

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ И АКСИАЛЬНЫМ РАБОЧИМ ЗАЗОРОМ

На основі методу відносних коефіцієнтів показників технічного рівня з відносними геометричними керованими змінними отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімумів маси та вартості активної частини торцевих асинхронних короткозамкнених двигунів та виконано порівняльний аналіз вказаних показників при традиційному та аксіальному виконаннях статора і ротора. Бібл. 16, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: показники технічного рівня, оптимальні геометричні розміри, асинхронний короткозамкнений двигун.

На основе метода относительных коэффициентов показателей технического уровня с относительными геометрическими управляемыми переменными получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимума массы и стоимости активной части торцевых асинхронных короткозамкнутых двигателей и выполнен сравнительный анализ указанных показателей при традиционном и аксиальном исполнении статора и ротора. Библ. 16, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: показатели технического уровня, оптимальные геометрические размеры, асинхронный короткозамкнутый двигатель.

В числе исторических достижений изначальной электротехники представлен первый электродвигатель вращательного движения с плоским аксиальным рабочим зазором, разработанный Б.С. Якоби в 1834 г. Затем совершенствовались концентрические электромагнитные системы (ЭМС) и в конце XIX века на основе работ М.О. Доливо-Добровольского последовало освоение промышленного производства трехфазных, в том числе асинхронных, машин с цилиндрическим рабочим зазором [1]. Асинхронные двигатели (АД) с дискретными зубцово-пазовыми структурами внешнего статора и внутреннего ротора (рис. 1,а) получили известное, в том числе из [2], наименование «классических» (АДК), а также традиционных.

На протяжении прошедшего столетия развитие электромеханики сопровождалось менее масштабным, по сравнению с комплексными разработками и крупносерийным производством АДК, исследованиями и успешным изготовлением торцевых асинхронных двигателей (ТАД) в США и западной Европе (представлены в перечнях литературы [3, 4]). Плоская форма и малая осевая длина однороторных ТАД с ЭМС (рис. 1,б) позволяет повысить показатели технического уровня (ПТУ) ряда технических объектов [4]. В качестве примера таких объектов показаны конструктивные схемы элементов подводно-технического оборудования с серийным АДК (рис. 2,а,б) и с ТАД (рис. 2,в) [5].

Известные недостатки ТАД заключаются в осевом притяжении ротора к статору, неравномерности распределения магнитного поля в активном объеме и в конструктивной сложности размещения внутренних лобовых частей статора в зоне положения вала и подшипников при числе полюсов  $2p \leq 4$  [6 – 9]. Также известными конструктивными решениями повышения ПТУ ТАД являются использование одноопорной конструкции ротора, установленного во внутренней обойме «легкого» подшипника большого диаметра [10], трапециевидного сечения ярма [11] и конусоцилиндрической структуры слоев витого магнитопровода [12]. Указанные технические решения представлены конструктивной схемой (рис. 3,а) и фото (рис. 3,б) образцов ТАД мощностью  $P_n = 150$  Вт ( $2p = 2$ , линейное напряжение 27 В и частота сети  $f_1 = 50$  Гц),

разработанного в 1990 году для агрегата (рис. 2,в). Кроме того, возможна «двухуровневая» укладка обмотки вариантов с активным распределенным слоем [2] и дискретной зубцово-пазовой структурой [13] с увеличенной вдвое высотой активно-пазового слоя статора ТАД. Повышение пазового рассеяния, массы и потерь электротехнической стали (ЭТС) сопровождается снижением металлоемкости, потерь и лобового рассеяния двухуровневой обмотки статора, а также уменьшением наружного диаметра ТАД [13].

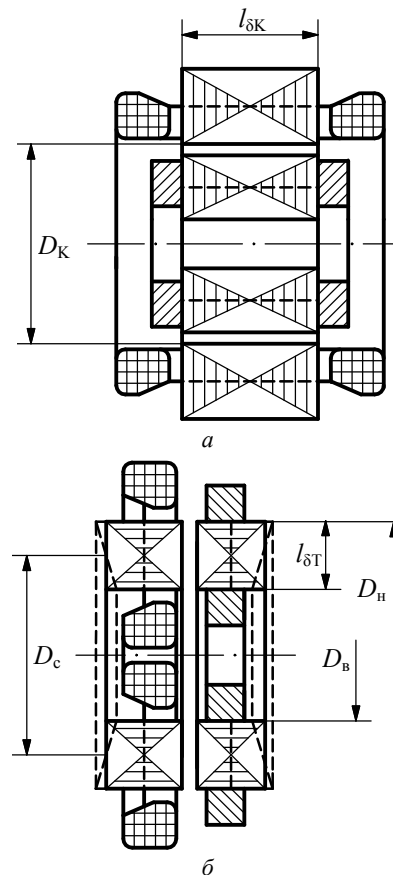


Рис. 1. Конструктивные схемы электромагнитных систем асинхронных короткозамкнутых двигателей классического (а) и аксиального (б) исполнений

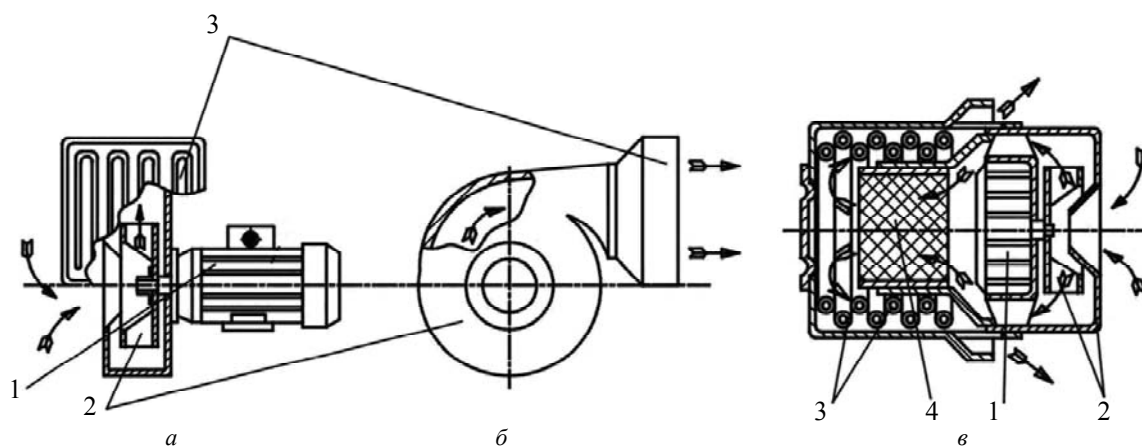


Рис. 2. Схемы агрегатов обработки дыхательно-газовой смеси с центробежным вентилятором, цилиндрическим электродвигателем и плоским теплообменником (*а* – главный вид, *б* – вид сбоку) и со встроенным фильтром и аксиальным электродвигателем (*в*): 1 – асинхронный двигатель; 2 – центробежный вентилятор; 3 – теплообменник; 4 – комплект фильтров очистки

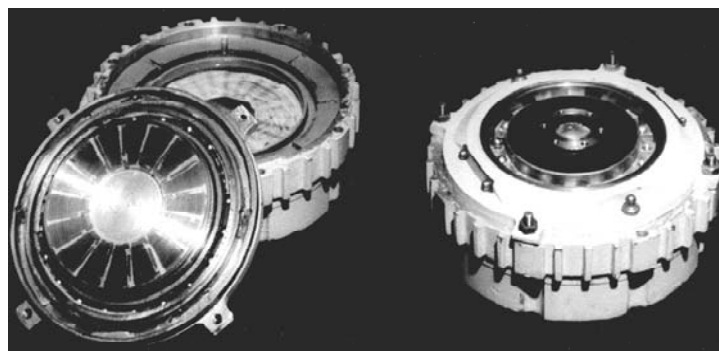
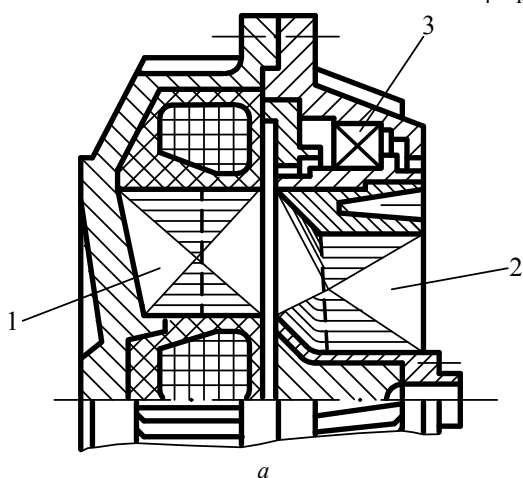


Рис. 3. Конструктивная схема (*а*) и образцы (*б*) аксиального асинхронного двигателя с одноопорной установкой ротора: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – подшипник

В дополнение к конструктивному соответствию ряду механизмов, преимуществами аксиальных ЭМС являются относительно малые отходы ЭТС при изготовлении витых зубчатых магнитопроводов и упрощение обмоточно-изолирующих работ. Исходя из преимуществ плоской укладки, выполнялись разработки ТАД с печатными и штампосварными обмотками [4]. Однако освоения производства таких ТАД, в отличие от аксиально-дисковых тахогенераторов и двигателей постоянного тока, не последовало. Согласно [13], разработанные для объектов бытовой техники однофазные ТАД с витыми магнитопроводами и штампованными (с изменяющимся шагом) пазами отличаются относительно классических аналогов ( $2p = 4, f_1 = 50$  Гц) пониженной трудоемкостью изготовления и повышенными ПТУ. Однако приоритеты технологической преемственности, ранее вложенной капиталоемкости оборудования и факторы стандартизации и автоматизированного проектирования АДК практически ограничивают возможности промышленной реализации малых ТАД [13]. Также в публикациях не представлены, за исключением анализа [9] зависимостей ПТУ от отношения  $\xi_T$  наружного  $D_n$  и внутреннего  $D_v$  диаметров активной поверхности статора (рис. 1,б), работы по оптимизации ТАД. При этом согласно [2, 13] и перечню литературы [14],

потенциал развития АДК традиционными способами повышения ПТУ электромеханических устройств практически исчерпан. Поэтому невзирая на технологический консерватизм имеются перспективы расширения производства и использования ТАД и АД с внешним ротором по меньшей мере в электромеханических системах специального назначения [14].

**Цель работы** – разработка математической модели (ММ) анализа массостойких показателей активной части однороторного ТАД на основе универсального метода [14, 15] и сравнение показателей массы и стоимости вариантов ЭМС короткозамкнутого АД (рис. 1,а,б).

При разработке ММ рассматриваются ЭМС с традиционной зубцово-пазовой структурой, не учитывается ограничение размещения внутренних лобовых частей (на основе возможности их укладки в зоне  $D_v$  статора на рис. 3), не учитывается краевой эффект распределения магнитного поля. Исходя из последнего допущения распределение вдоль активной длины АДК амплитуды индукции в рабочем зазоре  $B_{БК} = \text{const}$ , а аналогичная функция распределения индукции ТАД определяется изменением соотношений элементов магнитопровода вдоль текущего радиуса [7]. Такая функция может иметь вид условно симметричного относительно среднего диаметра  $D_c$  и возрастаю-

щего или убывающего от  $D_b$  к  $D_n$  распределения. Симметричное и, в большей степени, возрастающее распределения повышают использование активного объема и предельную мощность ТАД [8] и обеспечиваются трапециевидными сечениями ярем (рис. 3,а). При трапециевидном и традиционном прямоугольном сечениях ярем (рис. 1,б) и исключения насыщения зубцов и ярем в зонах соответственно  $D_b$  и  $D_n$  расчетно-экспериментальные соотношения индукций зазора  $B_{\delta n}$  и  $B_{\delta b}$  на граничных диаметрах составляют 1,2...1,25 [4, 7, 8]. Указанные функции в относительных единицах  $B_{\delta i}/B_{\delta n}$  от  $\xi_T$  представлены на рис. 4, которые определяются отношением текущего значения индукции  $B_{\delta i}$  и диаметра  $D_i$  к соответствующим индукции на наружном диаметре  $B_{\delta n}$  и внутреннему диаметру  $D_b$ .

Оптимизационные целевые функции (ЦФ) массы  $F_{MK(T)}$  и стоимости  $F_{CK(T)}$  ЭМС АДК (ТАД), а также ЦФ активных потерь (в данной работе не рассматривается) представляются уравнениями вида [14, 15]

$$F_{M(C)K(T)} = \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 K_{M(C)} \Pi_{M(C)K(T)}^*, \quad (1)$$

где  $\Pi_{ИД}$  – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок (ЭМН) АД [14], являющийся идентичным для рассматриваемых ЭМС исходя из принципа электромагнитной эквивалентности сравнительного анализа [3];  $K_{M(C)}$  – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов;  $\Pi_{M(C)K}^*$  и  $\Pi_{M(C)T}^*$  – относительный показатель в виде коэффициента массы (стоимости) ЭМС соответственно АДК и ТАД, определяющийся относительными геометрическими управляемыми переменными (УП).

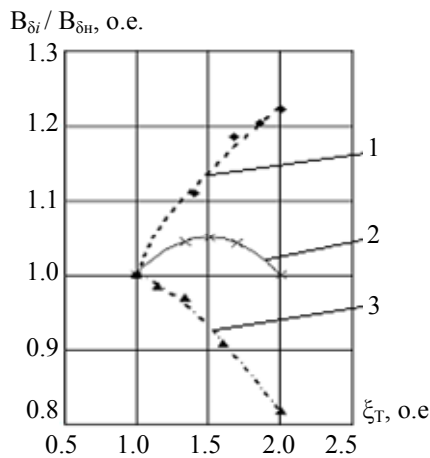


Рис. 4. Варианты распределения индукции в рабочем зазоре торцевого асинхронного двигателя с прямоугольным (1) и с трапециевидным (2, 3) сечениями ярем

УП анализа АДК являются относительная активная длина  $\lambda_{\delta K}$  и расчетный параметр  $a_{MK}$  [14]:

$$\lambda_{\delta K} = l_{\delta K} / D_K, \text{ [м/м]}; \quad a_{MK} = D_K^4 / \Pi_{ИД} \text{ [м}^4/\text{м}^4\text{]}.$$

Для определения ПТУ ТАД также вводится параметр  $a_{MT}$ , а относительная активная длина  $\lambda_{\delta T}$  аналогично геометрическим параметрам ЭМС трансформаторов [15] и в соответствии с [6, 9] выражается через отношение диаметров  $\xi_T$ :

$$a_{MT} = D_c^4 / \Pi_{ИД} \text{ [м}^4/\text{м}^4\text{]}; \quad (2)$$

$$\xi_T = D_n / D_b, \text{ [м/м]}; \quad (3)$$

$$\lambda_{\delta T} = (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T).$$

Являющийся аналогом  $D_K$  диаметр  $D_c$  [3] и активная длина  $l_{\delta T}$  ЭМС ТАД определяются [6]:

$$D_c = (D_n + D_b) / 2 = D_n (1 + 1/\xi_T) / 2; \quad (4)$$

$$l_{\delta T} = (D_n - D_b) / 2 = D_n (1 - 1/\xi_T) / 2. \quad (5)$$

Неравномерное радиальное распределение индукции в рабочем зазоре ТАД учитывается аппроксимацией расчетно-экспериментальных зависимостей вида (рис. 4):

$$B_{\delta}(\xi_T) = B_{\delta n} \left( 1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15} \right); \quad (6)$$

$$B_{\delta}'(\xi_T) = B_{\delta n} \left( 1 + 0,204(\xi_T - 1)^{0,63} \xi_T^{0,15} \right);$$

$$B_{\delta}''(\xi_T) = B_{\delta n} \left( 1,051 - 0,186(\xi_T - 0,5(1 + \xi_{Tn}))^2 \xi_T^{0,15} \right),$$

где аппроксимация (6) соответствует трапециевидному сечению ярма с насыщением слоев ЭТС вдоль радиуса, близким к равномерному.

Поток главного магнитного поля в рабочем зазоре ТАД определяется с использованием (4, 6)

$$\Phi_{\delta} = \frac{2}{\pi} B_{\delta n} (1 - K_b) \int_0^{2\pi/p} \int_{D_b}^{D_n} \frac{D}{2} d \frac{D}{2} d\varphi =$$

$$= B_{\delta n} (1 - K_b) \frac{1}{2p} D_n^2 \left( 1 - \frac{1}{\xi_T^2} \right) = B_{\delta n} (1 - K_b) \frac{2}{p} D_c^2 \frac{1 - 1/\xi_T}{1 + 1/\xi_T}, \quad (7)$$

где  $K_b$  – усредненный коэффициент распределения индукции в рабочем зазоре, который для ЭМС ТАД с эффективным использованием активного объема выражается зависимостью распределения индукции (6) и находится

$$K_b = \frac{0,167 \int_1^{\xi_T} (\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15} d\xi_T}{\xi_T - 1}.$$

Аналогично ММ ЭМС АДК [14] для определения ЦФ (1) ТАД используются известные выражения числа и сечения эффективных проводников паза статора  $U_n$  и  $S_{\phi}$ , чисел витков фазы  $w_1$  и зубцов статора  $z_1$  [16]:

$$U_n = w_1 a_1 / pq_1; \quad (8)$$

$$S_{\phi} = P_n / (a_1 m_1 J_1 U_1 \eta \cos\varphi); \quad (9)$$

$$w_1 = K_E U_1 / (4,44 K_p K_y f_1 \Phi_{\delta}); \quad (10)$$

$$z_1 = 2 p m_1 q_1, \quad (11)$$

где  $a_1$  – число параллельных ветвей обмотки статора;  $K_E$  – соотношение ЭДС фазы статора и фазного напряжения  $U_1$ ;  $m_1$  и  $q_1$  – число фаз и пазов на полюс и фазу;  $K_p$  и  $K_y$  – обмоточные коэффициенты распределения и укорочения;  $J_1$  – плотность тока статора;  $\eta$  и  $\cos\varphi$  – коэффициенты полезного действия и энергетический коэффициент.

С учетом выражений (6) – (10) и УП (2), (3) суммарная площадь пазов  $S_{1\Sigma}$  в поперечном сечении магнитопровода статора

$$S_{1\Sigma} = z_1 U_1 S_{\phi} / K_{зп} =$$

$$= \Pi_{ИД} / (K_{зп} D_c^2 2(1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)) = \quad (12)$$

$$= \sqrt{\Pi_{ИД}} / (K_{зп} 2 \sqrt{a_{MT}} (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)),$$

где  $K_{зп}$  – полный коэффициент заполнения паз статора, а показатель  $\Pi_{ИД}$  электромагнитно-эквивалентных АД определяется выражением [14]

$$\Pi_{ИД} = K_E p P_n / (2,22 K_p K_y f_1 J_1 B_{\delta n} (1 - K_b) \eta \cos\varphi).$$

Большая и меньшая суммарная ширина зубцов на диаметрах  $D_H$  и  $D_B$  магнитопровода статора (ротора)  $b_{\Sigma 1(2)}$  и  $b_{\Sigma 2(2)}$  с учетом распределения индукции в рабочем зазоре (6)  $B_{\delta}(\xi_T)$  и коэффициента заполнения ЭТС магнитопровода  $K_{\Sigma}$ :

$$b_{\Sigma 1(2)} = t_{H(2)} B_{\delta H} / (B_{\Sigma 1(2)} K_{\Sigma}) = \pi D_H \alpha_{H(2)}; \quad (13)$$

$$b_{\Sigma 2(2)} = t_{B(2)} B_{\delta B} / (B_{\Sigma 2(2)} K_{\Sigma}) = \pi D_B \alpha_{B(2)} / (\xi_T), \quad (14)$$

где  $t_{H(2)}$  и  $t_{B(2)}$  – зубцовые деления по диаметрам магнитопровода статора (ротора)  $D_H$  и  $D_B$ ;  $\alpha_{H(2)}$  и  $\alpha_{B(2)}$  – обратные коэффициенты зубцов статора (ротора), обратные к соотношениям  $K_{B_{\Sigma 1(2)}}$  и  $K_{B_{\Sigma 2(2)}}$  амплитуд индукций в зубце на  $D_H$  и  $D_B$   $B_{\Sigma 1(2)}$  и  $B_{\Sigma 2(2)}$  к индукции в рабочем зазоре  $B_{\delta}(\xi_T)$  и  $K_{\Sigma}$ :

$$\alpha_{H(2)} = 1 / (K_{\Sigma} K_{B_{\Sigma 1(2)}}); \quad (15)$$

$$\alpha_{B(2)} = (1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36}(\xi_T)^{0,15}) / (K_{\Sigma} K_{B_{\Sigma 2(2)}}). \quad (16)$$

На основе (13) – (16) с учетом постоянства суммарной ширины пазов  $b_{\Sigma 1(2)}$  по радиусу в плоскости активной поверхности магнитопровода определяется уравнение зубцово-пазовой структуры статора, как связь соотношения  $K_{B_{\Sigma 1}}$  от параметра  $\xi_T$

$$\begin{cases} b_{\Sigma 1} = \frac{\pi D_H (1 - \alpha_{H1})}{\pi D_B (1 - \alpha_{B1})} = 1 \Rightarrow \xi_T \frac{1 - \alpha_{H1}}{1 - \alpha_{B1}} = 1. \end{cases} \quad (17)$$

График зависимости (17) в функции  $K_{B_{\Sigma 1}} = f(\xi_T)$  для магнитопровода статора приведен на рис. 5 при максимальной индукции  $B_{\Sigma 1}$  на внутреннем диаметре зубцов статора 2,1 Тл и для значения индукции в рабочем зазоре на наружном диаметре  $B_{\delta H} = 0,75$  Тл, которые приняты исходя из рекомендуемых значений индукции в рабочем зазоре АД [16].

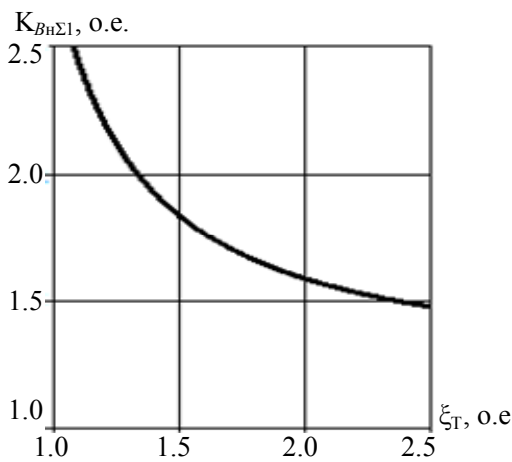


Рис. 5. Зависимость соотношения амплитуды индукции на внешней части зубца к индукции в рабочем зазоре от соотношения диаметров

При определении расчетного соотношения магнитопровода ротора  $K_{B_{\Sigma 2}}$  с углубленными пазами, обеспечивающего заданные пусковые характеристики, выполняются последовательные приближения. При известном  $\xi_T$  понижается значение  $B_{\Sigma 2}$  и методом итераций находится рациональная геометрия зубцово-пазовой зоны ротора.

После определения  $K_{B_{\Sigma 1}}$  в соответствии с  $\xi_T$  (по рис. 5), рассчитывается  $\alpha_{H1}$  и, с использованием (17) определяется суммарная ширина паза статора

$$b_{\Sigma 1} = 2\pi D_c (1 - \alpha_{H1}) / (1 + 1/\xi_T). \quad (18)$$

Высота зубца статора с учетом коэффициента шлица  $K_{\text{рш1}}$  [14], находится с учетом (12) и (17)

$$\begin{aligned} h_{z1} &= \frac{S_{1\Sigma}}{(1 - K_{\text{рш1}}) b_{\Sigma 1}} = \\ &= \frac{\Pi_{\text{ИД}}}{(1 - K_{\text{рш1}}) K_{\Sigma} D_c^3 4\pi \frac{(1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{H1})}{(1 + 1/\xi_T)^2}} = \\ &= \frac{4\sqrt{\Pi_{\text{ИД}}}}{\sqrt[4]{a_{\text{МТ}}^3 (1 - K_{\text{рш1}}) K_{\Sigma} 4\pi \frac{(1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{H1})}{(1 + 1/\xi_T)^2}}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Средняя ширина катушки  $b_{\text{ср}}$  и средняя длина витка обмотки  $l_{w1}$  статора ТАД определяется в соответствии с [9, 16] и (5):

$$\begin{aligned} l_{w1} &= 2(l_{\delta T} + l_{\text{л1}}) = 2D_c \frac{(1 - 1/\xi_T)}{(1 + 1/\xi_T)} + 2K_{\text{л}} b_{\text{ср}} = \\ &= 2D_c \left[ \frac{1 - 1/\xi_T}{1 + 1/\xi_T} + \frac{K_{\text{л}} \beta \pi}{2p} \right], \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\beta$  – коэффициент укорочения обмотки статора,  $l_{\text{л1}}$  и  $K_{\text{л}}$  – длина и коэффициент лобовой части катушки статора.

На основе (12) и (20) масса медной обмотки статора ТАД с плотностью проводника  $\rho_{\text{М}}$

$$m_{w1T} = \rho_{\text{М}} \frac{l_{w1}}{2} S_{1\Sigma} K_{\Sigma} = \rho_{\text{М}} \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}^3} \Pi_{w1T}^*,$$

где  $\Pi_{w1T}^*$  – относительный показатель массы активно-го материала обмотки статора

$$\Pi_{w1T}^* = \frac{1 + 1/\xi_T}{2\sqrt[4]{a_{\text{МТ}} (1 - 1/\xi_T)}} \left[ \frac{1 - 1/\xi_T}{1 + 1/\xi_T} + \frac{K_{\text{л}} \beta \pi}{2p} \right]. \quad (21)$$

Аналогично [14] определяются элементы геометрии алюминиевой обмотки ротора:

$$\begin{aligned} S_{2\Sigma} &= z_2 I_2 / J_2 = I_{\text{н}} (0,2 + 0,8 \cos \varphi) \times \\ &\times 2m_1 w_1 K_{\text{р}} K_{\text{у}} / K_{\text{ск}} = \\ &= \frac{\sqrt{\Pi_{\text{ИД}}} \gamma_1 (1 + 1/\xi_T)}{2\sqrt[4]{a_{\text{МТ}} (1 - 1/\xi_T)}}; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} h_{z2} &= \frac{S_{2\Sigma}}{(1 - K_{\text{рш2}}) b_{\Sigma 2}} = \\ &= \frac{4\sqrt{\Pi_{\text{ИД}}} \gamma_1}{\sqrt[4]{a_{\text{МТ}}^3 (1 - K_{\text{рш2}}) 4\pi \frac{(1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{H2})}{(1 + 1/\xi_T)^2}}}; \end{aligned} \quad (23)$$

$$S_3 = \frac{I_3}{J_3} = \frac{\gamma_1 \sqrt{\Pi_{\text{ИД}}} (1 + 1/\xi_T)}{\sqrt[4]{a_{\text{МТ}} 4\pi \gamma_2 (1 - 1/\xi_T)}}, \quad (24)$$

где  $S_{2\Sigma}$  и  $b_{\Sigma 2}$  – суммарные площадь и ширина пазов ротора;  $h_{z2}$  и  $S_3$  – высота зубцов и сечение короткозамыкающего кольца обмотки ротора;  $I_{\text{н}}$  – номинальный ток обмотки статора;  $z_2$  – число зубцов ротора;  $I_3$  и  $J_3$  – ток и плотность тока короткозамыкающего кольца ротора;  $\gamma_2$  – коэффициент трансформации, учитывающий уменьшение плотности тока  $J_3$  по сравнению с плотностью тока стержня  $J_2$ ;  $K_{\text{рш2}}$  – расчетное соотношение шлица зубца ротора,  $K_{\text{ск}}$  – коэффициент скоса пазов;  $\gamma_1$  – расчетный коэффициент трансформации статора относительно ротора, принимающий для реальных  $K_{\text{р}}$ ,  $K_{\text{у}}$ ,  $\cos \varphi$ ,  $K_{\text{ск}}$ ,  $J_{1(2)}$  значения [14]:

$$\gamma_1 = K_{\text{р}} K_{\text{у}} (0,2 + 0,8 \cos \varphi) J_1 / (K_{\text{ск}} J_2) = 1,338 \dots 2,785.$$

Масса роторной обмотки ТАД представляется на основе (22) – (24) выражением

$$m_{w2T} = \rho_a [l_{\delta T} S_{2\Sigma} + \pi(D_H + l_3 + D_B - l_3) S_3] = \rho_a \sqrt[4]{\Pi_{ИД}^3} \Pi_{w2T}^* \quad (25)$$

где  $l_3$  – радиальная длина короткозамыкающего кольца ротора;  $\rho_a$  и  $\Pi_{w2T}^*$  – плотность и относительный показатель массы алюминиевой короткозамкнутой обмотки

$$\Pi_{w2T}^* = \frac{\gamma_1}{2\sqrt[4]{a_{MT}}} \left[ 1 + \frac{(1+1/\xi_T)}{(1-1/\xi_T)\gamma_2 p} \right] \quad (25)$$

Поперечные сечения зубцов статора (ротора) определяются уравнением

$$S_{z1(2)} = \int_0^{D_H} \int_{D_B} \left( \frac{D}{2} - \frac{b_{\Sigma 1(2)}}{2\pi} \right) d \frac{D}{2} d\varphi = \pi \left[ \frac{1}{4} D_H^2 (1-1/\xi_T^2) - \frac{b_{\Sigma 1(2)} D_H}{2\pi} (1-1/\xi_T) \right] = \pi \sqrt{\Pi_{ИД}} \sqrt{a_{MT}} \left[ \frac{1-1/\xi_T}{1+1/\xi_T} - 2(1-\alpha_{H1(2)}) \frac{1-1/\xi_T}{(1+1/\xi_T)^2} \right] \quad (26)$$

Высота яра прямоугольного поперечного сечения эквивалентного по площади трапецидальному сечению яра статора (ротора) ТАД находится на основе [14, 16] и (5 – 7) по интегральному значению потока главного магнитного поля

$$h_{a1(2)} = \frac{\Phi_{\delta}}{2K_{3c} l_{\delta T} B_{a1(2)}} = \frac{B_{\delta H} (1-K_B) 2D_c^2 (1-1/\xi_T)(1+1/\xi_T)}{B_{\delta H} K_{3c} 2p(1+1/\xi_T) D_c (1-1/\xi_T) K_{Ba}} = \alpha_{31(2)} (1-K_B) D_c / p \quad (27)$$

где  $K_{Ba}$  – соотношение амплитуд индукций  $B_{\delta H}$  в рабочем зазоре на наружном диаметре и внешнем витке яра  $B_{aH}$ ;  $\alpha_{31(2)}$  – коэффициенты яра статора (ротора)  $\alpha_{31(2)} = 1/(K_{3c} K_{Ba})$ .

Площади аксиальных поперечных сечений ярем статора и ротора принимаются одинаковыми ( $S_{a1} \approx S_{a2} = S_a$ ) и определяются

$$S_a = \frac{\pi(D_H^2 - D_B^2)}{4} = \pi D_c^2 \frac{(1-1/\xi_T)}{(1+1/\xi_T)} = \sqrt{\Pi_{ИД}} \sqrt{a_{MT}} \pi \frac{(1-1/\xi_T)}{(1+1/\xi_T)} \quad (28)$$

Масса магнитопровода ТАД находится исходя из (19), (23), (26) – (28)

$$m_{MMT} = \rho_c K_{3c} [S_{z1} h_{z1} + S_{z2} h_{z2} + K_{Ta} (h_{a1} + h_{a2}) S_a] = \rho_c \sqrt[4]{\Pi_{ИД}^3} K_{Ta} \Pi_{MMT}^* \quad (29)$$

где  $\rho_c$  – плотность ЭТС,  $K_{Ta}$  и  $\Pi_{MMT}^*$  – коэффициент повышения массы трапецидального яра относительно эквивалентного по площади прямоугольного яра и относительный показатель массы магнитопровода ТАД:

$$K_{Ta} = \frac{1 + \frac{1-0,167(\xi_T-1)^{1,36} \xi_T^{0,15}}{\xi_T}}{(1+1/\xi_T)(1-K_B)} ;$$

$$\Pi_{MMT}^* = \frac{K_{3c}}{\sqrt[4]{a_{MT}}} \left( \frac{1}{(1-K_{pш1})K_{3п}} \left[ \frac{1+1/\xi_T}{4(1-\alpha_{H1})} - \frac{1}{2} \right] + \frac{\gamma_1}{(1-K_{pш2})} \left[ \frac{1+1/\xi_T}{4(1-\alpha_{H2})} - \frac{1}{2} \right] \right) + K_{3c} \sqrt[4]{a_{MT}^3} K_{Ta} \left( \frac{\pi}{p} \right) (\alpha_{31} + \alpha_{32}) \frac{1-1/\xi_T}{1+1/\xi_T} \quad (29)$$

Масса  $M_{AT}$  и зависящая от удельных цен меди  $C_m$ , алюминия  $C_a$  и ЭТС  $C_c$  стоимость  $C_{AT}$  активных материалов ТАД определяется на основе (21), (25), (29) выражением вида (1) аналогично [14]:

$$M_{AT} = m_{w1T} + m_{w2T} + m_{MMT} = \rho_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{MT}^* ;$$

$$C_{AT} = C_{w1T} + C_{w2T} + C_{MMT} = C_c \rho_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{CT}^* .$$

где  $\Pi_{MT}^*$  и  $\Pi_{CT}^*$  – относительные показатели массы и стоимости ЭМС, позволяющие определять наличие оптимальных геометрических соотношений ТАД по критериям минимумов массы и стоимости активной части, а также определять экстремальные значения УП  $a_{MTЭ}$  и  $\xi_{MTЭ}$ :

$$\Pi_{MT}^* = \rho_m \Pi_{w1T}^* / \rho_c + \rho_a \Pi_{w2T}^* / \rho_c + \Pi_{MMT}^* ; \quad (30)$$

$$\Pi_{CT}^* = C_m \rho_m \Pi_{w1T}^* / (C_c \rho_c) + C_a \rho_a \Pi_{w2T}^* / (C_c \rho_c) + \Pi_{MMT}^* . \quad (31)$$

Примеры результатов расчетов функциональных зависимостей (30) и (31) при следующих соотношениях:  $K_{Ba} = 2$  при  $p \leq 2$  и  $K_{Ba} = 1,5$  при  $p > 2$ ,  $\gamma_2 = 0,85$ ,  $K_{pш} = 0,12$ ,  $K_{3п} = 0,3$  для трех значений  $\gamma_1(1,338; 1,903; 2,785)$ , полученных при  $\rho_m/\rho_c = 8,9/7,65$ ;  $\rho_a/\rho_c = 2,7/7,65$ ;  $C_m/C_c = 90,26/13,5$ ;  $C_a/C_c = 47/13,5$  для ТАД с  $p \leq 4$ , приведены в табл. 1. Экстремумы показателей массы и стоимости  $\Pi_{MTЭ}^*$  и  $\Pi_{CTЭ}^*$  электромагнитно-эквивалентных АДК представлены в табл. 2. Графики зависимостей (30) и (31), соответствующих средним значениям расчетного коэффициента  $\gamma_1$  восьмиполюсных ТАД и АДК представлены на рис. 6.

Таблица 1

Экстремумы показателей массы и стоимости активной части торцевых асинхронных короткозамкнутых двигателей

$\gamma_1$ , о.е.	$\xi_{TЭ}$	$\lambda_{TЭ}$	$a_{MTЭ}$ , о.е.	$\Pi_{MTЭ}^*$ , о.е.	$\xi_{CTЭ}$	$\lambda_{CTЭ}$	$a_{CTЭ}$ , о.е.	$\Pi_{CTЭ}^*$ , о.е.
$p = 1$								
1,338	1,80	0,286	3,197	8,893	2,50	0,429	6,688	25,647
1,903	1,80	0,286	3,508	9,532	2,45	0,420	7,517	26,773
2,785	1,75	0,259	4,459	10,500	2,40	0,412	8,429	28,498
$p = 2$								
1,338	1,55	0,216	6,465	5,615	2,15	0,365	11,425	15,259
1,903	1,50	0,200	7,869	6,030	2,10	0,355	12,783	15,986
2,785	1,50	0,200	8,946	6,655	2,10	0,355	13,853	17,091
$p = 3$								
1,338	1,45	0,184	7,452	4,681	1,95	0,322	12,043	12,425
1,903	1,45	0,184	8,097	5,035	1,90	0,310	13,626	13,037
2,785	1,45	0,184	9,290	5,571	1,90	0,310	15,084	13,970
$p = 4$								
1,338	1,45	0,184	8,793	3,971	1,80	0,286	16,760	10,312
1,903	1,45	0,184	9,712	4,279	1,75	0,273	18,792	10,832
2,785	1,45	0,184	11,003	4,747	1,75	0,273	20,818	11,620

Таблица 2

Экстремумы показателей массы и стоимости активной части классических асинхронных короткозамкнутых двигателей

$\gamma_1$ , о.е.	$\lambda_{кЭ}$	$a_{МКЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{МКЭ}$ , о.е.	$\lambda_{кЭ}$	$a_{МКЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{СКЭ}$ , о.е.
1,338	1,00	5,50	11,176	2,30	2,50	25,459
1,903	1,10	7,00	12,607	2,20	3,50	26,516
2,785	0,90	12,50	14,442	2,05	5,50	28,760
$p = 2$						
1,338	0,60	9,25	7,200	1,75	5,00	18,010
1,903	0,50	15,50	7,869	1,65	6,00	18,881
2,785	0,35	32,50	8,846	1,40	8,75	20,238
$p = 3$						
1,338	0,45	12,67	6,388	1,30	7,50	16,109
1,903	0,35	22,67	6,963	1,20	9,17	16,899
2,785	0,30	38,50	7,805	1,05	12,50	18,115
$p = 4$						
1,338	0,40	15,5	5,531	1,00	13,25	14,150
1,903	0,35	23,88	6,002	0,95	15,25	14,867
2,785	0,25	48,50	6,693	0,85	20,13	15,957

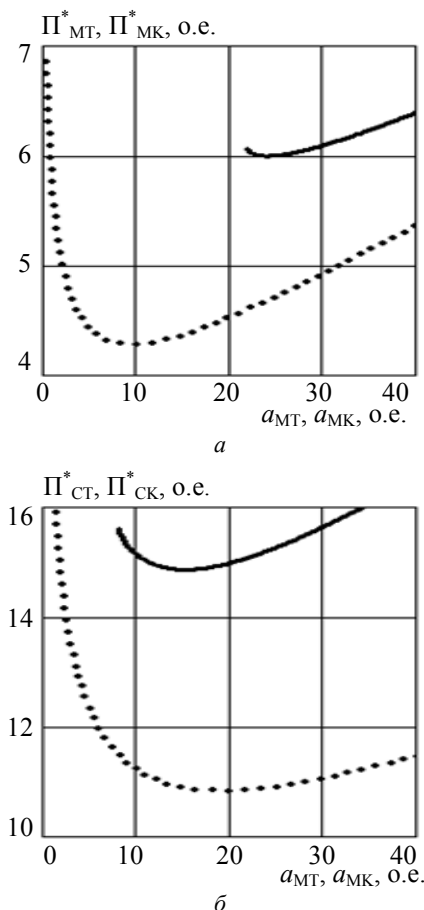


Рис. 6. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) восьмиполюсных вариантов электромагнитных систем асинхронных двигателей: торцевого (···) и электромагнитно-эквивалентного классического (—) при  $\gamma_1 = 1,903$

### Выводы.

1. Функциональные зависимости массы и стоимости активной части ТАД являются унимодальными функ-

циями и характеризуются согласующимися с [9] экстремальными значениями  $a_{MTЭ}$  и  $\xi_{ТЭ}$ , а также согласуются с результатом разработки ТАД с  $2p = 4$  [13].

2. Установлено, что ЭМС ТАД с трапециевидными сечениями ярем отличаются от электромагнитно-эквивалентных ЭМС АДК при  $p = 2$ ,  $p = 3$  и  $p = 4$  улучшенными показателями массы и стоимости соответственно на (15...23) % и (10...15) %, (23...28) % и (19...23) %, (24...29) % и (20...27) %, а при  $p = 1$  показатель массы улучшается на (15...24) %, а показатель стоимости ухудшается на (1...7) %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев С.А. Очерки по истории развития электрических машин. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 215 с.
2. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых асинхронных двигателей // Электричество. – 1996. – №8. – С. 37-42.
3. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
4. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
5. Ставинский А.А., Забора И.Г. Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств // Проблемы автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2006. – С. 194-202.
6. Ставинский А.А., Григоренко Г.Г. Определение диаметров активных частей торцевых электрических машин с учетом сил одностороннего магнитного притяжения // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. – 1979. – №28. – С. 80-85.
7. Игнатов В.А., Ставинский А.А., Забора И.Г. Исследования распределения магнитного поля в активном объеме торцевых электрических машин с витым магнитопроводом // Электротехника. – 1983. – №8. – С. 27-30.
8. Игнатов В.А., Забора И.Г., Ставинский А.А. Использование активного объема и расчет намагничивающего тока торцевых асинхронных машин // Электричество. – 1983. – №8. – С. 68-70.
9. Игнатов В.А., Ставинский А.А. Зависимости технико-экономических показателей торцевых асинхронных двигателей от соотношения диаметров активных частей // Электричество. – 1984. – №6. – С. 28-34.
10. А.с. 669454 СССР, МКИ<sup>2</sup> Н02К9/04, Н02К5/16. Электрическая торцевая машина / А.А.Ставинский (СССР). – № 2561759/24 – 07; Заявл. 02.01.78; Опубл. 25.06.79, Бюл. № 23.
11. А.с. 788275 СССР, МКИ<sup>3</sup> Н02К1/06. Статор торцевой электрической машины / А.А.Ставинский (СССР). – № 2739200/24 – 07; Заявл. 22.02.79; Опубл. 15.12.80, Бюл. № 46.
12. А.с. 936225 СССР, МКИ<sup>3</sup> Н02К1/06. Электрическая торцевая машина / А.А.Ставинский (СССР). – № 2930999/24 – 07; Заявл. 26.05.80; Опубл. 15.06.82, Бюл. № 22.
13. Пашков Н.И. Торцевые асинхронные двигатели малой мощности меньшей материал- и трудоемкости изготовления // Электротехника. – 2007. – №7. – С. 8-16.
14. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – №5. – С. 37-44.
15. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований // Электричество. – 2014. – №9. – С. 34-43.
16. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд.-ние, 1990. – 368 с.

## REFERENCES

1. Gusev S.A. *Ocherki po istorii razvitiia elektricheskikh mashin* [Essays on the history of the development of electrical machines]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1955. 215 p. (Rus).
2. Kazanskii V.M. Crisis and prospects for the development of small induction motors. *Electrichestvo – Electricity*, 1996, no.8, pp. 37-42. (Rus).
3. Palastin L.M. *Elektricheskie mashiny avtonomnykh istochnikov pitaniia* [Electric machines of independent power supply]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 464 p. (Rus).
4. Ignatov V.A., Vil'danov K.Ia. *Tortsevye asinkhronnye elektrodvigateli integral'nogo izgotovleniia* [Axial field induction integrated manufacturing motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 304 p. (Rus).
5. Stavinskii A.A., Zabora I.G. Improvement of equipment diving systems based on special designs of electromechanical devices. *Problemi avtomatiki ta elektroobladnannia transportnykh zasobiv: Materiali Vseukraïns'koï nauk.-tekhn. konf. z mizhnarodnoiu uchastiu* [Abstracts of Int. Sci.-Pract. Conf. «Problems of the automatics and the electrical equipment of vehicles»]. Mykolaiv, NUS, 2006, pp. 194-202. (Rus).
6. Stavinskii A.A., Grigorenko G.G. Determination of the active parts diameter of axial electrical machines with considering unilateral magnetic attraction forces. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie. Resp. mezhved. nauch.-tekhn. sbornik – Electrical machine-building and electrical equipment. Republican interdepartmental scientific-technical collection*, 1979, vol.28, pp. 80-85. (Rus).
7. Ignatov V.A., Stavinskii A.A., Zabora I.G. Investigation of the distribution of the magnetic field in the active volume of axial electrical machines with the wound magnetic core. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 1983, no.8, pp. 27-30. (Rus).
8. Ignatov V.A., Zabora I.G., Stavinskii A.A. Using the active volume and the calculation of the magnetizing current of axial induction machines. *Electrichestvo – Electricity*, 1983, no.8, pp. 68-70. (Rus).
9. Ignatov V.A., Stavinskii A.A. Dependence of technical and economic indications of axial induction motors on the ratio of the active parts diameter. *Electrichestvo – Electricity*, 1984, no.6, pp. 28-34. (Rus).
10. Stavinskii A.A. *Elektricheskaia tortsevaia mashina* [Axial field electrical machine]. Inventor's certificate of USSR, no.669454, 1979. (Rus).
11. Stavinskii A.A. *Stator tortsevoi elektricheskoi mashiny* [Stator of the axial field electrical machine]. Inventor's certificate of USSR, no.788275, 1980. (Rus).
12. Stavinskii A.A. *Elektricheskaia tortsevaia mashina* [Axial field electrical machine]. Inventor's certificate of USSR, no.936225, 1982. (Rus).
13. Pashkov N.I. Axial induction motors of the low power and the less material and the labor input of manufacturing. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2007, no.7, pp. 8-16. (Rus).
14. Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Application of a relative technical level index method to induction motor optimization problems. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.5, pp. 37-44. (Rus).
15. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeeva E.A. Optimizational comparative analysis of structures static electromagnetic systems P.1 Variants and method of estimate transformations. *Electrichestvo – Electricity*, 2014, no.9, pp. 34-43. (Rus).
16. Dombrovskii V.V., Zaichik V.M. *Asinkhronnye mashiny: teoriia, raschet, elementy proektirovaniia* [Asynchronous machines: theory, calculation, design elements]. Leningrad, Energoatomizdat. Publ., 1990. 368 p. (Rus).

*Поступила (received) 21.01.2015*

*Ставинский Андрей Андреевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,*

*Пальчиков Олег Олегович<sup>1</sup>, аспирант,*

*<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения*

*имени адмирала Макарова,*

*54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9,*

*тел/phone +38 0512 399453, e-mail: ole2013hulk@yandex.ua*

*A.A. Stavinskii<sup>1</sup>, O.O. Palchykov<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Admiral Makarov National University of Shipbuilding,*

*9, Geroyev Stalingrada Ave., Mykolaiv, 54025, Ukraine.*

**Comparative analysis of weight and cost indications of induction motors with cylindrical and axial air gaps.**

**Purpose.** *To find the analytical expressions of determining the optimum geometric dimensions by criteria of the weight minimum and the cost minimum of axial field squirrel-cage induction motors and to compare traditional and axial field motors. **Methodology.** We have applied the adapted method of the relative indications of the technical level with relative controlled variables. We have used the approximation of the experimental dependence of the distribution of the induction in the air gap and the integral averaging of the electromagnetic characteristics. **Results.** We have developed the mathematical model for determining the optimum geometric dimensions by criteria of the weight minimum and the cost minimum of the active part of axial field squirrel-cage induction motors taking into account the radial distribution of the induction in the air gap and teeth. We have considered the comparative analysis of the indications of the weight and the cost of traditional and axial designs of electromagnetic equivalent motors. **Originality.** For the first time we have created the relative units mathematical model of the weight and the cost of the active part of axial field squirrel-cage induction motors with the uneven distribution of the magnetic flux in the core and investigated the effect of the geometric relationships on the materials consumption and cost of axial field motors. **Practical value.** Based on the superior parametric compatibility and the high material savings of axial motors the expediency of replacing traditional induction motors to axial field induction motors has been proved in the special transport drives. Also obtained by simulation optimal geometric relationships of the magnetic circuit can be used in the manufacture and design of axial motors by criteria of the weight minimum and the cost minimum. References 16, tables 2, figures 6.*

**Key words:** **indications of the technical level, optimum geometric dimensions, traditional and axial field motors.**