

УДК 621.313.333

А. А. СТАВИНСКИЙ, О. О. ПАЛЬЧИКОВ

**АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ ВНУТРЕННИМИ И ВНЕШНИМИ РОТОРАМИ ДЛЯ ПРИВОДА ГАЗОВЫХ И ЖИДКОСТНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ**

На основе метода безразмерных показателей технического уровня с относительными геометрическими управляемыми переменными получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимумов массы, стоимости и потерь электромагнитной системы асинхронных короткозамкнутых двигателей с секционированными внутренними и внешними роторами согласного и встречного вращения и выполнен сравнительный анализ по указанным показателям таких двигателей с традиционным и обращенным аналогами.

**Ключевые слова:** согласное и встречное вращение, асинхронный короткозамкнутый двигатель, секционированный ротор, показатели технического уровня.

**Введение.** Усовершенствование электропривода ряда механизмов возможно на основе параметрической и конструктивной совместимости рабочего органа и электрической машины – асинхронного двигателя (АД). Такая совместимость является важным дополнительным фактором для решения задач энергоресурсосбережения и конструктивного усовершенствования механизмов. Повышение энергоэффективности электромеханической части привода традиционными способами, то есть снижением электромагнитных нагрузок и увеличением активной длины, неизбежно приводит к значительному повышению габаритов, стоимости и материалоемкости АД [1].

В судовых системах широко используются приводы с рабочим органом типа лопастное рабочее колесо [2 – 4]: гребная пропульсивная установка, осевые вентиляторы и насосы. Общим направлением совершенствования таких механизмов является принцип соосности лопастных колес. Соосные лопастные колеса могут вращаться в одну (тандемвращение) или в разные стороны (контрвращение). Тандемное и контрвращение рабочих колес по сравнению с одиночным рабочим органом позволяет получить большее дисковое отношение при умеренной ширине каждой лопасти, а также отдалить кавитацию для жидкостных нагнетателей. Контрвращение рабочих колес позволяет устранить некомпенсированные реактивные моменты, значительно повысить КПД (в частности КПД гребного винта в свободной воде увеличивается на 10...15 %), снизить вибрацию и шум [2 – 6]. Установка двух полуроторов (и более) на общем валу уменьшает размеры пазов и короткозамыкающих колец и создает возможность уменьшения диаметров встроенных погружных и высокооборотных АД. Валопровод в двухступенчатых нагнетателях одновальный при тандемвращении и двухвальный коаксиальный при контрвращении. Применение встречного вращения рабочих колес позволяет значительно уменьшить осевые размеры и массу нагнетателей, в связи с отсутствием направляющих и спрямляющих аппаратов, эффективно осуществлять реверс без поворота лопаток, а также позволяет осуществлять глубокое регулирование частоты вращения, так как «эффективное число» Рейнольдса уменьшается в значительно меньшей степени по

сравнению с тандемвращением ступеней. Электропривод механизмов контрвращения выполняется с помощью двух электродвигателей, что значительно ухудшает энергетические и массогабаритные показатели электромеханической части [2, 4, 5].

**Анализ основных достижений.** В [5–7] поднимается проблема повышения технического уровня и энергоэффективности лопастных механизмов и проводится анализ возможных конструкций специальных короткозамкнутых АД, обеспечивающих встречное вращение на основе контактного статора-ротора, а также конструктивных радиальных и аксиальных двухроторных схем с изменением чередования фаз. В [8] рассмотрены возможные типы изменения чередования фаз в секционном АД (САД) с контрвращением роторов, предложены выражения для расчета длины, активного сопротивления и приближенного значения сопротивления рассеяния обмотки статора в межсекционном пространстве.

**Цель исследований.** Оптимизационный сравнительный анализ САД с тандем- и контрвращением пар внутренних и внешних короткозамкнутых роторов на основе зависимостей массы, стоимости и потерь активной мощности от геометрических соотношений вариантов электромагнитной системы (ЭМС).

**Материал исследований.** На рис. 1 приведены конструктивные схемы САД с внутренними (рис. 1, а) [6, 9] и внешними (рис. 1, б) роторами для воздушных и жидкостных осевых нагнетателей: 1 – секционированный статор, 2 – два электрически несвязанных ротора, 3 – участок обмотки статора между секциями (с изменением чередования фаз по схеме  $AZBXCY - XBZAYC$  для САД со встречно вращающимися роторами и без изменения такого чередования для САД с согласно вращающимися роторами), 4 – внутренний подшипниковый узел (на рис. 1, а показан подшипник двойного вращения для контрроторного САД [9]). В конструкциях САД с тандемвращением роторы могут механически соединяться. Для таких вариантов классического и обращенного исполнения исключаются внутренний подшипниковый узел и консольная установка роторов.

В целом математическая модель САД должна

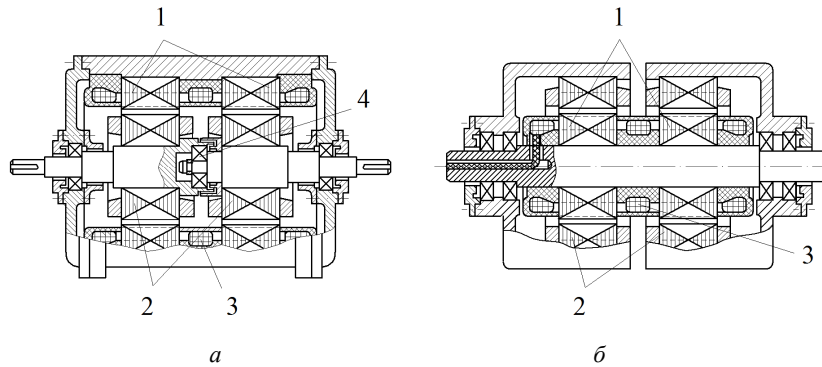


Рис. 1 – Конструктивные схемы вариантов секционированного асинхронного двигателя:  
а – с внутренними роторами; б – внешними роторами

соответствовать схеме замещения САД (рис. 2), а также учитывать длину промежуточных участков обмотки статора  $l_{\text{сдк(В)}}$  и  $l_{\text{скк(В)}}$  в межсекционном пространстве для вариантов САД соответственно с контр- и тандемроторами [8]:

$$l_{\text{скк(В)}} \approx (\sqrt{l_{\text{стк(В)}} + 9h_{z1к(В)}} + \sqrt{l_{\text{стк(В)}} + 25h_{z1к(В)}}) / 2; \quad (1)$$

$$l_{\text{стк(В)}} \approx 2S_{3к(В)} / (1,5h_{z2к(В)}), \quad (2)$$

где  $h_{z1к(В)}$  и  $h_{z2к(В)}$  – высота зубцов статора и ротора САД с контрроторами (тандемроторами);  $S_{3к(В)}$  – сечение короткозамыкающего кольца обмотки ротора.

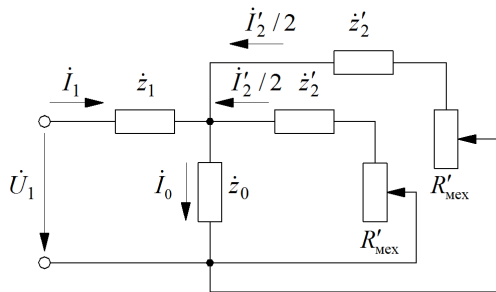


Рис. 2 – Схема замещения секционированного двухроторного асинхронного двигателя

Математическая модель ЭМС САД соответствует методу [10, 11], согласно которому АД с любой структурой активной части может быть представлен совокупностью полных целевых функций  $F_{ui}$

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

где  $\Pi_{\text{ИД}}$  – показатель исходных данных;

$K_i$  и  $\Pi_{ia}^*$  – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов и безразмерный показатель массы ( $i = м$ ), стоимости ( $i = с$ ) и потерь активной мощности ( $i = п$ ) ЭМС, являющийся функцией относительных управляемых переменных (УП) и коэффициента заполнения паза  $K_{зп}$ .

Геометрическими УП являются относительная длина  $\lambda_{\deltaк(В)}$  и безразмерный параметр диаметра  $a_{\text{МК(В)}}$ .

Указанные УП определяются длиной  $l_{\deltaк(В)}$  и диаметром  $D_{к(В)}$  активной поверхности статора САД с классическим – внутренним и обращенным (внешним) расположением роторов, а также показателем  $\Pi_{\text{ИД}}$  ЭМС:

$$\lambda_{\deltaк(В)} = l_{\deltaк(В)} / D_{к(В)}; \quad a_{\text{МК(В)}} = D_{к(В)}^4 / \Pi_{\text{ИД}}.$$

Показатель исходных данных определяется техническим заданием на проектирование и принятыми электромагнитными нагрузками [3]:

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

$$[\Pi_{\text{ИД}}] = [\text{Вт} \cdot \text{м}^2 / (\text{Гц} \cdot \text{А} \cdot \text{Тл})] = [\text{м}^4],$$

где  $K_E$  – соотношение ЭДС фазы статора и напряжения  $U_1$ ;  $p$  – число пар полюсов;

$P_n$  – номинальная мощность на валу;

$K_p$  и  $K_y$  – коэффициенты распределения и укорочения обмотки статора;

$f_1$  и  $J_1$  – частота сети и плотность тока обмотки статора;

$B_\delta$  – амплитуда индукции в рабочем зазоре;

$\eta$  и  $\cos \phi$  – значения коэффициента полезного действия и энергетического коэффициента АД.

Сопоставление вариантов ЭМС САД выполняется при идентичности  $\Pi_{\text{ИД}}$ , что позволяет соблюсти равенство электромагнитной мощности и принцип электромагнитной эквивалентности при сравнительном анализе.

Основные соотношения зубцово-пазовой зоны САД (зубцы статора и ротора постоянной ширины) определяются на основе схемы замещения (рис. 2) и аналогично [10], а также с учетом [12]:

$$S_{1к(В)} = \sqrt{\Pi_{\text{ИД}} / a_{\text{МК(В)}}} / (K_{зп} \lambda_{\deltaк(В)}); \quad (4)$$

$$S_{2к(В)} = \gamma_1 \sqrt{\Pi_{\text{ИД}} / a_{\text{МК(В)}}} / (2\lambda_{\deltaк(В)}); \quad (5)$$

$$\gamma_1 = K_p K_y (0,2 + 0,8 \cos \phi) J_1 / (K_{ср} J_2) = 1,338 \dots 2,785;$$

$$b_{z1(2)к(В)} = \pi^4 \sqrt{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МК(В)}}} / (K_{зс} K_{Bz1(2)}); \quad (6)$$

$$h_{z1K(B)} = \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МК(В)}}} f_{1K(B)}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{\text{МК(В)}}); \quad (7)$$

$$f_{1K(B)}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{\text{МК(В)}}) = \pm 0,5\alpha_{11} \pm \sqrt{0,25\alpha_{11}^2 \pm \alpha_{21} / (K_{\text{зп}} \lambda_{\delta K(B)} a_{\text{МК(В)}})};$$

$$h_{z2K(B)} = \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МК(В)}}} f_{2K(B)}(\lambda_{\delta K(B)}, a_{\text{МК(В)}}); \quad (8)$$

$$f_{2K}(\lambda_{\delta K}, a_{\text{МК}}) = -0,5K_D \alpha_{12} - \sqrt{0,25K_D^2 \alpha_{12}^2 - \alpha_{22} \gamma_1 / (2\lambda_{\delta K} a_{\text{МК}})};$$

$$f_{2B}(\lambda_{\delta B}, a_{\text{МВ}}) = (0,5\alpha_{12} / K_D) + \sqrt{(0,25\alpha_{12}^2 / K_D^2) + \alpha_{22} \gamma_1 / (2\lambda_{\delta B} a_{\text{МВ}})};$$

$$\alpha_{11(2)} = [1 / (K_{\text{зс}} K_{Bz1(2)}) - 1] / (1 + K_{\text{рш1(2)}});$$

$$\alpha_{21(2)} = 1 / [\pi (1 - K_{\text{рш1(2)}})],$$

где  $S_{1(2)K(B)}$  – суммарная площадь пазов в поперечном сечении статора (ротора) САД с внутренними (внешними) роторами;

$\gamma_1$  – расчетное соотношение роторов;

$K_{\text{ск}}$  – коэффициент скоса обмотки ротора;  $b_{z1(2)K(B)}$  – суммарная ширина зубцов статора (ротора);

$K_{\text{зс}}$  – коэффициент заполнения магнитопровода электротехнической стали (ЭТС);

$f_{1K(B)}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{\text{МК(В)}})$  и  $f_{2K(B)}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{\text{МК(В)}})$  – функциональные сомножители упрощения записи;

$K_D$  – коэффициент соотношения диаметров активных поверхностей статора и ротора;

$K_{Bz1(2)}$  – отношение амплитуд индукций  $B_{z1(2)}$  в зубце статора (ротора) к индукции  $B_{\delta}$  в рабочем зазоре;

$K_{\text{рш1(2)}}$  – коэффициент соотношения высоты шлица и клина к высоте зубца статора (ротора);  $J_2$  – плотность тока обмотки ротора.

Высота ярма статора (ротора) САД определяется на основе [10, 12]

$$h_{a1(2)K(B)} = \alpha_{31(2)} \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МК(В)}}} / p, \quad (9)$$

где  $\alpha_{31(2)}$  – коэффициент, зависящий от  $K_{Ba1(2)}$ , соотношения амплитуды индукции ярма  $B_{a1(2)}$  статора (ротора) к амплитуде индукции  $B_{\delta}$  в рабочем зазоре, и  $K_{\text{зс}} \alpha_{31(2)} = 1 / (2K_{\text{зс}} K_{Ba})$ .

Средняя длина витка обмотки статора САД

$$l_{w1K(B)} = \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МК(В)}}} \times \left\{ 2\lambda_{\delta K(B)} + 2l_{\text{ск(т)K(B)}}^* + \beta\pi(1,16 + 0,14p) \times [1 \pm f_{1K(B)}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{\text{МК(В)}})] / p \right\} \quad (10)$$

где  $\beta$  – относительный шаг обмотки статора;  $l_{\text{ск(т)K(B)}}^*$  – относительная длина межсекционного

участка обмотки статора при встречном (согласном) вращении роторов

$$l_{\text{ск(т)K(B)}}^* = l_{\text{ск(т)K(B)}} / \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МК(В)}}}.$$

Диаметр  $D_{3K(B)}$  и величина поперечного сечения  $S_{3K(B)}$  короткозамыкающего кольца роторов САД определяются в соответствии с [10, 12] и на основе (5), (8):

$$D_{3K} = \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МК}}} [K_D - 1,5 f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{\text{МК}})]; \quad (11)$$

$$D_{3B} = \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}} a_{\text{МВ}}} [1,5 f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{\text{МВ}}) + 1 / K_D]; \quad (12)$$

$$S_{3K(B)} = \gamma_1 (\sqrt{\Pi_{\text{ИД}}}) / (\gamma_2 \pi 4 p \lambda_{\delta K(B)} (\sqrt{a_{\text{МК(В)}}})), \quad (13)$$

где  $\gamma_2$  – коэффициент, учитывающий уменьшение плотности тока в короткозамыкающем кольце относительно плотности тока  $J_2$ .

Вышеприведенные выражения (1, 2, 4 – 13) позволяют определить целевые функции массы, стоимости и активных потерь вида (3), а соответствующие им безразмерные показатели ЭМС САД определяются зависимостями:

$$\Pi_{\text{МК(В)}}^* = \rho_{\text{м}} \Pi_{w1K(B)}^* / \rho_{\text{с}} + \rho_{\text{а}} \Pi_{w2K(B)}^* / \rho_{\text{с}} + \Pi_{\text{ММК(В)}}^*; \quad (14)$$

$$\Pi_{\text{СК(В)}}^* = C_{\text{м}} \rho_{\text{м}} \Pi_{w1K(B)}^* / (C_{\text{с}} \rho_{\text{с}}) + C_{\text{а}} \rho_{\text{а}} \Pi_{w2K(B)}^* / (C_{\text{с}} \rho_{\text{с}}) + \Pi_{\text{ММК(В)}}^*; \quad (15)$$

$$\Pi_{\text{ПК(В)}}^* = \frac{P_{\text{с}} B_{\delta}^2 \rho_{\text{с}} \sigma_{\text{а20}}}{J_2^2} (K_{\text{лз}} K_{Bz}^2 \Pi_{z1K(B)}^* + K_{\text{лз}} K_{Ba}^2 \Pi_{a1K(B)}^*) + \frac{J_1^2 \sigma_{\text{а20}}}{J_2^2 \sigma_{\text{м20}}} \Pi_{w1K(B)}^* + \Pi_{w2K(B)}^*, \quad (16)$$

где  $\rho_{\text{с}}$  и  $C_{\text{с}}$  – удельная плотность и стоимость ЭТС;

$\rho_{\text{м(а)}}$  и  $C_{\text{м(а)}}$  – удельная плотность меди и стоимость меди (алюминия);

$P_{\text{с}}$  – удельные потери ЭТС;

$K_{\text{лз(а)}}$  – коэффициент увеличения потерь зубцов (ярма);

$\sigma_{\text{м20}}$  и  $\sigma_{\text{а20}}$  – проводимости меди и алюминия;

$\Pi_{w1K(B)}^*$ ,  $\Pi_{w2K(B)}^*$ ,  $\Pi_{\text{ММК(В)}}^*$ ,  $\Pi_{z1K(B)}^*$ ,  $\Pi_{a1K(B)}^*$  – показатели материалоемкости медной обмотки статора, алюминиевой обмотки ротора, магнитопровода, ярма и зубцов статора САД соответственно:

$$\Pi_{w1K(B)}^* = \left\{ \lambda_{\delta K(B)} + l_{\text{ск(т)K(B)}}^* + \beta\pi(1,16 + 0,14p) \times [1 \pm f_{1K(B)}(K_{\text{зп}}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{\text{МК(В)}})] / (2p) \right\} / (\lambda_{\delta K(B)} \sqrt[4]{a_{\text{МК(В)}}});$$

$$\Pi_{w2K}^* = (0,5\gamma_1 + (\gamma_1 / (\gamma_2 p \lambda_{\delta K})) [K_D - 1,5 f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{\text{МК}})]) / (\sqrt[4]{a_{\text{МК}}})$$

$$\begin{aligned} \Pi_{w2B}^* &= (0,5\gamma_1 + (\gamma_1 / (\gamma_2 p \lambda_{\delta B})) [1,5 f_{B2} (\lambda_{\delta B}, a_{MB}) + 1 / K_D]) / (\sqrt[4]{a_{MB}}) \\ \Pi_{MMK}^* &= K_{3c} (\sqrt[4]{a_{MK}})^3 \{ \pi \lambda_{\delta K} [f_{K1} (K_{3n}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + (\alpha_{31} / p)] [1 + f_{K1} (K_{3n}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + (\alpha_{31} / p)] + \pi \lambda_{\delta K} [f_{K2} (\lambda_{\delta K}, a_{MK}) + (\alpha_{32} / p)] [K_D - f_{K2} (\lambda_{\delta K}, a_{MK}) - (\alpha_{32} / p)] - 1 / (K_{3n} a_{MK}) - 0,5\gamma_1 / a_{MK} \}; \\ \Pi_{MMB}^* &= K_{3c} (\sqrt[4]{a_{MB}})^3 \{ \pi \lambda_{\delta B} [f_{B1} (K_{3n}, \lambda_{\delta B}, a_{MB}) + (\alpha_{31} / p)] [1 - f_{B1} (K_{3n}, \lambda_{\delta B}, a_{MB}) - (\alpha_{31} / p)] + \pi \lambda_{\delta B} [f_{B2} (\lambda_{\delta B}, a_{MB}) + (\alpha_{32} / p)] [1 / K_D + f_{B2} (\lambda_{\delta B}, a_{MB}) + (\alpha_{32} / p)] - 1 / (K_{3n} a_{MB}) - 0,5\gamma_1 / a_{MB} \}; \\ \Pi_{z1K(B)}^* &= K_{3c} (\sqrt[4]{a_{MK(B)}})^3 \{ \pi \lambda_{\delta K(B)} [f_{K(B)1} (K_{3n}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{MK(B)})] \times [1 \pm f_{K(B)1} (K_{3n}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{MK(B)})] - 1 / (K_{3n} a_{MK(B)}) \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{z1K(B)}^* &= K_{3c} (\sqrt[4]{a_{MK(B)}})^3 \{ \pi \lambda_{\delta K(B)} [(\alpha_{31} / p)] \times \\ &\times [1 \pm 2 f_{K(B)1} (K_{3n}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{MK(B)}) \pm (\alpha_{31} / p)] \}. \end{aligned}$$

Примеры результатов расчетов и определения экстремумов функциональных зависимостей (14) – (16), полученных при соотношениях  $\rho_m / \rho_c = 8,9/7,65$ ;  $\rho_a / \rho_c = 2,7/7,65$ ;  $C_m / C_c = 90,25/13,5$ ;  $C_a / C_c = 47/13,5$ ;  $\gamma_1 = 1,903$ ;  $\gamma_2 = 1$ ;  $K_{Bz1} = K_{Bz2} = 2,5$ ;  $K_{Ba1} = K_{Ba2} = 1,8$  (для  $p \leq 2$ ) и  $K_{Ba1} = K_{Ba2} = 1,225$  (для  $p > 2$ );  $K_{pш1} = 0,08$ ;  $K_{pш2} = 0,053$ ;  $K_D = 0,99$ , а также ЭТС 2013,  $J_1 = 5,5$  А/мм<sup>2</sup>;  $J_2 = 2,5$  А/мм<sup>2</sup>;  $B_\delta = 0,75$  Тл для САД с внутренними (К) и внешними (В) встречно (КВ) и согласно (ТВ) вращающимися роторами с числом полюсов  $2p \leq 8$  приведены в табл. 1 – 3. В табл. 4 – 6 приведены аналогичные показатели АД с внешними и внутренними роторами.

Таблица 1 – Экстремумы показателей массы активной части секционированных асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренними и внешними роторами и контр- и тандемвращением

Число пар полюсов	Исполнение	$\lambda_{\delta KЭ}$ , о.е.	$a_{MKЭ}$ , о.е.	$\Pi_{MKЭ}^*$ , о.е.	$\lambda_{\delta BЭ}$ , о.е.	$a_{MBЭ}$ , о.е.	$\Pi_{MBЭ}^*$ , о.е.
		с внутренними роторами			с внешними роторами		
p=1	КВ	1,35	3,0	12,26	0,40	36,5	15,10
	ТВ	1,35	3,0	11,40	0,35	41,5	14,04
p=2	КВ	1,30	3,3	8,41	0,45	33,8	9,64
	ТВ	1,35	3,0	7,53	0,25	57,8	8,49
p=3	КВ	1,05	4,2	7,99	0,35	44,8	9,12
	ТВ	0,55	7,3	6,72	0,20	72,3	7,70
p=4	КВ	0,90	6,1	7,02	0,35	48,0	7,76
	ТВ	0,50	8,4	5,82	0,20	73,4	6,47

Таблица 2 – Экстремумы показателей стоимости активной части секционированных асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренними и внешними роторами и контр- и тандемвращением

Число пар полюсов	Исполнение	$\lambda_{\delta KЭ}$ , о.е.	$a_{MKЭ}$ , о.е.	$\Pi_{CKЭ}^*$ , о.е.	$\lambda_{\delta BЭ}$ , о.е.	$a_{MBЭ}$ , о.е.	$\Pi_{CBЭ}^*$ , о.е.
		с внутренними роторами			с внешними роторами		
p=1	КВ	4,65	1,0	28,13	1,70	8,5	28,38
	ТВ	2,70	1,5	26,08	1,45	10,0	26,08
p=2	КВ	2,50	4,0	20,16	1,65	10,3	19,67
	ТВ	2,25	3,0	18,53	1,35	10,8	17,36
p=3	КВ	1,85	6,0	18,96	1,30	13,7	18,61
	ТВ	1,60	4,3	16,98	0,75	19,3	15,77
p=4	КВ	1,45	10,4	16,59	1,10	19,3	16,24
	ТВ	1,25	7,6	14,88	0,70	20,9	13,76

Таблица 3 – Экстремумы показателей потерь активной части секционированных асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренними и внешними роторами и контр- и тандемвращением

Число пар полюсов	Исполнение	$\lambda_{\delta KЭ}$ , о.е.	$a_{MKЭ}$ , о.е.	$\Pi_{PKЭ}^*$ , о.е.	$\lambda_{\delta BЭ}$ , о.е.	$a_{MBЭ}$ , о.е.	$\Pi_{PBЭ}^*$ , о.е.
		с внутренними роторами			с внешними роторами		
p=1	КВ	3,40	3,5	7,52	3,30	6,5	5,65
	ТВ	3,95	2,0	7,28	3,20	5,5	5,50
p=2	КВ	1,90	13,5	5,13	1,80	19,8	4,44
	ТВ	1,9	11,0	4,99	1,75	16,5	4,33

Продовження таблиці 3

$p=3$	КВ	1,35	40,0	3,77	1,25	57,0	3,36
	ТВ	1,30	36,2	3,71	1,25	50,5	3,32
$p=4$	КВ	1,05	70,9	3,28	0,95	98,0	2,99
	ТВ	1,05	61,9	3,23	1,00	80,1	2,95

Таблиця 4 – Екстремумы показателей массы активной части асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренним и внешним роторами

Число пар полюсов	$\lambda_{\delta КЭ}$ , о.е.	$a_{МКЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{МКЭ}$ , о.е.	$\lambda_{\delta ВЭ}$ , о.е.	$a_{МВЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{МВЭ}$ , о.е.
	с внутренним ротором			с внешним ротором		
$p=1$	0,50	17,0	13,50	0,25	58,0	14,31
$p=2$	0,40	21,3	8,54	0,22	65,8	8,78
$p=3$	0,30	28,3	7,82	0,16	90,3	7,98
$p=4$	0,30	29,3	6,69	0,15	97,0	6,74

Таблиця 5 – Екстремумы показателей стоимости активной части асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренним и внешним роторами

Число пар полюсов	$\lambda_{\delta КЭ}$ , о.е.	$a_{МКЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{СКЭ}$ , о.е.	$\lambda_{\delta ВЭ}$ , о.е.	$a_{МВЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{СВЭ}$ , о.е.
	с внутренним ротором			с внешним ротором		
$p=1$	1,70	5,0	27,73	1,00	14,5	26,40
$p=2$	1,55	6,0	19,25	0,75	19,3	17,70
$p=3$	1,15	8,3	17,68	0,60	24,2	16,20
$p=4$	0,95	12,8	15,55	0,55	26,3	14,22

Таблиця 6 – Екстремумы показателей потерь активной части асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренними и внешними роторами

Число пар полюсов	$\lambda_{\delta КЭ}$ , о.е.	$a_{МКЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{ПКЭ}$ , о.е.	$\lambda_{\delta ВЭ}$ , о.е.	$a_{МВЭ}$ , о.е.	$\Pi^*_{ПВЭ}$ , о.е.
	с внутренним ротором			с внешним ротором		
$p=1$	2,45	4,5	7,64	2,30	8,0	5,79
$p=2$	1,30	20,0	5,25	1,20	28,3	4,56
$p=3$	0,90	64,5	3,92	0,85	89,7	3,50
$p=4$	0,75	123,0	3,19	0,70	137,8	3,13

**Результаты исследований.** Для САД с внутренними роторами встречного вращения показатели массы, стоимости и активных потерь мощности ухудшаются на 7,5...20,7 %, 7,8...11,5 % и 1,5...3,3 % соответственно, относительно САД с внутренними роторами тандемвращения. Для САД с внешними роторами и контрвращением показатели массы, стоимости и активных потерь мощности ухудшаются на 7,5...19,8 %, 8,8...18,0 % и 1,2...2,8 % соответственно, относительно аналогичного САД с тандемвращением. Двухполюсные САД с внешними роторами отличаются увеличенной массой и стоимостью на 23,1 % и 1,0 %, и уменьшенными потерями на 24,6 % относительно САД с внутренними роторами. Для ЭМС обращенных САД при  $2p > 2$  улучшения стоимости на 1,8...2,5 % для контрроторного САД и 6,3...7,5 % для тандемроторного САД, а также потерь активной мощности на 8,4...13,5 % сопровождаются

значительным увеличением массы до 8,3...14,7 %. Кроме того такие САД характеризуются увеличенным примерно вдвое параметром  $a_m$ , и следовательно диаметром ЭМС, что ограничивает возможности встраиваемости в корпуса осевых вентиляционных и насосных агрегатов.

#### Выводы.

1. Исходя из возможности минимизации диаметра статора САД тандемное вращение роторов позволяет на 13,0...15,6 % и 4,2...5,9 % улучшить показатели массы и стоимости, показатели активных потерь при  $2p \leq 4$  улучшаются на 4,8 %, а при  $2p > 4$  ухудшаются на 1,1...5,4 %.

2. Замена двух АД традиционной конструкции вдвое меньшей мощности на САД с внутренними встречно вращающимися роторами понижает массу, стоимость и потери электромеханической части контрроторного механизма соответственно на 11,7...23,6 %, 10,3...14,7 %, 13,7...17,2 %.

**Список литературы:** 1. Гловацкий А. В. Основные направления развития электрических машин и электромеханических систем на их основе / А. В. Гловацкий, Л. П. Кубарев, Л. Н. Макаров // Электротехника. – 2008. – № 4. – С. 2 – 8. 2. Брусиловский И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов / И. В. Брусиловский. – М.: Машиностроение. – 1984. – 240с. 3. Русецкий А. А. Судовые движители / А. А. Русецкий, М. М. Жученко, О. В. Дубровин. – Л.: Судостроение. – 1971. – 288с. 4. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В. М. Черкасский // М.: Энергоатомиздат, 1984 г. – 416с. 5. Ставинский А. А. Возможности усовершенствования судовых осевых электровентиляторов на основе асинхронных контрольных двигателей / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю ПАЕТЗ-2011. – Миколаїв: НУК. – 2011. – С. 40 – 43. 6. Ставинский А. А. Совершенствование судовых электромеханических систем встречного вращения на основе специальных асинхронных двигателей / А. А. Ставинский // Судостроение. – 2011. – №6. – С. 35 – 38. 7. Ставинский А. А. Усовершенствование тихоходных биротативных асинхронных электроприводов на основе специальных контрольных двигателей / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // Матеріали Міжнародної конференції. ПАЕП – 2014. – Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – №5 (91). – С. 259 – 261. 8. Пальчиков О. О. Схемы изменения чередования катушечных групп в асинхронных секционированных контрольных двигателях / О. О. Пальчиков // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2013. – №1. – С. 72 – 76. 9. Ставинский А. А. Електропривод контрольного обертання. Патент на корисну модель № 65002. – Україна, МПК. – 2011. – Н02К5/16 / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков (Україна). – №u201104982. – Заявл. 20.04.11; Опубл. 25.11.11, Бюл. №22. – 4с. 10. Ставинский А. А. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №5. – С. 37 – 44. 11. Ставинский А. А. Целевые функции сравнительного анализа энергетической эффективности электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренними и внешними роторами / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 41 – 45. 12. Домбровский В. В. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования /

В. В. Домбровский, В. М. Зайчик // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 368с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Glovackij, A.V., L.P. Kubarev, and L.N. Makarov. "Osnovnye napravleniya razvitiya elektricheskikh mashin i elektromekhanicheskikh sistem na ih osnove." *Elektrotehnika*. No. 4. 2008. 2–8. Print. 2. Brusilovskij, I.V. *Aerodinamika osevyh ventilyatorov*. Moskva: Mashinostroenie, 1984. Print. 3. Rusetskij, A.A., M.M. Zhuchenko, and O.V. Dubrovin. *Sudovye dvizhiteli*. Leningrad: Sudostroenie, 1971. Print. 4. Cherkasskij, V.M. *Nasosy, ventilyatory, kompressory: Uchebnik dlya teploenergeticheskikh special'nostej vuzov*. Moskva: Energoatomizdat, 1984. Print. 5. Stavinskij, A.A., and O.O. Palchykov. "Vozmozhnosti usovershenstvovaniya sudovyh osevyh elektrovventilyatorov na osnove asinhronnyh kontrol'nykh dvigatelej." *Materialy` vseukrayins'koyi naukovno-texnichnoyi konferenciyi z mizhnarodnoyu uchastyu PAETZ-2011*. My`kolayiv: NUK, 2011. 40–43. Print. 6. Stavinskij, A.A. "Sovershenstvovanie sudovyh elektromekhanicheskikh sistem vstrechnogo vrashcheniya na osnove special'nyh asinhronnyh dvigatelej." *Sudostroenie*. No. 6. 2011. 35–38. Print. 7. Stavinskij, A.A., and O.O. Palchykov. "Usovershenstvovanie tihohodnyh birotativnyh asinhronnyh elektroprivodov na osnove special'nyh kontrol'nykh dvigatelej." *Materialy` Mizhnarodnoyi konferenciyi. PAEP – 2014. Elektrotehnichni ta komp'yuterni sy'stemy`*. No. 5 (91). 2014. 259–261. Print. 8. Palchykov, O.O. "Skhemy izmeneniya cheredovaniya katushechnykh grupp v asinhronnyh sekcionirovannykh kontrol'nykh dvigatelyah." *Zb. nauk. prac` NUK*. Vol. 1. My`kolayiv: NUK, 2013. 72–76. Print. 9. Stavinskij, A.A., and O.O. Palchykov. "Elektroprivod kontrol'nogo obertannya. Patent na kory'snu model' № 65002." *Patent UA*. No. u201104982, 2011. Print. 10. Stavinskij, A.A., and O.O. Palchykov. "Ispol'zovanie metoda otноситel'nykh koefficientov pokazatelej tekhnicheskogo urovnya v reshenii zadach optimizacii asinhronnyh dvigatelej." *Elektrotehnika i elektromexanika*. No. 5. 2014. 37–44. Print. 11. Stavinskij, A.A., and O.O. Palchykov. "Celevye funkcii sravnitel'nogo analiza energeticheskoy effektivnosti elektromagnitnyh sistem asinhronnyh dvigatelej s vnutrennimi i vneshnimi rotorami." *Elektrotehnika i elektromexanika*. No. 1. 2015. 41–45. Print. 12. Dombrovskij, V.V., and V.M. Zajchik. *Asinhronnye mashiny: teoriya, raschet, elementy proektirovaniya*. Leningrad: Energoatomizdat, 1990. Print.

Поступила (received) 24.04.2015

#### «Сведения об авторах /About the Authors»

**Ставинский Андрей Андреевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, заведующий кафедры судовых электроэнергетических систем, тел.: +38(0512) 36 49 63.

**Stavinskiy Andrei Andreevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Chair of the Department of the shipboard electrical power systems and information security, phone: +38(0512)364963.

**Пальчиков Олег Олегович** – аспирант, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова; e-mail: [ole2013hulk@yandex.ua](mailto:ole2013hulk@yandex.ua)

**Palchykov Oleg Olegovich** – Postgraduate Student at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, e-mail: [ole2013hulk@yandex.ua](mailto:ole2013hulk@yandex.ua)