

intensely used in the electric power industry, which constitutes the basis of the country's infrastructure. Protection of power system electronic equipment from a nuclear explosion electromagnetic impulse, a factor able to upset its normal operability or even completely knock it out of action, has recently become of special importance. The peculiarities of testing power system electronic equipment for stability to a nuclear explosion electromagnetic impulse are considered, and matters concerned with selecting the aim of such tests, testing procedure, and test impulse parameters are discussed.

Key words: *power systems, equipment, nuclear explosion, electromagnetic impulse, protection, stability*

REFERENCES

1. **Gurevich V.I.** *Uyazyimosti mikroprotsessornykh rele zashchity: problemy i resheniya* (Vulnerabilities of microprocessor protection relays: problems and solutions). Moscow, Publ. «Infra-Inzheneriya», 2014, 256 p.
2. **Gurevich V.I.** *Zashchita oborudovaniya podstantsii ot elektromagnitnogo impul'sa* (Protection of substation equipment against electromagnetic). Moscow, Publ. «Infra-Inzheneriya», 2016, 302 p.
3. **Gurevich V.I.** EMP and Its Impact on Electrical Power System: Standards and Reports. – Problems in Power, 2016.

4. **IEC 61000-4-25** Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-25: Testing and measurement techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.

5. **MIL-STD-461F** Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, RS105, 2007.

6. **Gurevich V.I.** *Komponenty i tekhnologii – in Russ. (Components and Technologies)*, 2015, No. 3, pp. 158–161.

[01.08.2016]

* * *

Электричество, 2017, № 5, с. 18–27

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-18-27

Обобщенный метод структурно-параметрического синтеза электромагнитных систем электрических машин и индукционных аппаратов. Ч. 2. Результаты сравнительного анализа основных вариантов электромагнитной системы асинхронного короткозамкнутого двигателя

СТАВИНСКИЙ А.А., АВДЕЕВА Е.А., ПАЛЬЧИКОВ О.О., СТАВИНСКИЙ Р.А.

Основой общепромышленной конструкции асинхронного двигателя массового выпуска является радиальная электромагнитная система с внутренним ротором и магнитопроводом из плоских элементарных слоев с круговыми контурами. Такие слои создают большие производственные отходы электротехнической стали. Тенденция разработок асинхронных двигателей в последние десятилетия — снижение потерь посредством повышения удельной материалоемкости — противоречит задачам комплексного энергоресурсосбережения. В ограниченном производстве двигателей также используются радиальная и аксиальная электромагнитные системы соответственно с внешним ротором и плоским зазором. Приведены примеры решения задач по снижению отходов электротехнической стали и усовершенствованию радиальных и аксиальных асинхронных двигателей на основе пространственной структуры слоев электротехнической стали в многоплоскостных, конусно-плоскостных и конусно-цилиндрических магнитопроводах. Показаны возможности оптимизации и сравнения вариантов электромагнитных систем асинхронного короткозамкнутого двигателя с использованием обобщенного метода безразмерных показателей технического уровня и относительных управляемых переменных с геометрическими и электромагнитными параметрами. Показана последовательность разработки указанным методом математической модели и приведены результаты обобщенного оптимизационного сопоставления вариантов двигателя с радиальными и однороторной аксиальной электромагнитными системами. На основе оптимизационных расчетов установлена возможность ресурсосбережения и повышения энергоэффективности на основе замены в части приводов традиционных конструкций асинхронного двигателя аналогами обращенного и аксиального многополюсного исполнений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *асинхронный двигатель, электромагнитные системы, метод оптимизации, показатель технического уровня, относительные управляемые переменные, сопоставление*

Основу систем передачи энергии составляют трансформаторы, а основным преобразователем электриче-

ской энергии в механическую является асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором.

На протяжении столетия основным конструкциям общепромышленного АД закрытого обдуваемого и защищенного исполнения соответствует радиальная схема и структура электромагнитной системы (ЭМС) с внешним статором и внутренним ротором (вар. 1, табл. 1) [1, 2]. Двигатели такой схемы с магнитопроводами из плоских слоев электротехнической стали (ЭТС) с круговыми контурами получили известное, в частности из [3–10], наименование «классических» (КАД) или «традиционных».

Развитие электромеханики также сопровождалось менее масштабным по сравнению с комплексными разработками и крупносерийным производством КАД исследованиями и ограниченным изготовлением обращенных АД (ОАД) с внешним ротором и торцевых АД (ТАД) [5, 8, 12–16]. Основные из существующих вариантов радиальных и аксиальных ЭМС таких АД с традиционными структурами активных элементов представлены соответственно в табл. 1, вар. 2 и 3. С применением ОАД и ТАД улучшаются массогабаритные и эксплуатаци-

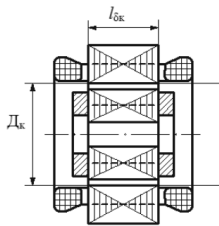
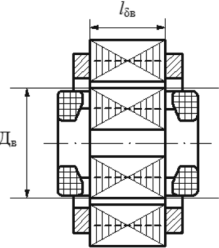
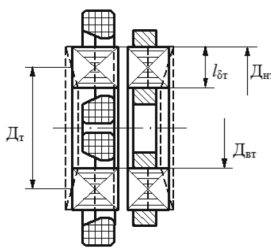
онные характеристики ряда механизмов общепромышленного и специального назначения [5, 11–15]. При этом ЭМС (табл. 1) характеризуются известными недостатками зубцово-пазовых структур [9], а изготовление традиционных радиальных магнитопроводов происходит со значительными отходами ЭТС [3, 4, 10]. Поэтому в последней четверти XX в. сложилось мнение [2–11] о необходимости новых подходов к созданию АД. Согласно [2] из традиционной ЭМС и конструкции АД общепромышленных серий «выжато» все, в [3] утверждается, что прогресс в электромашиностроении в конце XX в. «приостановлен».

По вышеуказанным причинам предпринимались попытки усовершенствования АД на основе нетрадиционных технических решений элементов ЭМС [3–16].

Для снижения отходов ЭТС при производстве АД предлагалось дополнить поверхности граненого магнитопровода статора до цилиндра штампованными или прессованными из композита ферромагнитными накладками. Также предлагалась «вер-

Таблица 1

Варианты конструктивных схем и обозначения показателей технического уровня электромагнитных систем асинхронных короткозамкнутых двигателей

Вариант	Конструктивная схема	Обозначение показателя		
		масса	стоимость	потери
1		$\Pi_{1каэ}^*$	$\Pi_{2каэ}^*$	$\Pi_{3каэ}^*$
2		$\Pi_{1оаэ}^*$	$\Pi_{2оаэ}^*$	$\Pi_{3оаэ}^*$
3		$\Pi_{1таэ}^*$	$\Pi_{2таэ}^*$	$\Pi_{3таэ}^*$

ная» сборка магнитопровода из пластин ЭТС прямоугольной конфигурации при «бескорпусном» исполнении АД. Созданы и испытаны образцы АД с композитными прессованными магнитопроводами, а также с витыми на «ребро» магнитопроводами из ленты ЭТС с пазовыми выемками и с гофрированным или пластинчатым «распределенным» активным слоем статора. Результаты выполненных работ (систематизированы в [4–6]) показали снижение энергетической эффективности новых разработок относительно аналогов с традиционными структурами элементов ЭМС. Решение сложных вопросов, связанных с освоением конструкций и технологий производства нетрадиционных магнитопроводов АД, требует больших капитальных вложений, специального технологического оборудования и длительного времени.

Кроме ТАД с композитными прессованными магнитопроводами [5] и нетрадиционных конструкторско-технологических решений ЭМС КАД [6], были разработаны АД радиальной схемы с малоотходными магнитопроводами статоров (рис. 1–3) и «конусно-плоскостными» магнитопроводами роторов (рис. 4). Разработаны ОАД с конусно-плоскостными двухсекционными магнитопроводами ротора и ТАД с «конусно-цилиндрическими» магнитопроводами ротора [7, 8, 10–12, 18].

Магнитопроводы (рис. 1 и 2) шихтованы из пластин конфигураций, исключающих наружные отходы раскроя полосы ЭТС. Магнитопровод с ребрами аксиально-тангенциального охлаждения (рис. 1,а) выполняется поперечным разделением

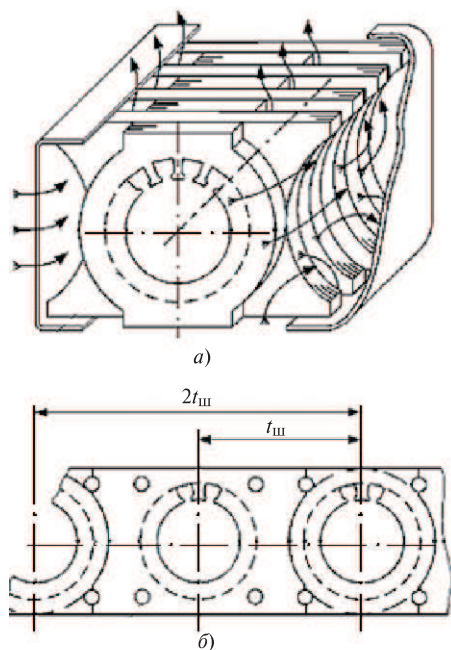


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и раскроя полосы (б) электротехнической стали для изготовления магнитопровода статора бескорпусного двигателя с аксиально-тангенциальным охлаждением

полосы ЭТС (рис. 1,б) с двойным шагом $2t_{III}$ относительно шага штамповки пазовых и крепежно-установочных отверстий. Магнитопровод (рис. 2,а) отличается «многоплоскостными» слоями ЭТС. Пространственная структура магнитопровода создается тангенциальным смещением пластин квадратной формы и отгибом их угловых зон на 60° по линиям граней восьмигранника (рис. 2,б). На вершинах углов участки смежных слоев смещаются на b_{CM} (рис. 2,а и в). Выступы или смещения пластин ЭТС особой формы увеличивают поверхности охлаждения и теплоотдачу «бескорпусного» АД, так как создают соответственно «рельефность» (рис. 1,а) и «шероховатость» (на рис. 2,а и в характеризуется размерами δ_c и b_{CM}) внешней поверхности статора.

В закрытом бескорпусном АД (рис. 3,а) [7, 10, 12] магнитопровод статора (рис. 3,б) из пластин (рис. 3,в) и слоев (рис. 3,г) ЭТС стянут несущими опорными элементами. Пространственная структура ярма в 1,5–2 раза (и более при формировании зубчатых угловых зон пластин) увеличивает площадь внешней поверхности охлаждения статора и выполняет функции корпуса. При сборке магнитопровода требуется периодический поворот заготовок пакета. Операция отгиба граней и совмещения торцевых зон магнитопровода с нажимными элементами выполняется в собранной заготовке и может быть совмещена с операцией опрессовки пакета с последующим скреплением сваркой в угловых зонах (через пластину).

Ротор АД (вар. 1, табл. 1) может быть выполнен с «прерывистым» валом в сочетании с конусно-плоскостной структурой магнитопровода [12]. Стягивающие магнитопровод опорно-нажимные элементы («хвостовики») охвачены алюминием короткозамыкающих колец обмотки ротора. Скрепляющее действие взамен средней части вала создает жесткое и монолитное сопряжение идентичных слоев ЭТС тарельчатой формы, образующих конусную зону ярма (рис. 4,а) или зубцов (рис. 4,б). Достигнуто уменьшение удельной и технологической материалоемкости, снижение потерь и улучшение виброакустических характеристик АД малой мощности [10–12] с активными элементами конструкций (рис. 2–4) относительно аналогов КАД.

Уменьшение массы при увеличении КПД ТАД относительно аналога с традиционной аксиальной ЭМС (вар. 3, табл. 1) достигается конусно-цилиндрической структурой слоев ЭТС магнитопроводов ротора (рис. 5) [8, 15]. Также повышается КПД ТАД в связи с заменой традиционных прямоугольных сечений ярма трапециевидными [16] (пунктирные линии, вар. 3, табл. 1).

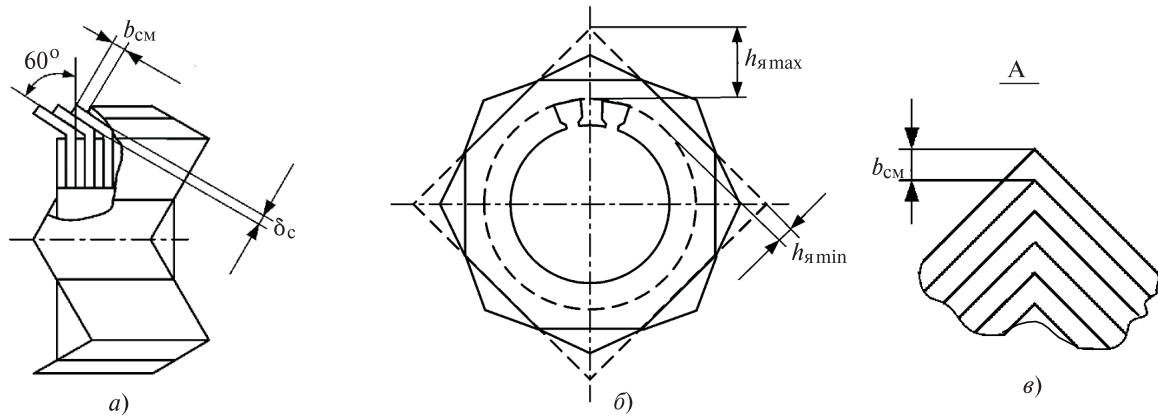


Рис. 2. Многоплоскостной магнитопровод (а) и конструктивно-структурные особенности пространственных слоев электротехнической стали и внешней поверхности статора (б, в)

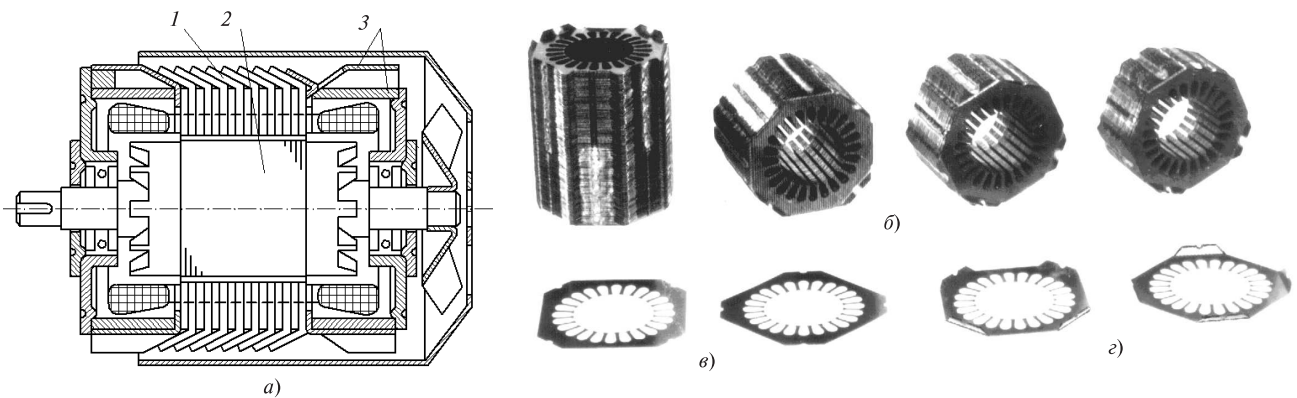


Рис. 3. Конструктивная схема закрытого бескорпусного асинхронного двигателя (а) с магнитопроводом статора (б), плоские заготовки (в) и элементарные слои (г) электротехнической стали пространственной структуры: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – опорно-стяжной элемент

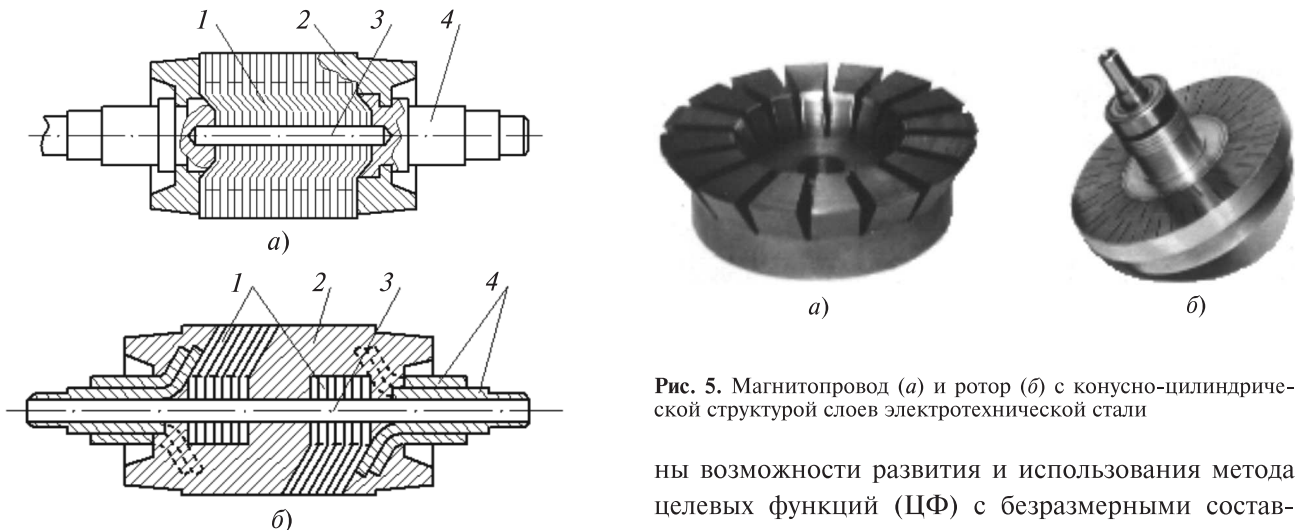


Рис. 4. Варианты конструктивных схем короткозамкнутого ротора с конусно-плоскостной структурой яра (а) и зубцов (б): 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – центрирующий стержень; 4 – опорно-нажимной элемент

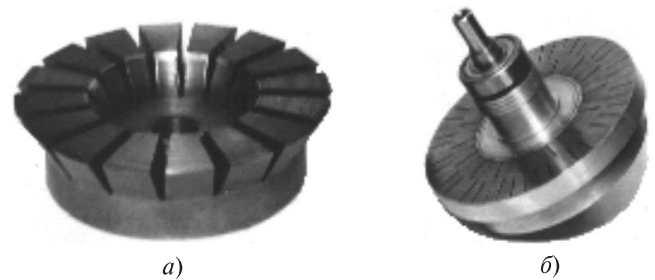


Рис. 5. Магнитопровод (а) и ротор (б) с конусно-цилиндрической структурой слоев электротехнической стали

Технические решения (рис. 1–5) демонстрируют в дополнение к [17, 18] возможности усовершенствования электромеханических устройств на основе нетрадиционных пространственных структур и образующих контуров активных элементов. Также в данной статье (продолжении [18]) показаны

возможности развития и использования метода целевых функций (ЦФ) с безразмерными составляющими (БС) определения показателей технического уровня (ПТУ) [17] для оптимизации и анализа электромеханических преобразователей.

В целом современное состояние новых разработок АД характеризуется тем, что прошедшие после публикаций [2–11] годы ничего не изменили в части использования и создания нетрадиционных конструкций ЭМС. Освоенные в производстве в XXI в. КАД в конструктивно-структурном смысле аналогичны предыдущим техническим решениям.

Например, КАД ВА04, IBA0, ..., ВА05П практически не отличаются от разработок ВА02 1970-х годов [19]. При проектировании новых КАД применяются традиционные ЭМС (вар. 1, табл. 1), способы усовершенствования (улучшенные материалы, оптимизированные «использование» и геометрические соотношения) и традиционный корпус с наружным обдувом [20]. Используемые схемы конструктивной части закрытых и защищенных КАД соответствуют началу прошлого столетия и согласно [3, 19] не являются эффективными.

В XXI в. главная задача развития электромашиностроения заключается в комплексном энергоресурсосбережении на основе максимального повышения КПД и $\cos\varphi$, а также увеличения мощности единичного электромагнитного агрегата [21]. Тенденцией последних десятилетий разработок АДК является повышение КПД снижением электромагнитных нагрузок (ЭМН) при увеличении активной длины и материалоемкости [22, 23], что противоречит задаче комплексного ресурсосбережения.

Из схем (табл. 1) следует возможность повышения КПД ОАД и ТАД относительно КАД при идентичности соответственно диаметров D_K, D_B, D_T и длин $l_{\delta K}, l_{\delta B}, l_{\delta T}$ активных поверхностей статоров, а также ЭМН исходя из меньших объемов и потерь в стали ярм. Идентичность соответственно ЭМН, исполнений и способов охлаждения сравниваемых АД соответствует известному, в том числе из [5, 8, 17, 18], условию электромагнитной эквивалентности (ЭМЭ), т.е. равенству электромагнитных мощностей вариантов ЭМС. Известные сравнения, например [5, 8], радиальных и аксиальных ЭМС на условиях ЭМЭ показали преимущество ОАД и ТАД над КАД при равенстве соответственно D_K, D_T и $l_{\delta K}, l_{\delta T}$.

Однако оптимальные сочетания главных размеров и геометрических соотношений ЭМС могут соответствовать только одному из сравниваемых вариантов при конкретном числе полюсов, и результаты сравнения [5, 8] являются условными. Поэтому представляет интерес решение задач обобщающего оптимизационного сравнительного анализа рассматриваемых вариантов (табл. 1). Решение таких задач имеет смысл также с учетом возрастания значимости специальных исполнений АД [8–15] и структурно-параметрического синтеза нетрадиционных вариантов ЭМС [17, 18]. Кроме того, выполненные разработки и опыт применения специальных АД обуславливают целесообразность дополнения известных, например из [1], расчетных математических моделей (ММ) КАД работами по оптимизации геометрических соотношений ЭМС ОАД и ТАД.

Оптимизация ЭМС индукционных статических и электромеханических преобразователей, а также аппаратов по частным и интегральному критериям возможна с использованием универсальной ЦФ [17, 18]:

$$F_{\text{ЭМЭ}} = (\sqrt[4]{\Pi_{ii}})^3 K_{\text{МК}} \Pi_{kii}^* \quad (1)$$

где Π_{ii} – показатель исходных данных проектирования и ЭМН ii -варианта ЭМС; $K_{\text{МК}}$ – составляющая удельных характеристик используемых активных материалов (ЭТС, обмоточного провода, алюминия); Π_{kii}^* – одна из БС, характеризующих $k \geq 3$ ЦФ вида (1). Экстремумы БС ЦФ (1) – $\Pi_{kii\text{Э}}^*$ – являются показателями технического уровня (ПТУ) электромагнитного устройства [16, 17].

Показатель Π_{ii} ЦФ $F_{\text{ад}ii}$ вида (1) трехфазного АД [24]:

$$\Pi_{\text{ад}} = K_E p P_N / (2,22 \eta \cos\varphi f_1 K_p K_y J_s B_\delta), \quad (2)$$

где K_E – соотношение ЭДС и напряжения фазы статора; $p, P_N, \eta, \cos\varphi$ – число пар полюсов, номинальная мощность, КПД и энергетический коэффициент АД; f_1 – частота тока статора; K_p, K_y, J_s – коэффициенты распределения, укорочения шага и плотность тока обмотки статора; B_δ – амплитуда индукции в рабочем зазоре.

Основными БС ($k=1-3$) ЦФ (1) АД с ii -вариантом ЭМС является совокупность БС массы Π_{1ii}^* , стоимости Π_{2ii}^* и потерь активной мощности Π_{3ii}^* . Все БС ЦФ (1) двигателя определяются универсальными геометрическими относительными управляемыми переменными (УП) a_d и λ_δ [24–27]. Кроме того, $\Pi_{1(2)ii}^*$, Π_{3ii}^* и другие БС зависят от коэффициента заполнения паза статора $K_{з.п}$ активным материалом обмотки. Также Π_{3ii}^* зависит от соотношений $K_{yzs}, K_{yas}, K_{yws}, K_{ywR}$ коэффициентов добавочных потерь, удельных характеристик материалов и ЭМН, определяющих потери в зубцах, ярме и обмотках статора и ротора [24–27]:

$$\Pi_{1(2)ii}^* = f_{1(2)ii}(a_d, \lambda_\delta, K_{з.п}); \quad (3)$$

$$\Pi_{3ii}^* = f_{3ii}(a_d, \lambda_\delta, K_{з.п}, K_{yzs}, K_{yas}, K_{yws}). \quad (4)$$

Входящие в (1)–(4) геометрические УП оптимизации ii -варианта ЭМС АД представляют отношения с составляющими показателя исходных данных и ЭМН $\Pi_{\text{ад}}$ [м⁴], а также диаметра D_{ii} и длины $l_{\delta ii}$ активных поверхностей статора [24–27]:

$$a_d = D_{ii}^4 / \Pi_{\text{ад}}; \quad \lambda_\delta = l_{\delta ii} / D_{ii}. \quad (5)$$

Разработка ММ *ii*-варианта ЭМС АД методом [17, 18] выполняется в последовательности (рис. 6) с использованием базисных уравнений связи параметров магнитопроводов и обмоток статора и ротора с $\Pi_{\text{АД}}$. Для АД базисными являются уравнения связи суммарной площади пазов статора (ротора) $S_{S(R)ii}$ с $\Pi_{\text{ад}}$ и D_{ii} [24]:

$$S_{Sii} = \Pi_{\text{АД}} / (K_{3.п} \lambda_{\delta} D_{ii}^2); \quad (6)$$

$$S_{Sii} = \alpha_R \Pi_{\text{АД}} / (\lambda_{\delta} D_{ii}^2), \quad (7)$$

где α_R – расчетный коэффициент, который определяется с учетом диапазонов изменения значений $\cos\varphi$, коэффициента скоса пазов $K_{\text{СК}}$ и соотношения плотностей токов статора J_S и тока ротора J_R [1, 24];

$$\alpha_R = K_p K_y (0,2 + 0,8 \cos\varphi) J_S / (K_{\text{СК}} J_R).$$

Суммарные площади пазов (6), (7) также выражаются через D_{ii} и размеры высоты зубцов статора (ротора) $h_{zS(R)ii}$:

$$S'_{Sii} = F_{SS}(D_{ii}, h_{zSii}); \quad (8)$$

$$S'_{Rii} = F_{SR}(D_{ii}, h_{zRii}). \quad (9)$$

Решением уравнений равенств (6) и (8), (7) и (9) определяются зависимости [24, 26]:

$$h_{zSii} = f_{zS}(\Pi_{\text{АД}}, K_{3.п}, D_{ii}, \lambda_{\delta}); \quad (10)$$

$$S_{Sii} = 1 / (K_{3.п} \lambda_{\delta} \sqrt{a_{\text{д}} \Pi_{\text{АД}}});$$

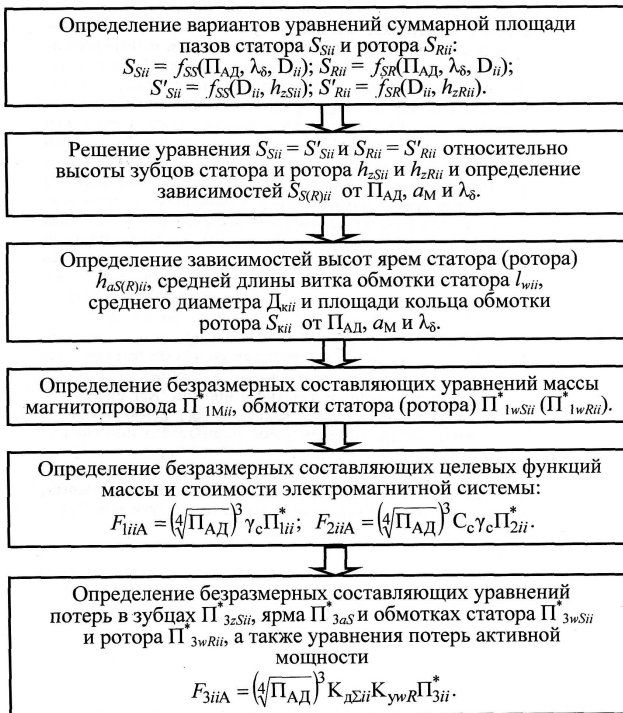


Рис. 6. Последовательность разработки математической модели определения основных показателей технического уровня асинхронного двигателя

$$h_{zRii} = f_{zR}(\Pi_{\text{АД}}, \alpha_R, D_{ii}, \lambda_{\delta}); \quad (11)$$

$$S_{Rii} = \alpha_R / (\lambda_{\delta} \sqrt{a_{\text{д}} \Pi_{\text{АД}}}).$$

Также определяются зависимости высоты ярма магнитопроводов статора (ротора) $h_{aS(R)ii}$, средней длины витка обмотки статора l_{wii} , среднего значения диаметра (в ТАД средних диаметров) и сечения короткозамыкающего кольца обмотки ротора D_{kii} и S_{kii} от $\Pi_{\text{АД}}$ и λ_{δ} :

$$h_{aS(R)ii} = \sqrt[4]{a_{\text{д}} \Pi_{\text{АД}}} / p; \quad l_{wii} = f_l(\Pi_{\text{АД}}, a_{\text{д}}, \lambda_{\delta}); \quad (12)$$

$$D_{kii} = f_k(\Pi_{\text{АД}}, a_{\text{д}}, \lambda_{\delta}); \quad S_{kii} = f_{\text{СК}}(\Pi_{\text{АД}}, a_{\text{д}}, \lambda_{\delta}). \quad (13)$$

С учетом (6)–(13) находятся уравнения масс магнитопровода m_{mii} , обмотки статора m_{wSii} и обмотки ротора m_{wRii} :

$$m_{mii} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{АД}}})^3 \gamma_c \Pi_{1mii}^*; \quad (14)$$

$$m_{wSii} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{АД}}})^3 \gamma_w K_{\gamma w} \Pi_{1wSii}^*;$$

$$m_{wRii} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{АД}}})^3 \gamma_a \Pi_{1wRii}^*, \quad (15)$$

где $\gamma_c, \gamma_w, \gamma_a$ – плотность ЭТС, меди и алюминия; $\Pi_{1mii}^*, \Pi_{1wSii}^*, \Pi_{1wRii}^*$ – БС ЦФ массы магнитопровода, обмоток статора и ротора; $K_{\gamma w} = 1,07 \div 1,09$ – коэффициент повышения массы с учетом изоляции и пропитки.

На основе (14) и (15) определяются суммарные значения массы F_{1iiA} и стоимости F_{2iiA} *ii*-варианта ЭМС АД [24, 26]:

$$F_{1iiA} = m_{miiA} + m_{wSii} + m_{wRii} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{АД}}})^3 \gamma_c \Pi_{1iiA}^*; \quad (16)$$

$$F_{2iiA} = C_{miiA} + C_{wSii} + C_{wRii} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{АД}}})^3 C_c \gamma_c \Pi_{2iiA}^*, \quad (17)$$

где $\Pi_{1iiA}^*, \Pi_{2iiA}^*$ – БС ЦФ массы и стоимости *ii*-варианта ЭМС АД; C_{miiA}, C_{wSii} и C_{wRii} – стоимости магнитопровода, обмоток статора и ротора; C_c – удельная стоимость ЭТС.

Уравнения входящих в (16) и (17) БС Π_{1iiA}^* и Π_{2iiA}^* представляются в виде:

$$\Pi_{1iiA}^* = \Pi_{1miiA}^* + \gamma_m \Pi_{1wSii}^* / \gamma_c + \gamma_a \Pi_{1wRii}^* / \gamma_c; \quad (18)$$

$$\Pi_{2iiA}^* = \Pi_{1miiA}^* + C_w \gamma_m \Pi_{1wSii}^* / (C_c \gamma_c) + C_a \gamma_a \Pi_{1wRii}^* / (C_c \gamma_c), \quad (19)$$

где C_w, C_a – значения удельной стоимости электротехнических меди (с учетом изоляции) и алюминия.

С учетом (5) и (6)–(13) составляются уравнения ЦФ потерь в объеме магнитопровода P_{MiiA} , обмотках статора P_{wSii} и ротора P_{wRii} АД [25, 27]:

$$P_{MiiA} = P_M (K_{дз} B_{z1}^2 m_{z1ii} + K_{да} B_{a1}^2 m_{a1ii}) = - (4\sqrt{\Pi_{АД}})^3 P_M B_\delta^2 \rho_c (K_{дз} K_{Bz}^2 \Pi_{3zSii}^* + K_{да} K_{Ba}^2 \Pi_{3aSii}^*); \quad (20)$$

$$P_{wSii} = (4\sqrt{\Pi_{АД}})^3 (J_S^2 / \sigma_M) \Pi_{3wSii}^*;$$

$$P_{wRii} = (4\sqrt{\Pi_{АД}})^3 (J_R^2 / \sigma_a) \Pi_{3wRii}^*,$$

где P_M – удельные потери ЭТС магнитопровода при $f_1 = 50$ Гц и индукции 1 Тл; $K_{дз(a)}$ – коэффициент добавочных потерь зубцов (ярма) статора [1]; $B_{z(a)S}$ – амплитуда магнитной индукции в зубце (ярме) статора; $m_{z(a)ii}$ – масса зубцов (ярма); $K_{Bz(a)}$ – отношение $B_{z(a)S}$ к B_δ ; $\sigma_{M(a)}$ – удельная проводимость меди (алюминия); Π_{3zSii}^* , Π_{3aSii}^* , Π_{3wSii}^* , Π_{3wRii}^* – БС ЦФ потерь в зубцах, ярме и обмотках статора и ротора, являющиеся функциями a_M и λ_δ , а также ЭМН.

На основе совокупности уравнений (18) определяются суммарные потери АД с ii -вариантом ЭМС:

$$F_{3iiA} = K_{д\Sigma ii} (P_{Mii} + P_{wSii} + P_{wRii}) = (4\sqrt{\Pi_{АД}})^3 K_{д\Sigma ii} K_{ywR} \Pi_{3iiA}^*, \quad (21)$$

где $K_{д\Sigma ii}$ – коэффициент повышения потерь; Π_{3iiA}^* – БС ЦФ потерь активной мощности АД с ii -вариантом ЭМС;

$$\Pi_{3iiA}^* = K_{yзS} \Pi_{3zSii}^* + K_{yaS} \Pi_{3aSii}^* + K_{ywS} \Pi_{3wSii}^* + \Pi_{3wRii}^*. \quad (22)$$

Входящие в (19), (20) коэффициенты:

$$K_{ywR} = J_R^2 / \sigma_a; \quad K_{yзS} = P_c K_{дз} K_{Bz}^2 B_\delta^2 \gamma_c \sigma_a / J_R^2;$$

$$K_{yaS} = P_c K_{да} K_{Ba}^2 B_\delta^2 \rho_c \sigma_a / J_R^2;$$

$$K_{ywS} = J_S^2 / \sigma_a / (J_R^2 \sigma_M).$$

Коэффициент $K_{д\Sigma ii}$ учитывает увеличение потерь в ЭМС до суммарных потерь АД:

$$K_{д\Sigma ii} = K_{дxii} K_{Mii} K_{днii}, \quad (23)$$

где $K_{дxii}$ – коэффициент повышения суммарных потерь за счет поверхностно-пульсационных по-

терь магнитопровода; K_{Mii} – коэффициент повышения суммарных потерь за счет механических и вентиляционных составляющих; $K_{днii}$ – коэффициент повышения потерь за счет нагрузочных добавочных составляющих.

Решая задачи структурного синтеза или обобщенного сопоставления ЭМС на условиях ЭМЭ, при определении Π_{3ii}^* необходимо учитывать составляющие (23). Характеризуемое $K_{дxii}$ повышение потерь в ЭТС за счет поверхностных и пульсационных составляющих определяется значением B_δ , соотношением чисел пазов и геометрическими соотношениями шлицевых зон зубцов статора и ротора. Значения амплитуды индукции и указанных соотношений при условиях ЭМЭ соответственно одинаковы и близки. Учитываемые K_{Mii} механические и вентиляционные потери определяются эмпирическими коэффициентами, значения которых известны для КАД и неизвестны для ОАД и ТАД. Значения механических потерь, зависящих от объема и массы ротора, а также типа подшипников, и у ОАД, и у ТАД выше, чем у КАД. Однако вентиляционные потери специальных ОАД и ТАД могут быть ниже, чем у КАД-аналогов, так как функциональные элементы приводных механизмов с такими АД являются своеобразными радиаторами (рабочие колеса вентиляторов, ролики транспортеров и др.). Поэтому исходя из изложенного и учитывая малое значение составляющей $K_{днii}$ добавочных нагрузочных потерь, в дополнение к условиям ЭМЭ и допущениям, изложенным в [18], приближенно принимается идентичность $K_{д\Sigma ii}$ у сравниваемых вариантов ЭМС.

При разработке ММ ТАД [26, 27] принята традиционная коаксиальная структура слоев ЭТС при конфигурации сечений ярм магнитопровода в виде прямоугольной трапеции [16] (штриховые линии вар. 3, табл. 1). Такие сечения образуются без повышения массы магнитопровода разделением прямоугольной развертки ленты (рулона) ЭТС двух магнитопроводов на две «клиновидные» части [17]. Увеличение высоты ярма в радиальном направлении выравнивает насыщение магнитной цепи вдоль активной длины и снижает потери в ЭТС ТАД. Также при расчете ПТУ ТАД с $p=1$ не учитывалось проектное ограничение возможности размещения в зоне внутренних лобовых частей статора конструктивных элементов ротора и подшипников. Такие элементы отсутствуют в указанной зоне ТАД особой конструкции, вариант которой приведен в [18].

Определением ПТУ $\Pi_{1(2)iiA}^*$ и Π_{3iiA}^* – экстремумов уравнений БС (16), (17), (20) – можно выполнить оптимизацию КАД, ОАД и ТАД по одному из указанных выше частных критериев при задан-

Таблица 2

Показатели технического уровня асинхронных двигателей

Соотношение показателей технического уровня	Числовые значения улучшения (+) или ухудшения (–) показателей технического уровня обращенных и торцевых асинхронных двигателей относительно двигателя классического исполнения			
	Число полюсов			
	1	2	3	4
$\Pi_{1\text{ККАЭ}}/\Pi_{1\text{КОАЭ}}$	-17,6...+0,3	-12,9...+1,7	-13,1...+2,4	-11,0...+2,7
$\Pi_{2\text{ККАЭ}}/\Pi_{2\text{КОАЭ}}$	-3,2...+9,5	+(2,9...11,2)	+(2,9...10,9)	+(3,8...8,9)
$\Pi_{3\text{ККАЭ}}/\Pi_{3\text{КОАЭ}}$	+(20,4...26,4)	+(10,7...13,7)	+(8,0...11,0)	+(6,0...8,4)
$\Pi_{1\text{ККАЭ}}/\Pi_{1\text{КТАЭ}}$	+(4,9...19,9)	+(1,7...12,1)	+(8,2...17,7)	+(10,5...16,9)
$\Pi_{2\text{ККАЭ}}/\Pi_{2\text{КТАЭ}}$	-(20,2...9,0)	-(10,2...6,2)	-2,6...+0,8	+(1,8...4,3)
$\Pi_{3\text{ККАЭ}}/\Pi_{3\text{КТАЭ}}$	- 41,0...+14,2	-30,0...+20,9	-22,4...+25,2	-18,6...+27,4

ных проектных ограничениях. Исходя из вида ЦФ с показателями (16), (17), (20), аналогично трансформаторам и реакторам оптимальные по критериям минимумов значений массы и стоимости безразмерные геометрические соотношения ЭМС не зависят от ЭМН. При этом оптимизация АД по критерию максимума КПД и по сформированной аналогично [18] на основе $F_{2(3)ii}$ ЦФ интегрального критерия усложняется необходимостью варьирования дополнительных УП соотношений ЭМН K_{yzS} , K_{yaS} , K_{yWR} .

В [24–27] по уравнениям, соответствующим (16), (17) и (20), рассчитаны основные ПТУ $\Pi_{\text{ККАЭ}}^*$, $\Pi_{\text{КОАЭ}}^*$ и $\Pi_{\text{КТАЭ}}^*$ ($k=1-3$) соответственно КАД, ОАД и ТАД с ЭМС (вар. 1, 2 и вар. 3 штриховые линии, табл. 1). Расчеты выполнены при $K_{3,п} = 0,3$, $\alpha_R = 1,338 \div 2,785$, $J_s = 5 \div 6$ А/мм², $J_R = 2 \div 3$ А/мм², $B_\delta = 0,6 \div 0,8$ Тл, значениях коэффициентов $K_{Bz} = 2 \div 3$ и $K_{Ba} = 1,6 \div 2$ при $2p \leq 4$, $K_a = 1 \div 1,45$ при $2p \geq 6$, а также $C_w/C_c = 6,685$ и $C_a/C_c = 3,481$. Установлено, что ЦФ масс и стоимости КАД при $2p=2$ и ОАД при $2 \leq 2p \leq 8$, а также зависимости потерь таких АД при $2p=2$ не содержат экстремумов по a_M и при конкретных значениях a_M характеризуются определенными экстремальными значениями λ_δ . Содержащие УП a_M , λ_δ ЦФ массы, стоимости и потерь КАД при $2p \geq 4$ и ЦФ потерь ОАД при $2p \geq 4$ являются унимодальными. Аналогичные ЦФ основных ПТУ ($k=1-3$) ТАД при $2p \geq 2$ являются унимодальными. Соответствующие указанным расчетам значения отношений $\Pi_{\text{ККАЭ}}^*/\Pi_{\text{КОАЭ}}^*$ и $\Pi_{\text{ККАЭ}}^*/\Pi_{\text{КТАЭ}}^*$ приведены в табл. 2.

Применяя метод [17, 18], можно оценить влияние на массостоймостные (с учетом отходов ЭТС) и энергетические (η , $\cos\varphi$) показатели, а также интегральный оптимизационный показатель АД не-

традиционных структурных преобразований элементов ЭМС, например, дать оценку замены цилиндрических образующих слоев ЭТС зубцовой зоны ротора (вар. 3, табл. 1) на слои конусно-цилиндрического магнитопровода (рис. 5).

Показанное в работе снижение металлоемкости активной и конструктивной частей (рис. 1–5) и приведенные результаты сопоставления АД (табл. 2) с вариантами ЭМС (табл. 1) свидетельствуют о целесообразности использования в новых разработках нетрадиционных технических решений и расширения производства двигателей исходя из повышенного значения КПД ОАД и пониженной массы ТАД с $2p > 2$, а также исключения самовентилиации при конструктивной совместимости с рядом приводных механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования. – Л.: Энергоатомиздат, 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, pp. 29–38.
4. Копылов И.П., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Основные направления снижения технологической материалоемкости магнитопроводов асинхронных двигателей. – Электротехника, 1987, № 6, с. 58–61.
5. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные двигатели интегрального изготовления. – М.: Энергоатомиздат, 1988, 304 с.
6. Яковлев А.И. Электрические машины с уменьшенной материалоемкостью. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 240 с.
7. Stavinskii A.A. Induction motors with electrical steel laminations of multiplanar structure. – Electrical Technology, 1992, No. 2, pp. 57–67.
8. Ставинский А.А. Особенности магнитопроводов асинхронных двигателей с конической структурой зубцов. – Изв. РАН. Энергетика, 1992, № 5, с. 130 – 137.
9. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых асинхронных двигателей. – Электричество, 1996, № 8, с. 37–42.

10. Ставинский А.А. Асинхронные двигатели с тангенциальным смещением элементарных слоев стали статора. — Электричество, 1996, № 8, с. 43–48.
11. Ставинский А.А. Асинхронный двигатель с двухпакетным внешним ротором для привода судового встраиваемого вентилятора. — Электротехническое производство. Передовой опыт и научно-технические достижения для внедрения. Отраслевой информационный сборник, 1990, вып. 6(30), с. 4–7.
12. Ставинский А.А. Проблема и нетрадиционные технические решения улучшения виброакустических характеристик асинхронных двигателей. — Электротехника і електромеханіка, 2004, № 4, с. 81–85.
13. Igelspacher J., Herzog H.-G. Analytical description of a single-stator axial-flux induction machine with squirrel cage. — XIX Int. conf. on Electrical Machines (ICEM 2010). Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 6–8 Sept., 2010, pp. 1–6.
14. Марков А.М. Ступичный асинхронный тяговый электродвигатель с внешним ротором и жидкостным охлаждением. — Труды Псковского политехнического института. Электротехника, 2011, № 15.3, с. 319–322.
15. Ставинский А.А. Совершенствование судовых электро-механических систем встречного вращения на основе специальных асинхронных двигателей. — Судостроение, 2011, № 6, с. 35–38.
16. Игнатов В.А., Ставинский А.А., Забора И.Г. Исследование распределения магнитного поля в активном объеме торцевых электрических машин с витым магнитопроводом. — Электротехника, 1983, № 8, с. 27–30.
17. 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.
18. Ставинский А.А., Авдеева Е.А., Пальчиков О.О., Ставинский Р.А. Универсальный метод структурно-параметрического синтеза электромагнитных систем электрических машин и индукционных аппаратов. Ч. 1. Результаты сравнительного анализа вариантов трехфазных электромагнитных систем трансформаторов. — Электричество, 2017, № 4, с. 39–49.
19. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин. — Электротехника і електромеханіка, 2007, № 3, с. 36–38.
20. Вареник Е.А., Каика В.В., Красников Г.В., Швецова Т.В., Аниканов А.И. О новой единой серии низковольтных взрывозащищенных асинхронных двигателей. — Рынок электротехники: журнал-справочник, 2010, № 1(17), с. 68–70.
21. Иванов-Смоленский А.В., Копылов И.П., Лопухина Е.М. Перспективы развития электромеханики в XXI веке. — Электропанорама, 2001, №1, с. 14–15.
22. Муравлева О.О. Концепция и пути создания энергоэффективных асинхронных двигателей. — Электричество, 2007, № 6, с. 50–52.
23. Гловацкий А.В., Кубарев Л.П., Макаров Л.Н. Основные направления развития электрических машин и электромеханических систем на их основе. — Электротехника, 2008, № 4, с. 2–8.
24. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей. — Электротехніка і електромеханіка, 2014, № 5, с. 37–44.
25. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Целевые функции сравнительного анализа энергетической эффективности электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренними и внешними роторами. — Электротехніка і електромеханіка, 2015, № 1, с. 41–45.
26. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Сравнительный анализ массостоимостных показателей асинхронных двигателей с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором. — Электротехніка і електромеханіка, 2015, № 3, с. 20–26.
27. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Сравнительный анализ потерь активной мощности асинхронных двигателей с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором. — Электротехніка і електромеханіка, 2015, № 5, с. 31–35.

[10.10.2016]

Авторы: Ставинский Андрей Андреевич окончил в 1975 г. электромеханический факультет Одесского политехнического института. Кандидатскую и докторскую диссертации защитил в техническом университете «Московский энергетический институт» соответственно в 1983 и 1993 гг. Заведующий кафедрой электроэнергетики, электротехники и электромеханики Национального аграрного университета, г. Николаев, Украина.

Авдеева Елена Андреевна окончила в 2006 г. Национальный университет кораблестроения (НУК) имени адмирала Макарова. В 2015 г. защитила кандидатскую диссертацию. Ассистент кафедры судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) НУК.

Пальчиков Олег Олегович окончил в 2013 г. Национальный университет кораблестроения. Магистр, аспирант кафедры СЭЭС НУК.

Ставинский Ростислав Андреевич окончил в 2000 г. Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры СЭЭС НУК.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 5, pp. 18–27

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-18-27

A Generalized Method for Structural-Parametric Synthesis of the Electromagnetic Systems of Electrical Machines and Induction Apparatuses. Part 2. Results from Comparative Analysis of the Basic Versions of Making the Electromagnetic System of a Squirrel-Cage Induction Motor

STAVINSKII Andrei A. (National Agrarian University (NAU), Nikolayev, Ukraine) — Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

AVDEYEVA Yelena A. (National University of Shipbuilding named Admiral Makarov (NUS), Nikolayev, Ukraine) — Assistant of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

PAL'CHIKOV Oleg O. (*NUS, Nikolayev, Ukraine*) – *Magister, Graduate student of the Department*
STAVINSKII Rostislav A. (*NAU, Nikolayev, Ukraine*) – *Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)*

A radial electromagnetic system comprising an inner rotor and a magnetic core constituted by flat elementary layers with circular outlines serves as a basis for the general-industry design of mass-produced induction motors. The manufacture of such layers is associated with a large amount of electric steel wastes. A tendency toward decreasing the losses in induction motors by increasing their specific material intensity, which has been seen in their developments in the recent decades, comes in contradiction with the goals of integrally saving energy and resources. There are also limited series of motors made with the use of radial and axial electromagnetic systems with an external rotor and a flat gap, respectively. The article presents examples of design solutions aimed at decreasing the amount of electric steel wastes and improving radial and axial induction motors by using a spatial structure of electric steel layers in multiplanar, cone-planar, and cone-cylindrical magnetic cores. The article demonstrates the possibilities of optimizing and comparing different versions of the electromagnetic systems of a squirrel-cage induction motor using the generalized method of dimensionless indicators characterizing the technical level and the relative controlled variables with geometrical and electromagnetic parameters. The sequence of elaborating a mathematical model using the above-mentioned method is shown, and the results from a generalized optimization comparison of motor versions with radial and single-rotor axial electromagnetic systems are presented. Optimization calculations are carried out, based on which the possibility of saving resources and improving energy efficiency through replacing induction motors of conventional designs by their inverted and axial multipole analogs is substantiated.

Key words: *induction motor, electromagnetic systems, optimization method, technical level indicator, relative controlled variables, comparison*

REFERENCES

1. **Dombrovskii V.V., Zaichik V.M.** *Asinkhronnye mashiny: teoriya, raschet, elementy proyektirovaniya* (Asynchronous machines. Theory, calculation, design elements). Leningrad, Energoatomizdat, 1990, 368 p.
2. **Radin V.I.** *Nauka i tekhnika – in Russ. (Science and Technology)*, 1985, pp. 38–44.
3. **Volkrodt W.** *Neue wege im Electromaschinenbau.* – *Electro-Jobr*, 1985, pp. 29–38.
4. **Kopylov I.P., Kostikov O.N., Yakovlev A.I.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 1987, No. 6, pp. 58–61.
5. **Ignatov V.A., Vil'danov K.Ya.** *Tortseyve asinkhronnye dvigateli integral'nogo izgotovleniya* (End induction motors of integral manufacturing). Moscow, Energoatomizdat, 1988, 304 p.
6. **Yakovlev A.I.** *Elektricheskiye mashiny s umen'shennoi materialoyemkost'yu* (Electrical machines with reduced material capacity). Moscow, Energoatomizdat, 1989, 240 p.
7. **Stavinskii A.A.** *Induction motors with electrical steel laminations of multiplanar structure.* – *Electrical Technology*, 1992, No. 2, pp. 57–67.
8. **Stavinskii A.A.** *Izv. RAN. Energetika – in Russ. (News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 1992, No. 5, pp. 130–137.
9. **Kazanskii V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1996, No. 8, pp. 37–42.
10. **Stavinskii A.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1996, No. 8, pp. 43–48.
11. **Stavinskii A.A.** *Otraslevoi informatsionnyi sbornik «Peredovoi opyt i nauchno-tekhnicheskiye dostizheniya dlya vnedreniya» – in Russ. (Branch information collection «Electro-technical production. Best practices and scientific and technical achievements for implementation»)*, 1990, iss. 6(30), pp. 4–7.
12. **Stavinskii A.A.** *Elektrotehnika i elektromekhanika – in Ukrainian (Power Engineering and Electromechanics)*, 2004, No. 4, pp. 81–85.
13. **Igelspacher J., Herzog H.-G.** *Analytical description of a single-stator axial-flux induction machine with squirrel cage.* – XIX Int. conf. on Electrical Machines (ICEM 2010). Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 6–8 Sept., 2010, pp. 1–6.
14. **Markov A.M.** *Trudy Pskovskogo politekhnicheskogo instituta. Elektrotehnika – in Russ. (Proc. of the Pskov Polytechnical Institute. Power Engineering)*, 2011, No. 15.3, pp. 319–322.
15. **Stavinskii A.A.** *Sudostroyeniye – in Russ. (Shipbuilding)*, 2011, No. 6, pp. 35–38.
16. **Ignatov V.A., Stavinskii A.A., Zabora I.G.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 1983, No. 8, pp. 27–30.
17. **Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 9, pp. 34–43.
18. **Stavinskii A.A., Avdeyeva Ye.A., Pal'chikov O.O., Stavinskii R.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 4, p. .
19. **Konokhov N.N.** *Elektrotehnika i elektromekhanika – in Ukrainian (Power Engineering and Electromechanics)*, 2007, No. 3, pp. 36–38.
20. **Varenik Ye.A., Kaika V.V., Krasnikov G.V., Shvetsova T.V., Anikanov A.I.** *Rynok elektrotehniki, zhurnal-spravochnik – in Russ. (Electrotechnics market: journal-directory)*, 2010, No. 1(17), pp. 68–70.
21. **Ivanov-Smolenskii A.V., Kopylov I.P., Lopukhina Ye.M.** *Elektropanorama – in Russ. (Electropanorama)*, 2001, No.1, pp. 14–15.
22. **Muravleva O.O.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2007, No. 6, pp. 50–52.
23. **Glovatskii A.V., Kubarev L.P., Makarov L.N.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2008, No. 4, pp. 2–8.
24. **Stavinskii A.A., Pal'chikov O.O.** *Elektrotehnika i elektromekhanika – in Ukrainian (Power Engineering and Electromechanics)*, 2014, No. 5, pp. 37–44.
25. **Stavinskii A.A., Pal'chikov O.O.** *Elektrotehnika i elektromekhanika – in Ukrainian (Power Engineering and Electromechanics)*, 2015, No. 1, pp. 41–45.
26. **Stavinskii A.A., Pal'chikov O.O.** *Elektrotehnika i elektromekhanika – in Ukrainian (Power Engineering and Electromechanics)*, 2015, No. 3, pp. 20–26.
27. **Stavinskii A.A., Pal'chikov O.O.** *Elektrotehnika i elektromekhanika – in Ukrainian (Power Engineering and Electromechanics)*, 2015, No. 5, pp. 31–35.