

References 5, figures 2.

**Key words:** the axial arc-stator induction motor, ferromagnetic rotor disk, parallel connection of stators, compensated winding.

1. Hakhov F.D., Cherskiy Yu.I. Equations of convolution type. – Moskva: Nauka, 1978. – 296 p. (Rus)
2. Koshliakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Partial differential equations of mathematical physics. – Moskva: Vysshaya shkola, 1970. – 712 p. (Rus)
3. Raschepkin A.P., Kryshchuk R.S. Energy indicators of the axial arc-stator induction motor with ferromagnetic rotor and compensated winding // Visnyk NTU "KhPI". Tematychnyi vypusk "Elektrychni Mashyny ta Elektromekhanichne peretvorennia enerhii", – 2015. – No 5(1114). – Pp. 76–84. (Ukr)
4. Hofmann E.J., McEniery P.M. and Nielsen B. Sugar mill drives — the latest improvements in gear and pinion manufacturing technology // Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. – 2005. – Vol. 27.
5. M. van de Vijfeijken, A. Filidore, M. Walbert, A. Marks. Copper mountain: overview on the grinding mills and their dual pinion mill drives // SAG Conference, Vancouver B.C. – September, 2012.

Надійшла 03.02.2016

Остаточний варіант 29.03.2016