

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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 асинхронних короткозамкнених двигунів та виконано порівняльний аналіз вказаних показників при традиційному та оберненому виконаннях статора і ротора.

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 асинхронных короткозамкнутых двигателей и выполнен сравнительный анализ указанных показателей при традиционном и обратном исполнении статора и ротора.

Факторы снижения энергетических потерь и удельной материалоемкости неизменных на протяжении многих десятилетий "традиционных" структур электромагнитных систем (ЭМС) асинхронных двигателей (АД) усовершенствованием электротехнических материалов во второй половине XX века дополнены возможностями оптимизационного проектирования на основе прогресса вычислительной техники [1]. При этом сформировалось мнение [2-8], что в последней четверти прошедшего столетия из традиционных ЭМС и конструкции АД "выжато все". Согласно [3] развитие электромашиностроения в конце XX века "приостановлено". Однако прошедшие 30 лет ничего не изменили, целый ряд "новых" серий АД созданных в начале наступившего столетия практически не имеет преимуществ перед предшествующими разработками [7, 8]. Концептуально ЭМС современного обще-

промышленного АД не отличается от исходной структуры (рис. 1,а), разработанной М.О. Доливо-Добровольским. Его конструктивная часть, в частности обрешенный корпус с аксиальным обдувом, соответствует схеме начала XX века и, согласно [3, 7], не является эффективной. Также развивались с расширением структурного и видового состава, специальные АД, в том числе отличающиеся внешним положением ротора (рис. 1,б) и аксиальным рабочим зазором (рис. 1,в) [6, 8-12]. Применение электрических машин специального назначения и исполнения взамен их аналогов единых серий создает возможности усовершенствования ряда механизмов, технических систем и комплексов [12-16].

В связи с возрастанием значимости использования специальных АД, в дополнение к определению соотношения главных размеров и элементов ЭМС

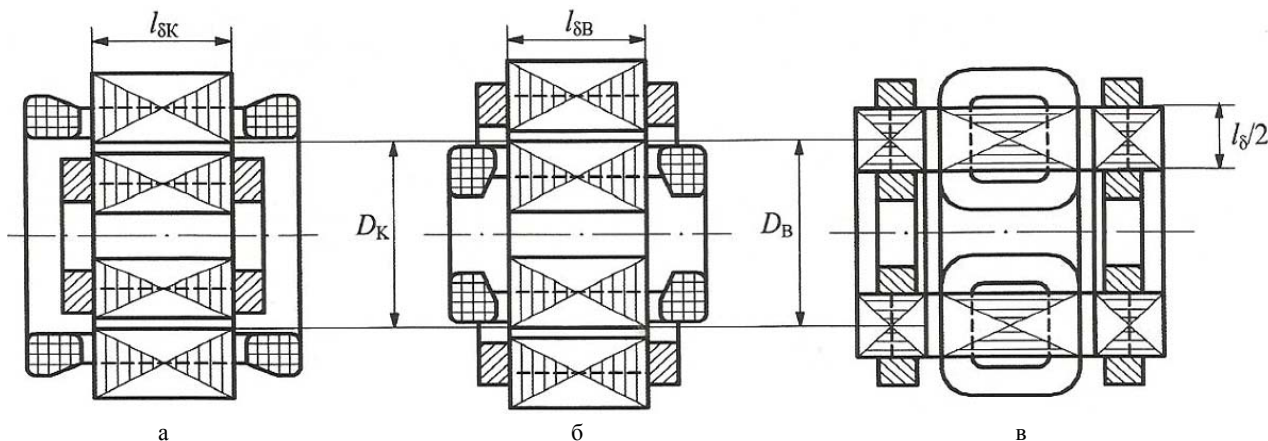


Рис. 1. Электромагнитные системы асинхронных короткозамкнутых двигателей

цилиндрического (рис. 1,а,б) и аксиального (рис. 1,в) исполнений [11, 13], возникает целесообразность решения задач оптимизационного сравнительного анализа за их массостоймостных и энергетических показателей. Кроме того, возникает необходимость аналитической оценки результатов структурного преобразования ЭМС, например разделения (секционирования) магнитопроводов ротора и статора (рис. 1,в, рис. 2,а,б, рис. 3,а) с целью достижения специальных требований – улучшения виброакустических характеристик [10, 14], а также контрроторного вращения [15]. Другими при-

мерами секционирования и преобразования структур ЭМС является замена традиционной плоской (рис. 1,а,б) или цилиндрической (рис. 1,в) конфигураций элементарных слоев магнитопровода соответственно на конусно-плоскостную (рис. 3,а,б) и конусно-цилиндрическую (рис. 3,в,г) конфигурации [8-12].

При этом общими критериями структурной и параметрической оптимизации ЭМС АД отличающихся положением в пространстве и конфигурацией элементов, а также числом степеней свободы движения,

могут служить определяющие основные массо-стоимостные и энергетические характеристики показатели технического уровня [17].

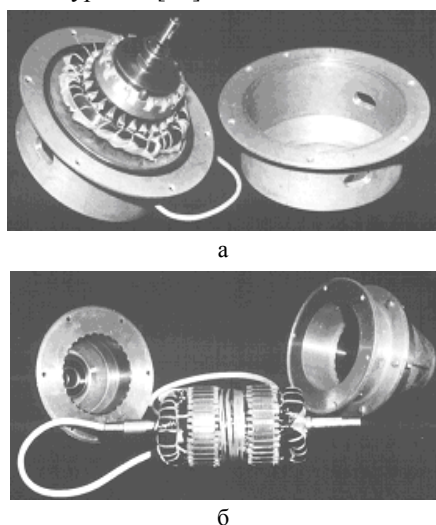


Рис. 2. Экспериментальные образцы специальных асинхронных двигателей – торцевого двухроторного (а) и обращенного с двухпакетным статором и ротором (б)

Цель работы – развитие метода оценки результатов структурных преобразований статических ЭМС



Рис. 3. Специальные конструкции: шестипольный обращенный асинхронный двигатель 0,6 кВт со снятым полуротором (а), пакеты и пластина магнитопровода полуротора (б), магнитопровод (в) и ротор (г) торцевого двухполюсного двигателя 1,5 кВт (380 В, 50 Гц)

Масса и стоимость ЭМС электрической машины снижаются, а потери возрастают с увеличением электромагнитных нагрузок A , B_δ и плотности тока статора (ротора) $J_{1(2)}$, а также отношений K_{Bz} и K_{Ba} к индукции B_δ соответственно амплитуд индукции зубца $B_{z1(2)}$ и яра $B_{a1(2)}$ статора (ротора), которые соответствуют диапазонам [1]:

$$K_{Bz} = K_{Bz1} = B_{z1}/B_\delta \approx K_{Bz2} = B_{z2}/B_\delta = 2,0 \dots 3,0; \quad (1)$$

$$K_{Ba} = K_{Ba1} = B_{a1}/B_\delta \approx K_{Ba2} = B_{a2}/B_\delta = 1,0 \dots 2,0. \quad (2)$$

Принципу электромагнитной эквивалентности сравнения различных ЭМС соответствует равенство P' и идентичности соответственно электромагнитных нагрузок, коэффициентов K_{Bz} (1) и K_{Ba} (2), а также полного коэффициента заполнения паза статора $K_{зп}$ и коэффициента заполнения магнитопровода электротехнической сталью (ЭТС) $K_{зс}$ [1] сравниваемых электрических машин [11, 13]. На массо-стоимостные и энергетические характеристики объектов сравнения, подобных конструкциям (рис. 1-3), при идентичных электромагнитных нагрузках и способах охлаждения существенное влияние оказывают специфические особенности структуры и геометрии элементов ЭМС [11].

В целом задачу оптимизации АД можно сформулировать как поиск экстремума ЦФ $F_{ц}$, которая соот-

[18] на основе целевых функций (ЦФ) с относительными коэффициентами-показателями и геометрическими относительными управляемыми переменными (УП), использованием указанного метода для анализа электромеханических преобразователей. Также составной частью работы является сравнение массо-стоимостных показателей ЭМС короткозамкнутых АД (рис. 1,а,б) цилиндрического исполнения (АДК) и с внешним ротором (АДВР).

При разработке электрической машины применяются различные методы оптимизации, использующие понятие машинной постоянной [1, 13].

Машинная постоянная C_A связывает диаметр активной поверхности D и активную длину l_δ статора с расчетной (электромагнитной) мощностью P' , частотой вращения магнитного поля Ω_1 , линейной нагрузкой статора A и амплитудой индукции в рабочем зазоре B_δ электрической машины

$$C_A = D^2 l_\delta / P' = K_{CA} / (K_p K_y K_{ск} \Omega_1 A B_\delta),$$

где K_{CA} – коэффициент, определяющийся принятой системой единиц и особенностями распределения магнитного поля в рабочем зазоре; K_p , K_y и $K_{ск}$ – коэффициенты распределения, укорочения и скоса обмоток статора и ротора.

ветствует заданному критерию оптимизации

$$F_{ц} = f(\Sigma ИД + \Sigma ПО + \Sigma УП), \quad (3)$$

где $\Sigma ИД$ – исходные данные технического задания и константы проектирования; $\Sigma ПО$ – проектные ограничения, определяемые требованиями технического задания; $\Sigma УП$ – совокупность УП.

В общем случае $\Sigma ИД$ включает величины номинальных мощности $P_{н}$, фазного напряжения U_1 и частоты f_1 ; числа фаз m , пар полюсов p и пазов на полюс и фазу q_1 ; числа параллельных ветвей a_1 и определяющий обмоточный коэффициент тип обмотки статора. Величины и показатели $\Sigma ПО$ соответствуют требованиям технического задания и состоят из основных проектных ограничений – превышения температуры обмотки, кратностей моментов и пускового тока, а также специальных ограничений, например уровней шума и вибрации. В состав $\Sigma УП$ обычно входят величины и параметры главных размеров и электромагнитные нагрузки [1]. В связи с большим числом слагаемых (3), задача оптимизации АД является весьма сложной, а УП в виде A , B_δ и $J_{1(2)}$ зависят от мощности, частоты вращения, назначения, способа охлаждения АД и проектных ограничений и изменяются в относительно широких пределах. Поэтому

сравнительный анализ вариантов АД с "классическим" и нетрадиционным выполнением элементов активной части (рис. 1-3) может быть выполнен на основе сопоставления ЦФ структурной оптимизации ЭМС. Подобные ЦФ должны соответствовать основным показателям технического уровня [17] и удовлетворять условию универсальности, то есть приемлемости и идентичности их общего вида и УП для сравниваемых вариантов ЭМС. Кроме того, для исключения зависимости от мощности и способа охлаждения, основные показатели и УП должны быть представлены в относительных единицах.

Изложенным условиям электромагнитной эквивалентности и универсальности соответствует метод оптимизации [18], согласно которому любая структура ЭМС может быть представлена совокупностью полных целевых функций $F_{\pi i}$

$$F_{\pi i} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 K_i \Pi_{ia}^* \quad (4)$$

где $\Pi_{ИД}$ – показатель исходных данных (технического задания) проектирования; K_i и Π_{ia}^* – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов и относительный коэффициент-показатель массы ($i = 1$), стоимости ($i = 2$) и потерь активной мощности ($i = 3$) ЭМС, являющийся функцией относительных геометрических УП.

Сравнительный анализ различных вариантов ЭМС выполняется на основе определения и сопоставления Π_{ia}^* при идентичных $\Pi_{ИД}$ содержащих, в соответствии с понятием C_A , составляющую P' связанную с P_n выражением

$$P' = K_E P_n / (\eta \cos \varphi),$$

где K_E – соотношение ЭДС фазы статора и U_1 ; η и $\cos \varphi$ – значения коэффициента полезного действия и энергетического коэффициента АД.

Для определения ЦФ (4) используются известные выражения числа эффективных проводников паза статора U_n , чисел витков фазы и зубцов статора w_1 и z_1 , а также магнитного потока рабочего зазора Φ_δ [1]:

$$U_n = w_1 a_1 / (p q_1); \quad (5)$$

$$w_1 = K_E U_1 / (4,44 K_p K_y f_1 \Phi_\delta); \quad (6)$$

$$z_1 = 2 p m_1 q_1; \quad (7)$$

$$\Phi_\delta = \lambda_\delta D^2 B_\delta / p, \quad (8)$$

где λ_δ – первая геометрическая относительная УП оптимизации электрической машины, связывающая l_δ и D .

Указанная УП в рассматриваемой задаче соответственно определяется длиной $l_{\delta K(B)}$ и диаметром $D_{K(B)}$ активной поверхности статора АДК (АДВР)

$$\lambda_{\delta K(B)} = l_{\delta K(B)} / D_{K(B)}. \quad (9)$$

Уравнения функций $F_{\pi(2)}$ массы (стоимости) электромагнитно-эквивалентных ЭМС различных АД составляются на основе определения суммарной площади пазов в поперечном слое магнитопровода статора

$$S_{1\Sigma} = z_1 U_n S_{\text{эф}} / K_{\text{зп}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{эф}}$ – площадь сечения эффективного проводника обмотки статора,

$$S_{\text{эф}} = P_n / (a_1 m_1 J_1 U_1 \eta \cos \varphi). \quad (11)$$

Подстановка (5) – (9) и (11) преобразует (10) к виду, соответствующему АДК (АДВР)

$$S_{1\Sigma K(B)} = \Pi_{ИД} / (K_{\text{зп}} \lambda_{\delta K(B)} D_{K(B)}^2), \quad (12)$$

где $\Pi_{ИД}$ рассматриваемых электромагнитно-эквивалентных АД определяются выражением и геометрической размерностью:

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

$$[\Pi_{ИД}] = [K_{\text{зп}} \lambda_{\delta K(B)} D_{K(B)}^2 S_{1\Sigma K(B)}] = [M^4]. \quad (13)$$

На основании (13) и идентичности $\Pi_{ИД}$ для сравниваемых АДК и АДВР вводится вторая геометрическая относительная УП оптимизации ЭМС АД

$$a_{MK(B)} = D_{K(B)}^4 / \Pi_{ИД}. \quad (14)$$

В ЭМС АД малой и средней мощности, а также в рассматриваемых АДК и АДВР используются паза формы, которая образована зубцами статора (ротора) с параллельными стенками и высотой $h_{z1(2)K}$ и $h_{z1(2)B}$ (рис. 4). Наиболее распространенные трапецеидальные и грушевидные пазы подобной формы [1] заменяются, при сохранении ширины и высоты зубцов, эквивалентными по площади и близкими по конфигурации расчетными пазами трапецеидальной формы с расчетной высотой шлица $h_{p1(2)K}$ и $h_{p1(2)B}$ статора (ротора) (рис. 4) соответственно АДК и АДВР [19].

Соответствующая (12) суммарная площадь размещения проводников фаз с изоляцией в поперечном слое статора АДК (АДВР) (рис. 4) определяется выражением

$$S_{1\Sigma K(B)} = [(b_{11\Sigma K(B)} + b_{12\Sigma K(B)})/2] (h_{z1K(B)} - h_{p1K(B)}), \quad (15)$$

где $b_{11\Sigma K(B)}$ и $b_{12\Sigma K(B)}$ – суммы размеров $b_{11K(B)}$ и $b_{12K(B)}$ оснований трапеций расчетных пазов в поперечном слое магнитопровода статора АДК (АДВР) (рис. 4):

$$b_{11\Sigma K} = z_1 b_{11K} = \pi(D_K + 2h_{z1K}) - \pi D_K / (K_{\text{зс}} K_{Bz}); \quad (16)$$

$$b_{12\Sigma K} = z_1 b_{12K} = \pi(D_K + 2h_{p1K}) - \pi D_K / (K_{\text{зс}} K_{Bz}); \quad (17)$$

$$b_{11\Sigma B} = z_1 b_{11B} = \pi(D_B - 2h_{z1B}) - \pi D_B / (K_{\text{зс}} K_{Bz}); \quad (18)$$

$$b_{12\Sigma B} = z_1 b_{12B} = \pi(D_B - 2h_{p1B}) - \pi D_B / (K_{\text{зс}} K_{Bz}). \quad (19)$$

На основании равенства левых частей (12) и (15) и после подстановки (16), (17) и (18), (19) определяются, аналогично [19], квадратные уравнения расчета высоты зубца статора АДК (АДВР):

$$h_{z1K}^2 - \alpha_1 D_K h_{z1K} - \alpha_2 \Pi_{ИД} / (K_{\text{зп}} \lambda_{\delta K} D_K^2) = 0; \quad (20)$$

$$h_{z1B}^2 + \alpha_1 D_B h_{z1B} + \alpha_2 \Pi_{ИД} / (K_{\text{зп}} \lambda_{\delta B} D_B^2) = 0, \quad (21)$$

где α_1 и α_2 – множители:

$$\alpha_1 = [1 / (K_{\text{зс}} K_{Bz}) - 1] / (1 + K_{\text{рш}}); \quad (22)$$

$$\alpha_2 = 1 / [\pi(1 - K_{\text{рш}}^2)]. \quad (23)$$

Входящий в (22), (23) коэффициент $K_{\text{рш}}$ исходя из реальных конфигураций зубцово-пазовых структур АД [1] определяется соотношением

$$K_{\text{рш}} = h_{p1(2)K} / h_{z1(2)K} = h_{p1(2)B} / h_{z1(2)B} = 0,04 \dots 0,12. \quad (24)$$

Решения уравнений (20) и (21) относительно $h_{z1K(B)}$ имеют вид:

$$h_{z1K} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{MK}} f_{K1}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}); \quad (25)$$

$$h_{z1B} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{MB}} f_{B1}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta B}, a_{MB}), \quad (26)$$

где $f_{K1}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K}, a_{MK})$ и $f_{B1}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta B}, a_{MB})$ – функциональные множители упрощения записи:

$$f_{K1}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) = 0,5 \alpha_1 + \sqrt{0,25 \alpha_1^2 + \alpha_2 / (K_{\text{зп}} \lambda_{\delta K} a_{MK})};$$

$$f_{B1}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta B}, a_{MB}) = -0,5 \alpha_1 - \sqrt{0,25 \alpha_1^2 - \alpha_2 / (K_{\text{зп}} \lambda_{\delta B} a_{MB})}.$$

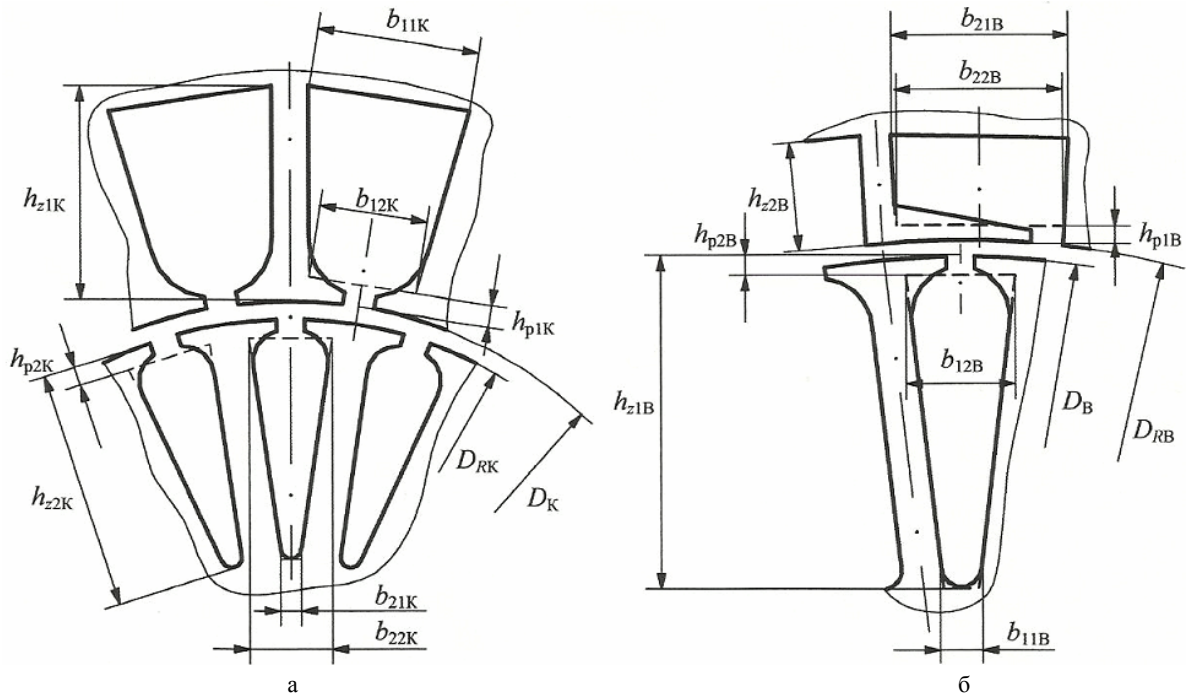


Рис. 4. Конфигурации и геометрические параметры зубцово-пазовых структур асинхронных двигателей классического исполнения (а) и с внешним ротором (б)

Суммарная площадь пазов в поперечном сечении магнитопровода короткозамкнутого ротора АДК (АДВР) определяется, с использованием (6), (8), (13) и на основе [1]

$$S_{2\Sigma K(B)} = z_2 I_2 / J_2 = I_{1H} (0,2 + 0,8 \cos \varphi) 2m_1 w_1 K_p K_y / K_{CK} = \gamma_1 \Pi_{ИД} / (\lambda_{\delta K(B)} D_{K(B)}^2), \quad (27)$$

где γ_1 – расчетное соотношение, принимающее для реальных K_p , K_y , $\cos \varphi$, K_{CK} , $J_{1(2)}$ значения

$$\gamma_1 = K_p K_y (0,2 + 0,8 \cos \varphi) J_{1(2)} / (K_{CK} J_2) = 1,338 \dots 2,785. \quad (28)$$

Соответствующая (28) суммарная площадь пазов в поперечном сечении магнитопровода ротора АДК (АДВР) (рис. 4)

$$S_{2\Sigma K(B)} = [(b_{21\Sigma K(B)} + b_{22\Sigma K(B)}) / 2] (h_{z2K(B)} - h_{pK(B)}), \quad (29)$$

где $b_{21\Sigma K(B)}$ и $b_{22\Sigma K(B)}$ – суммы размеров $b_{21K(B)}$ и $b_{22K(B)}$ оснований трапеций расчетных пазов в поперечном сечении магнитопровода ротора диаметра $D_{RK(B)}$ (рис. 4):

$$b_{21\Sigma K} = z_2 b_{21K} = \pi(D_{RK} - 2h_{z2K}) - \pi D_{RK} / (K_{3C} K_{Bz}); \quad (30)$$

$$b_{22\Sigma K} = z_2 b_{22K} = \pi(D_{RK} - 2h_{p2K}) - \pi D_{RK} / (K_{3C} K_{Bz}); \quad (31)$$

$$b_{21\Sigma B} = z_2 b_{21B} = \pi(D_{RB} + 2h_{z2B}) - \pi D_{RB} / (K_{3C} K_{Bz}); \quad (32)$$

$$b_{22\Sigma B} = z_2 b_{22B} = \pi(D_{RB} + 2h_{p2B}) - \pi D_{RB} / (K_{3C} K_{Bz}). \quad (33)$$

На основании равенства левых частей (27) и (29) и подстановки (30) – (33) определяются, аналогично [19], квадратные уравнения расчета высоты зубца ротора АДК (АДВР):

$$h_{z2K}^2 + K_D \alpha_1 D_K h_{z2K} + \alpha_2 \gamma_1 \Pi_{ИД} / (\lambda_{\delta K} D_K^2) = 0; \quad (34)$$

$$h_{z2B}^2 - (1/K_D) \alpha_1 D_B h_{z2B} - \alpha_2 \gamma_1 \Pi_{ИД} / (\lambda_{\delta B} D_B^2) = 0, \quad (35)$$

где K_D – коэффициент реальных соотношений [1] диаметров активных поверхностей статора и ротора

$$K_D = D_{RK} / D_K \approx D_B / D_{RB} = 0,985 \dots 0,995. \quad (36)$$

Решения уравнений (34), (35) относительно $h_{z2K(B)}$:

$$h_{z2K} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{MK} f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{MK})}; \quad (37)$$

$$h_{z2B} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{MB} f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB})}, \quad (38)$$

где $f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{MK})$ и $f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB})$ – функциональные множители упрощения записи:

$$f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{MK}) = -0,5 K_D \alpha_1 - \sqrt{0,25 K_D^2 \alpha_1^2 - \alpha_2 \gamma_1 / (\lambda_{\delta K} a_{MK})};$$

$$f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB}) = (0,5 \alpha_1 / K_D) + \sqrt{(0,25 \alpha_1^2 / K_D^2) + \alpha_2 \gamma_1 / (\lambda_{\delta B} a_{MB})}.$$

Высота яра статора (ротора) АДК (АДВР) определяется на основе [1] и (2), (8) и (9), (14)

$$h_{a1(2)K(B)} = \Phi_{\delta} / (2 K_{3C} B_{a1(2)} \lambda_{\delta K(B)}) = \alpha_3 \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{MK(B)} / p}, \quad (39)$$

где α_3 – коэффициент,

$$\alpha_3 = 1 / (2 K_{3C} K_{Ba}). \quad (40)$$

Средняя длина витка обмотки статора АДК (АДВР) определяется, в соответствии с [1], а также на основе (9) и (25), (26):

$$l_{w1K} = 2l_{\delta K} + \beta \pi (1,16 + 0,14 p) (D_K + h_{z1K}) / p = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{MK}} \times \quad (41)$$

$$\times \{2\lambda_{\delta K} + \beta \pi (1,16 + 0,14 p) [1 + f_{K1}(K_{3C}, \lambda_{\delta K}, a_{MK})] / p\};$$

$$l_{w1B} = 2l_{\delta B} + \beta \pi (1,16 + 0,14 p) (D_B - h_{z1B}) / p = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{MB}} \times \quad (42)$$

$$\times \{2\lambda_{\delta B} + \beta \pi (1,16 + 0,14 p) [1 - f_{B1}(K_{3C}, \lambda_{\delta B}, a_{MB})] / p\},$$

где β – относительный шаг обмотки статора.

Масса меди обмотки статора АДК (АДВР) определяется с использованием (9), (12) и (41), (42)

$$m_{w1K(B)} = \rho_m l_{w1K(B)} S_{1K(B)} / 2 = \rho_m \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{w1K(B)}^*, \quad (43)$$

где ρ_m – плотность меди обмотки статора; $\Pi_{w1K(B)}^*$ – показатель массы активного материала обмотки статора:

$$\Pi_{w1K}^* = \{ \lambda_{\delta K} + \beta \pi (1,16 + 0,14 p) [1 + f_{K1}(K_{3C}, \lambda_{\delta K}, a_{MK})] / (2p) \} / \quad (44)$$

$$(\lambda_{\delta K} \sqrt[4]{a_{MK}})$$

$$\Pi_{w1B}^* = \{ \lambda_{\delta B} + \beta \pi (1,16 + 0,14 p) [1 - f_{B1}(K_{3C}, \lambda_{\delta B}, a_{MB})] / (2p) \} / \quad (45)$$

$$(\lambda_{\delta B} \sqrt[4]{a_{MB}})$$

Диаметр $D_{3K(B)}$ и величина поперечного сечения $S_{3K(B)}$ короткозамыкающего кольца ротора АДК (АДВР) определяются в соответствии с [1] и на основе (27), (36) и (37), (38):

$$D_{3K} = D_{RK} - 1,2h_{z2K} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{МК}} [K_D - 1,2f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК})]; (46)$$

$$D_{3B} = D_{RB} + 1,2h_{z2B} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{МВ}} [1,2f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + 1/K_D]; (47)$$

$$S_{3K(B)} = I_{3K(B)} / J_{3K(B)} = \gamma_1 \sqrt[4]{\Pi_{ИД}}^2 / \left(\gamma_2 \pi 2 p \lambda_{\delta K(B)} \left(\sqrt[4]{a_{МК(B)}} \right)^2 \right); (48)$$

где $I_{3K(B)}$ и $J_{3K(B)}$ – ток и плотность тока короткозамыкающего кольца; γ_2 – коэффициент, учитывающий уменьшение плотности тока в короткозамыкающем кольце,

$$\gamma_2 = 0,8 \dots 0,85. (49)$$

Масса роторной обмотки АДК (АДВР) представляется на основе (9), (27) и (46) – (48) уравнением

$$m_{w2K(B)} = \rho_a \left(f_{\delta K(B)} S_{2\Sigma K(B)} + 2\pi D_{3K(B)} S_{3K(B)} \right) = \rho_a \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{w2K(B)}^*, (50)$$

где ρ_a и $\Pi_{w2K(B)}^*$ – плотность и показатель массы материала короткозамкнутой обмотки:

$$\Pi_{w2K}^* = \left(\gamma_1 + \left(\gamma_1 / (\gamma_2 p \lambda_{\delta K}) \right) \left[K_D - 1,2f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК}) \right] \right) / \left(\sqrt[4]{a_{МК}} \right); (51)$$

$$\Pi_{w2B}^* = \left(\gamma_1 + \left(\gamma_1 / (\gamma_2 p \lambda_{\delta B}) \right) \left[1,2f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + 1/K_D \right] \right) / \left(\sqrt[4]{a_{МВ}} \right); (52)$$

Площади поперечных сечений магнитопроводов статора $S_{M1K(B)}$ и ротора $S_{M2K(B)}$ АДК (АДВР) при подстановке (14), (25), (26), (35), (37) и (38) – (40) представляются уравнениями:

$$S_{M1K} = 0,25\pi (D_K + 2h_{z1K} + 2h_{a1K})^2 - 0,25\pi D_K^2 - S_{1\Sigma K} = \left(\sqrt[4]{a_{МК}} \right)^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^2 \left\{ \pi [f_{K1}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] [1 + f_{K1}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] - 1 / (K_{3п} \lambda_{\delta K} a_{МК}) \right\}; (53)$$

$$S_{M1B} = 0,25\pi (D_B - 2h_{z1B} - 2h_{a1B})^2 - 0,25\pi D_B^2 - S_{1\Sigma B} = \left(\sqrt[4]{a_{МВ}} \right)^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^2 \left\{ \pi [f_{B1}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] [-1 + f_{B1}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] - 1 / (K_{3п} \lambda_{\delta B} a_{МВ}) \right\}; (54)$$

$$S_{M2K} = 0,25\pi (D_{RK} - 2h_{z2K} - 2h_{a2K})^2 - 0,25\pi D_{RK}^2 - S_{2\Sigma K} = \left(\sqrt[4]{a_{МК}} \right)^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^2 \left\{ \pi [f_{K2}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] [-K_D + f_{K2}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] - \gamma_1 / (\lambda_{\delta K} a_{МК}) \right\}; (55)$$

$$S_{M2B} = 0,25\pi (D_{RB} - 2h_{z2B} - 2h_{a2B})^2 - 0,25\pi D_{RB}^2 - S_{2\Sigma B} = \left(\sqrt[4]{a_{МВ}} \right)^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^2 \left\{ \pi [f_{B2}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] [1/K_D + f_{B2}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] - \gamma_1 / (\lambda_{\delta B} a_{МВ}) \right\}. (56)$$

Масса магнитопровода АДК (АДВР) определяется исходя из (9) и (53) – (56)

$$m_{ММК(B)} = \rho_c K_{3с} f_{\delta K(B)} (S_{M1K(B)} + S_{M2K(B)}) = \rho_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{ММК(B)}^*, (57)$$

где ρ_c и $\Pi_{ММК(B)}^*$ – плотность ЭТС и показатель массы магнитопровода АДК (АДВР):

$$\Pi_{ММК}^* = K_{3с} \left(\sqrt[4]{a_{МК}} \right)^3 \left\{ \pi \lambda_{\delta K} [f_{K1}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] \times [1 + f_{K1}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] + \pi \lambda_{\delta K} [f_{K2}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] [-K_D + f_{K2}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) + (\alpha_3 / p)] - 1 / (K_{3п} a_{МК}) - \gamma_1 / a_{МК} \right\}; (58)$$

$$\Pi_{ММВ}^* = K_{3с} \left(\sqrt[4]{a_{МВ}} \right)^3 \left\{ \pi \lambda_{\delta B} [f_{B1}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] \times [-1 + f_{B1}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] + \pi \lambda_{\delta B} [f_{B2}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] [1/K_D + f_{B2}(K_{3п}, \lambda_{\delta B}, a_{МВ}) + (\alpha_3 / p)] - 1 / (K_{3п} a_{МВ}) - \gamma_1 / a_{МВ} \right\}. (59)$$

Масса $M_{AK(B)}$ и зависящая от удельных цен меди C_m , алюминия C_a и ЭТС C_c стоимость $C_{AK(B)}$ активных материалов АДК (АДВР) определяются на основе (43) – (45), (50) – (52) и (57) – (59) уравнениями вида (4):

$$M_{AK(B)} = m_{w1K(B)} + m_{w2K(B)} + m_{ММК(B)} = \rho_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{MK(B)}^*; (60)$$

$$C_{AK(B)} = C_{w1K(B)} + C_{w2K(B)} + C_{ММК(B)} = C_c \rho_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{CK(B)}^*, (61)$$

где $\Pi_{MK(B)}^*$ и $\Pi_{CK(B)}^*$ – показатели массы и стоимости, позволяющие определять наличие оптимальных геометрических соотношений ЭМС АДК (АДВР), характеризующихся экстремальными значениями УП $a_{МК(B)Э}$ и $\lambda_{МК(B)Э}$:

$$\Pi_{MK(B)}^* = \rho_m \Pi_{w1K(B)}^* / \rho_c + \rho_a \Pi_{w2K(B)}^* / \rho_c + \Pi_{ММК(B)}^*; (62)$$

$$\Pi_{CK(B)}^* = C_m \rho_m \Pi_{w1K(B)}^* / (C_c \rho_c) + C_a \rho_a \Pi_{w2K(B)}^* / (C_c \rho_c) + \Pi_{ММК(B)}^*. (63)$$

В целом можно заключить, что уравнения (62) и (63) представляют возможность сравнительного анализа АДК и АДВР по относительным коэффициентам показателей массы и стоимости ЭМС. Использование полных ЦФ (60) и (61) может быть выполнена поэтапная параметрическая оптимизация массостоймостных показателей рассматриваемых вариантов АД при заданных проектных ограничениях. Также уравнения вида (60) и (61) с компонентами (62) и (63) могут использоваться как составляющие ЦФ оптимизации АД по обобщенному критерию. Примеры результатов расчетов функциональных зависимостей (62) и (63) полученных при $\rho_m/\rho_c = 8,9/7,65$; $\rho_a/\rho_c = 2,7/7,65$; $C_m/C_c = 90,25/13,5$; $C_a/C_c = 47/13,5$, а также минимальных, средних и максимальных значениях коэффициентов $\gamma_1(1,338; 1,903; 2,785)$, $\gamma_2(0,8; 0,825; 0,85)$, $K_{Bz}(2; 2,5; 3)$, $K_{Ba}(1,6; 1,8; 2$ при $p = 1$ и $1; 1,225; 1,45$ при $p = 3)$, $K_{рш}(0,04; 0,08; 0,12)$, $K_D(0,985; 0,99; 0,995)$ для АДК и АДВР с $2p = 2$ и $2p = 6$, приведены в табл. 1-2. Графики зависимостей (62), (63), соответствующих средним значениям расчетных коэффициентов АД указанной полноты, представлены на рис. 5 и 6.

На основе выполненных оптимизационных расчетов установлена целесообразность и подтверждено предположение [19] разработки АДВР исходя из условий минимизации диаметра активной поверхности статора с целью улучшения массостоймостных показателей ЭМС. С учетом известных, в том числе из [10], конструктивных особенностей АДВР, заключающихся в меньших относительно АДК числе элементов, массы, металлоемкости и стоимости конструктивной части (рис. 3,а), представляется эффективной замена АДК на АДВР в приводах, допускающих передачу вращающего момента механизму непосредственно с внешнего ротора. Также целесообразна разработка, на основе ЦФ (1) и полученных в настоящей работе выражений и уравнений, математических моделей сравнительного анализа потерь активной мощности электромагнитно-эквивалентных АДК и АДВР.

Таблица 1

Показатели массы и стоимости активной части вариантов асинхронных короткозамкнутых двухполюсных двигателей с внутренним и внешним ротором

γ_1 , о.е.		$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta КЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{МК}$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta ВЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{МВ}$, о.е.	$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta КЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{СК}$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta ВЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{СВ}$, о.е.
1,338	min	18	0,45	14,3	130,5	0,15	16,54	4,9	1,65	28,52	14,5	1,35	30,26
	ср.	10	0,45	11,92	57	0,25	12,78	3,0	2,0	25,72	11,0	1,3	24,31
	max	9	0,55	10,67	49	0,25	10,94	2,5	2,3	24,51	9,5	1,3	21,67
1,903	min	29	0,4	16,15	130,5	0,15	17,23	8,0	1,45	30,55	14,5	1,35	31,4
	ср.	18,5	0,45	13,07	57	0,25	13,38	4,9	1,7	27,1	11,0	1,3	25,39
	max	13	0,55	11,65	49	0,25	11,52	4,2	1,7	25,73	9,5	1,3	22,71
2,785	min	67,5	0,25	18,43	130,5	0,15	18,28	13,5	1,25	33,8	14,5	1,35	33,12
	ср.	30,5	0,4	14,89	57	0,25	14,31	7,6	1,65	29,28	11,0	1,3	27,08
	max	23	0,45	13,07	49	0,25	12,41	6,1	1,75	27,05	9,5	1,3	24,31

Таблица 2

Показатели массы и стоимости активной части вариантов асинхронных короткозамкнутых шестиполюсных двигателей с внутренним и внешним ротором

γ_1 , о.е.		$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta КЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{МК}$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta ВЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{МВ}$, о.е.	$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta КЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{СК}$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta ВЭ}$, о.е.	$\Pi^*_{СВ}$, о.е.
1,338	min	32,7	0,25	8,42	244	0,08	9,19	8,7	1,0	18,23	48,8	0,4	17,67
	ср.	17,2	0,4	6,91	129,5	0,11	6,97	7,2	1,15	16,49	28,5	0,5	14,61
	max	11,5	0,45	6,13	87	0,14	5,87	7,8	1,2	15,46	22,2	0,55	13,09
1,903	min	58	0,2	9,29	244	0,08	9,51	14,8	0,8	19,2	48,8	0,4	18,31
	ср.	31,3	0,27	7,51	129,5	0,11	7,26	10	1,0	17,13	28,5	0,5	15,22
	max	20,8	0,35	6,63	87	0,14	6,14	9,5	1,1	16,03	22,2	0,55	13,69
2,785	min	113,3	0,15	10,51	244	0,08	9,98	28,5	0,6	20,77	48,8	0,4	19,27
	ср.	61,8	0,2	8,39	129,5	0,11	7,69	15,3	0,85	18,19	31,7	0,55	16,15
	max	42,7	0,25	7,34	87	0,14	6,54	13,2	0,95	16,92	22,2	0,55	14,60

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность объективного (при соблюдении принципов электромагнитной эквивалентности и идентичности УП) сравнительного анализа различных структур и оптимизации геометрических соотношений АД на основе метода относительных показателей и обобщенных геометрических УП.

2. Функциональные зависимости масс и стоимости активных частей АДК с $2p = 2$ и АДВР с $2 \leq 2p \leq 8$ не содержат сочетаний УП $a_{МК(В)}$ и $\lambda_{\delta К(В)}$, обеспечивающих явно выраженные экстремумы. Массо-стоимостные показатели ЭМС таких АД улучшаются с уменьшением значений УП $a_{МК(В)}$ и при конкретных значениях $a_{МК(В)}$ характеризуются определенными экстремальными значениями $\lambda_{\delta К(В)}$.

3. Возможности минимизации $a_{МК(В)}$ и $D_{К(В)}$ АДК (АДВР) ограничены (целевые функции не существуют в некоторых областях малых $a_{МК(В)}$) отрицательными значениями подкоренных слагаемых функциональных сомножителей $f_{К2}(\lambda_{\delta К(В)}, a_{МК(В)})$ и $f_{В1}(K_{зп}, \lambda_{\delta К(В)}, a_{МК(В)})$, то есть ограничены конструктивно-технологической сложностью выполнения в пределах $D_{РК}$ и $D_{В}$ зубцово-пазовых структур, а минимизация $a_{МВ}$ и $D_{В}$ АДВР дополнительно ограничена возможностью размещения лобовых частей обмотки статора.

4. Функциональные зависимости массы и стоимости ЭМС АДК $2p \geq 4$ от УП $a_{МК}$ и $\lambda_{\delta К}$ являются уни-модальными функциями и характеризуются конкретными экстремальными значениями $a_{МКЭ}$ и $\lambda_{\delta КЭ}$.

5. При $2p > 2$ и в диапазоне возможных изменений значений коэффициентов γ_1 ; γ_2 ; $K_{В2}$; $K_{Вa}$; $K_{рш}$; K_D , АДВР отличается от электромагнитно-эквивалентного АДК улучшенными на 3...15 % показателями стоимости активной части.

6. При $2p \geq 2$ и в зонах изменения γ_1 , близких к граничным значениям 2,785 и 1,338; показатели массы ЭМС АДВР соответственно улучшаются до 11 % и ухудшаются до 15,6 % относительно электромагнитно-эквивалентного АДК. В области среднего значения γ_1 показатели массы ЭМС указанных АД, в зависимости от принятых величин γ_2 ; $K_{В2}$; $K_{Вa}$; $K_{рш}$; K_D могут отличаться в пределах ± 6 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования // Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 368 с.
2. Радин В.И. Рождение серии // Наука и техника. – 1985. – С. 38-44.
3. Volkrodt W. Neue wege im Electromaschinenbau // Electro-Jobr. – 1985. – P. 29-38.
4. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых асинхронных двигателей // Электричество. – 1996. – №8. – С. 37-42.
5. Ставинский А.А. Асинхронные двигатели с тангенциальным смещением элементарных слоев стали статора // Электричество. – 1996. – №8. – С. 43-48.
6. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // Электротехника и электромеханика. – 2004. – №1. – С. 57-61.
7. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин // Электротехника и электромеханика. – 2007. – №3. – С. 36-38.
8. Ставинский А.А., Тищенко И.А., Зеленый Н.И. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей // Электротехнические и компьютерные системы. – 2010. – №01(77). – С. 64-69.

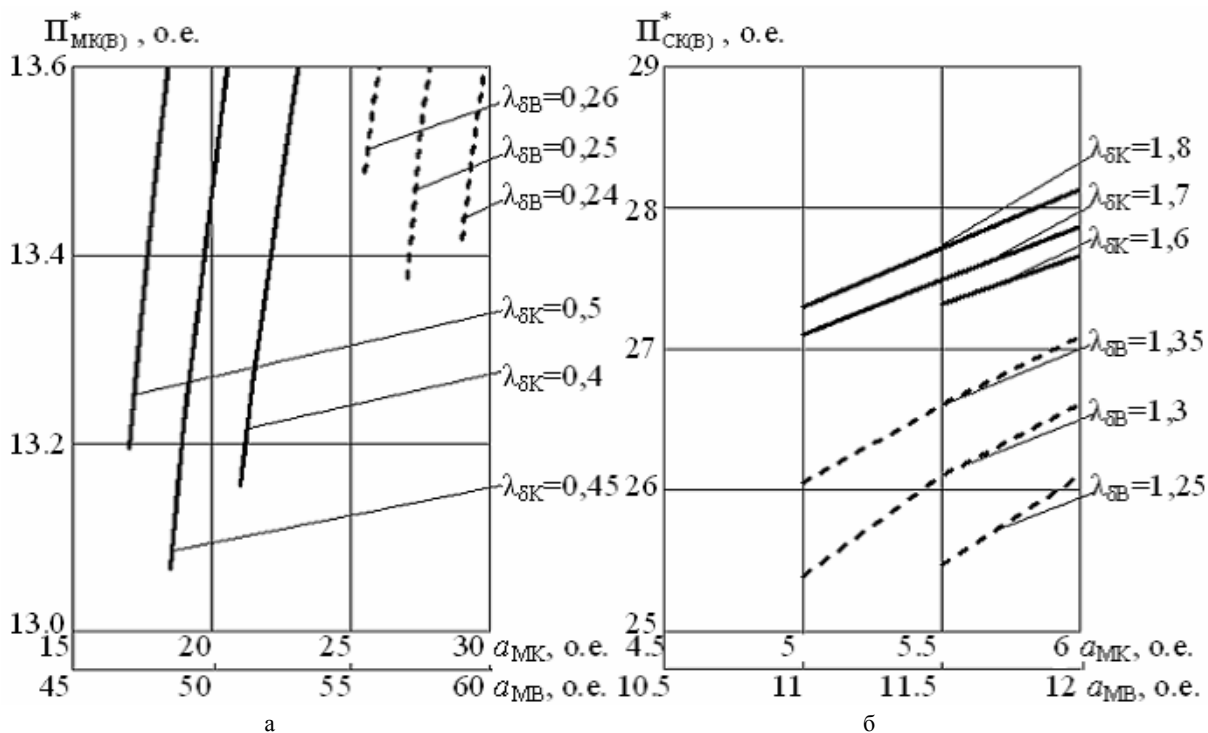


Рис. 5. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) двухполюсной электромагнитной системы асинхронного двигателя с внутренним (—) и внешним (- - -) ротором

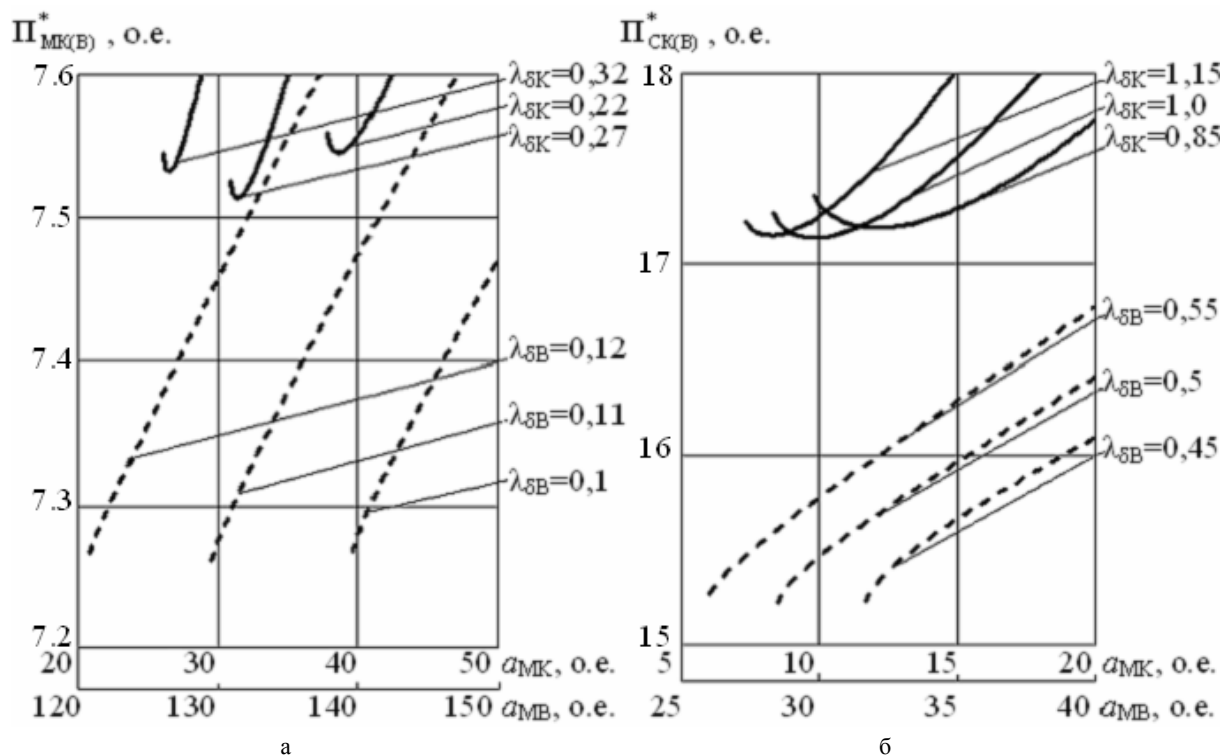


Рис. 6. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) шестипольной электромагнитной системы асинхронного двигателя с внутренним (—) и внешним (- - -) ротором

9. Ставинский А.А. Усовершенствование конструкции короткозамкнутого ротора торцевого асинхронного двигателя для привода транспортных механизмов // Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр. – Киев: Институт электродинамики АН УССР. – 1988. – С. 96-103.

10. Ставинский А.А. Асинхронный двигатель с двухпакетным внешним ротором для привода судового встраиваемого вентилятора // Электротехническое производство. Передовой опыт и научно-технические достижения для внедрения. – 1990. – №6(30). – С. 4-7.

11. Ставинский А.А. Особенности магнитопроводов асинхронных двигателей с конической структурой зубцов // Известия Российской академии наук. Сер. Энергетика. – 1992. – №5. – С. 130-137.

12. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – №1. – С. 44-48.

13. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.

14. Ставинский А.А., Золотухин А.И., Янченко А.В. Снижение вибрации от электромагнитных источников колебаний в двухпакетных асинхронных двигателях // *Электротехника*. – 1991. – №8. – С. 33-36.
15. Ставинский А.А. Совершенствование судовых электро-механических систем встречного вращения на основе специальных асинхронных двигателей // *Судостроение*. – 2011. – №6. – С. 35-38.
16. Дмитриев В.Н., Кислицын А.Л. Исследование параметров и характеристик встроенных асинхронных двигателей. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 280 с.
17. Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. – М.: ВНИИстандартэлектрo, 1989. – 23 с.
18. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // *Электротехника і електро-механіка*. – 2003. – №4. – С. 79-82.
19. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Вансач О.С. Определение геометрических соотношений активной части асинхронных двигателей погружного, высокооборотного и обращенного исполнений // *Электромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук. техн. зб.* – 2001. – №57. – С. 67-72.

REFERENCES: 1. Dombrovskii V.V., Zaichik V.M. *Asinkhronnyye mashiny: teoriya, raschet, elementy proektirovaniya* [Asynchronous machines: theory, calculation, design elements]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 368 p. 2. Radin V.I. Birth series. *Nauka i tekhnika – Science & Technology*, 1985, pp. 38-44. 3. Volkrodt W. New paths in Electro Mechanical Engineering. *Electro-Job.*, 1985, pp. 29-38. 4. Kazanskii V.M. Crisis and prospects for the development of small induction motors. *Electrichestvo – Electricity*, 1996, no. 8, pp. 37-42. 5. Stavinskii A.A. Induction motors with tangential displacement of elementary layers of steel stator. *Electrichestvo – Electricity*, 1996, no. 8, pp. 43-48. 6. Stavinskii A.A. Problem and the directions of electromechanical devices further evolution. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2004, no.1, pp.57-61. 7. Konokhov N.N. Structural analysis and principle of symmetry at perfection of electric machine design. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.3, pp. 36-38. 8. Stavinskii A.A., Tishchenko I.A., Zelenyi N.I. Prospects for further improvements and features of the induction of electromechanical and static converters. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternyye sistemy – Electrotechnic and Computer Systems*, 2010, no. 01(77), pp. 64-69. 9. Stavinskii A.A. Uovershenstvovanie konstruktitsii korotkozamknutogo rotora tortsevoogo asinkhronnogo dvigatel'ia dlia privoda transportnykh mekhanizmov [Improving the design of the squirrel-cage rotor of the axial field motor for driving the transport mechanisms]. *Reguliruyemye asinkhronnyye dvigateli. Sbornik nauchnykh trudov. Kiev, Institut Electrodinamiki AN USSR* [Controlled asynchronous motors. The collection of scientific works. Kiev, Institute of Electrodynamics of Academy of Sciences of Ukrainian SSR], 1988, pp. 96-103. 10. Stavinskii A.A. Asynchronous motor with the two packet external rotor for driving the ship embedded fan. *Elektrotekhnicheskoe proizvodstvo. Peredovoi opyt i nauchno-tekhnicheskie dostizheniia dlia vnedreniia – Electrotechnical Production. Best practices and scientific and technological developments for the implementation*, 1990, no.6 (30), pp. 4-7.

11. Stavinskii A.A. Features of magnetic induction motors with conical structure of teeth. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Energetika – Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Ser. Energy*, 1992, no.5, pp. 130-137. 12. Stavinskii A.A. Assignment and application features of special electrical machines. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.1, pp. 44-48. 13. Palastin L.M. *Electrical machines of autonomous sources* [Electric machines of independent power supply]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 464 p. 14. Stavinskii A.A., Zolotukhin A.I., Ianchenko A.V. Reduced vibration from sources of electromagnetic oscillations in two packet asynchronous motors. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 1991, no.8, pp. 33-36. 15. Stavinskii A.A. Improvement of marine electromechanical counter rotating systems on the basis of special asynchronous motors. *Sudostroenie – Shipbuilding*, 2011, no.6, pp. 35-38. 16. Dmitriev V.N., Kislicyn A.L. *Issledovanie parametrov i kharakteristik vstroennykh asinkhronnykh dvigatelei* [Study of parameters and characteristics of embedded asynchronous motors]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2012. 280 p. 17. *Rukovodiashtschi dokumnt RD 16538-89. Mashiny elektricheskie maloi moshchnosti. Otsenka urovnia kachestva* [Guidance Document RD 16538-89. Electrical machines of small capacity. Estimation of quality level]. Moscow, VNIStandartelectro Publ., 1989. 23 p. 18. Stavinskii A.A., Plakhtyr' O.O., Stavinskii R.A. The quality parameters at structural optimization of spatial electromagnetic systems for three-phase transformers, reactors and throttles. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.4, pp. 79-82. 19. Stavinskii A.A., Plakhtyr' O.O., Vansach O.S. Determination of geometric relationships of the active part of motors of submersible, high-speed and inverted versions. *Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya. Resp. mizhvid. naukovo-tekhnichnii zbirnik – Electrical machine-building and electrical equipment: Republican interdepartmental scientific-technical collection*, 2001, no.57, pp. 67-72.

Поступила (received) 30.05.2014

Ставинский Андрей Андреевич¹, д.т.н., проф.,
Пальчиков Олег Олегович¹, аспирант,
¹Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова,
54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9,
тел/phone +38 0512 399453, e-mail: ole2013hulk@yandex.ua

A.A. Stavinskii¹, O.O. Palchykov¹

¹National University of Shipbuilding named after admiral Makarov
9, Ave. Geroyev Stalingrada, Mykolaiv, 54025, Ukraine

Application of a relative technical level index method to induction motor optimization problems.

On the basis of a method of relative technical level indices with relative geometric controlled variables, analytical expressions are derived to determine the optimum geometric dimensions of the squirrel-cage induction motor active part under criteria of the weight and the cost minimums. Comparative analysis of the mentioned indices for the conventional and the inverted stator and rotor designs is performed.

Key words – technical level indices, optimum geometric dimensions, conventional and inverted rotors.