

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Конохов Н.Н., к.т.н., доц.

Донецкий институт железнодорожного транспорта Украинской национальной железнодорожной академии, Украина, 83018, Донецк, ул. Горная 6, ДонИЖТ, каф. "ЕСЕ"
тел. (062) 319-01-46, 319-08-30. E-mail: eltechdrti@yandex.ru

На основании теории охлаждения электрических машин (ЭМ) с позиции общей теории симметрии выполнен анализ эффективности систем охлаждения (СО) и классификация схем вентиляции (СхВ), разработаны принципы проектирования симметричных СхВ ЭМ.

На основі теорії охолодження електричних машин (ЕМ) с позиції загальної теорії симетрії виконан аналіз ефективності систем охолодження (СО) і класифікація схем вентиляцій (СхВ) і розроблені принципи проектування симетричних СхВ ЕМ.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах автора [1, 2, 3, 4] анализировались причины отсутствия заметного прогресса (и даже отдельное ухудшение по сравнению с базовой серией ВАО2* [2, 5]) масса-габаритных показателей новых украинских и российских серий взрывозащищенных АД типа ВАО 4, 1ВАО, ВАД, ВАО 5К, ВАО 5П, ВАО 7.

С одной стороны это связано с принятием отечественными КБ и заводами западной концепции "длинных" электродвигателей [1, 2], принципиальный недостаток которых-асимметричная аксиальная СО, особенно заметно проявляющийся при сварной технологии изготовления длинных оребренных корпусов, более доступной отечественным заводам по сравнению с технологией длинных литых густоребрённых станин у западноевропейских фирм.

С другой стороны, как отмечалось в [4], это связано с тем, что к концу XX столетия из конструкции ЭМ было "выжато" почти всё. Поэтому последние работы [3, 4] автор посвятил обоснованию концептуального значения теории симметрии для дальнейшего развития (усовершенствования) конструкции крупных ЭМ (КЭМ).

При этом доказывалось, что для КЭМ определяющим в развитии конструкции является совершенство СО с позиции теории симметрии, а сама СО для формирования новой конструкции и дизайна ЭМ выступает как "скелетообразующая" подсистема.

ОБЗОР И АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Обзор публикаций по конструированию и тепло-вентиляционным расчётам ЭМ показывает, что понятие о симметрии ЭМ и их СО встречается ещё в ранних работах Алексева А.Е., Сергеева П.С., Виноградова Н.В. и др.

Например, в [6] на стр. 286 представлена (рис. 1) схема радиальной вентиляции синхронного компенсатора, на которой изображена поперечная ось симметрии, в теории симметрии [7] обозначаемая как плоскость зеркальной симметрии m (от англ. mirror - зеркало).

В современном учебнике [8] на стр. 48 поперечная плоскость зеркальной симметрии m на схеме вентиляции не показана, но зато в подписи к рисунку указано на симметричность СО присутствует (рис. 2).

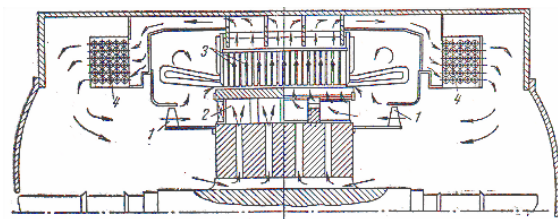


Рис. 1. Схема радиальной самовентиляции по замкнутому циклу синхронного компенсатора из [6]



Рис. 2. Схема двухсторонней (?) симметричной (!) радиальной вентиляции машины из [8]

В статье 80-х годов новосибирских авторов [9] система вентиляции АД серий АД и АД-2 мощностью до 6300 кВт определена как "симметричная аксиальная (?) система вентиляции" (хотя в действительности система является аксиально-радиальной, т.к. содержит центральный радиальный канал, благодаря чему и является симметричной). В этой же статье авторы уже употребляют и термин "плоскость симметрии" (!) (хотя на схеме вентиляции она тоже представлена не правильно – не на своем месте).

Из обзора даже этих нескольких источников можно видеть, что представление о симметрии ЭМ и их СО носит интуитивный характер и строго не согласуется с теорией симметрии [7]. К этому, тем не менее, нужно добавить, что практика упрощенного тепло-вентиляционного расчета симметричных ЭМ, сводящаяся к расчету 1/2 ее части [9-11], является логическим следствием конструктивного совершенства ЭМ с симметричной СО и может быть выделена в качестве одного из принципов проектирования симметричных СО.

Физически эффективность симметричных СО выражается в выравнивании тепловых перекосов, свойственных асимметричным СО, и использовании этого теплового резерва для повышения удельной мощности ЭМ. Этот резерв заложен и в формуле расчета допустимого превышения температуры обмотки $T_{доп}$ над температурой окружающей среды $T_{о.с}$ [11]:

$$\Delta T_{доп} = T_{пред} - T_{о.с} - \Delta T_{зап}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{зап}$ – запас на неравномерность нагрева активных частей ЭМ.

* Общесоюзная серия взрывозащищенных АД мощностью от 200 до 2000 кВт ВАО 2 была разработана институтом ВНИИВЭ в 80-е годы и освоена на ряде заводов крупного электромашиностроения Минэлектротехпрома.

На рис. 3 представлены сравнительные расчетные графики температур обмотки статора для радиальной и аксиальной СО по Шуйскому [12], а на рис. 4 представлено экспериментальное распределение перегрева обмотки якоря тягового двигателя [13]. Такая неравномерность нагрева якорной обмотки свойственна всем тяговым двигателям с аксиальной СО и достигает, например, по данным [14] $45^{\circ}\text{--}60^{\circ}\text{K}$ (!).

СУЖЕНИЕ ОБЪЕМА РАССМАТРИВАЕМЫХ СО ЭМ

Наличие коллекторного узла у машин постоянного тока (МПТ) заведомо обуславливает генетическую асимметрию СО этих ЭМ (рис. 5) и их конструктивное несовершенство по отношению к машинам переменного тока. Поэтому МПТ в дальнейшем не рассматриваются, а анализируются **ЭМ переменного тока**, и в первую очередь асинхронные – как самые распространенные и надежные.

Так же большинство современных ЭМ охлаждаются воздухом и поэтому в дальнейшем рассматривается лишь **воздушное охлаждение**. Сравнение воздуха с другими хладагентами приводится в таблице 1. С учетом всех технико-экономических показателей и условий техники безопасности воздух, как хладагент, уступает только чистой воде, непосредственно омывающей нагретые части машины [15].

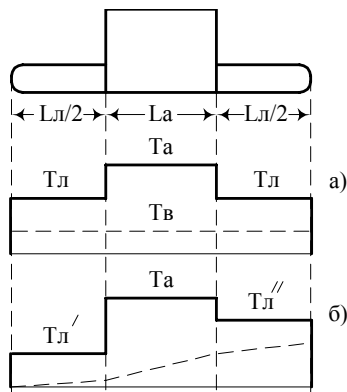


Рис. 3. Средние температуры обмотки и воздуха: а - при радиальной вентиляции, б - при аксиальной вентиляции из [12]

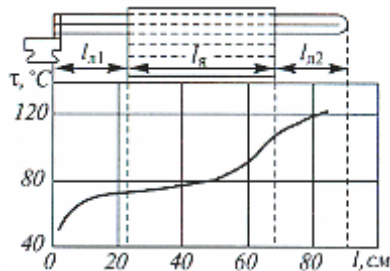


Рис. 4. Распределение перегрева обмотки якоря тягового двигателя НБ-412М из [13]

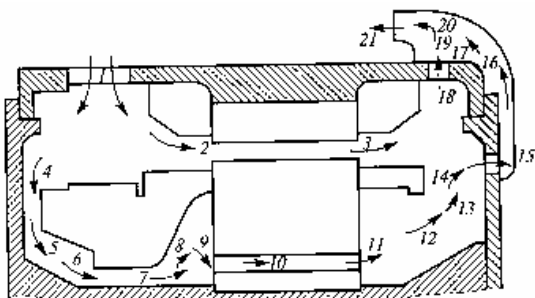


Рис. 5. Вентиляционная схема тягового двигателя

Таблица 1
(при нормальном давлении 101,3 Па)

Хлад-агент	Т-ра, °С	Плотность, кг/м ³	Уд. теплоемкость при постоянном давлении, кВт·с/кг·К	Объемная теплоемкость, кВт·с/м ³ ·К
Водород	20	0,084	14,31	1,20
	40	0,078	14,37	1,13
	60	0,074	14,41	1,08
Азот	20	1,165	1,04	1,21
	40	1,091	1,04	1,14
	60	1,025	1,04	1,07
Воздух (сухой)	20	1,205	1,01	1,21
	40	1,128	1,01	1,14
	60	1,060	1,01	1,07
Вода	20	998	4,18	4170
	40	992	4,18	4140
	60	983	4,18	4110

ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭМ

Классификацию охлаждения ЭМ по видам, способам и системам, приведенную в [14], для наглядности можно представить схематическим образом – рис. 3.

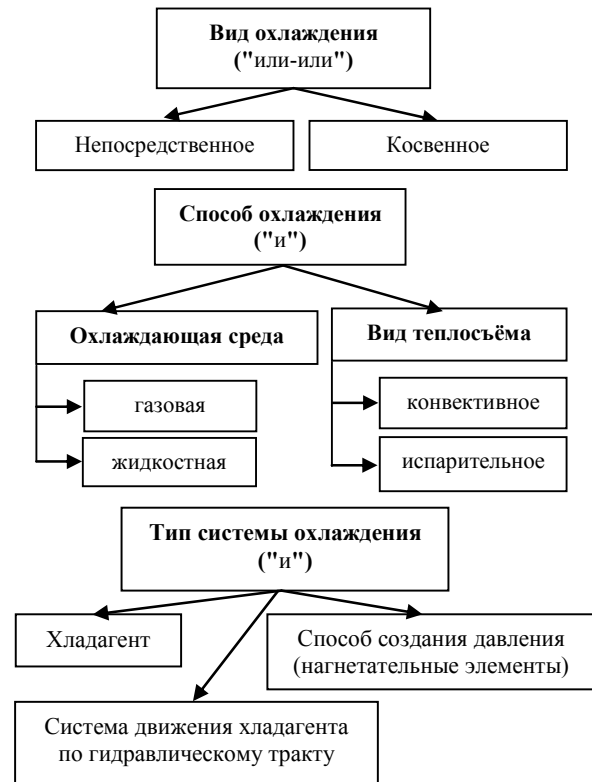


Рис. 3. Классификация охлаждения ЭМ по видам, способам и системам

Система охлаждения (СО) – совокупность способа охлаждения (газовое, воздушное, водяное, испарительно-конденсационное, жидкостно-заполненное) и схемы охлаждения.

Схема охлаждения (СхО) – схемное представление гидравлического тракта, источников аэродинамического давления и направлений движений хладагента.

Схема вентиляции (СхВ) – схема охлаждения, в которой циркуляция газообразного хладагента осуществляется напорными элементами: вентиляторами и крыльчатками.

Схема вентиляции, применяемая для анализа её симметрии (СхВ_с) – схема вентиляции, на которой

изображены все элементы симметрии (точки, линии и плоскости). При этом источники аэродинамического давления по логике анализа целесообразно не представлять (табл. 1), предполагая, что они так расположены и имеют такие напорные характеристики, при которых обеспечивается одинаковый расход и направление движения хладагента по симметричным каналам.

* **Аксиальная схема вентиляции, применяемая для анализа ее симметрии** ($SxV_{(A)}$) – схема вентиляции, при которой в активных частях ЭМ имеются только аксиальные вентиляционные каналы.

* **Аксиально-радиальная схема вентиляции, применяемая для анализа ее симметрии** ($SxV_{(AR)}$) – схема вентиляции, при которой в активных частях ЭМ имеются и аксиальные, и радиальные вентиляционные каналы.

Радиальная схема вентиляции, применяемая для анализа ее симметрии ($SxV_{(R)}$) – схема вентиляции, при которой в активных частях ЭМ имеются только радиальные вентиляционные каналы.

ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ СИММЕТРИИ

Из всех понятий теории симметрии [8, 16, 17] основополагающим является понятие **относительного равенства предметов**. Два предмета называются равными в отношении того или иного признака, если оба предмета обладают этими признаками.

Относительное равенство – это равенство в отношении данного признака.

Симметрия представляет собой особый вид геометрической закономерности.

Симметричный предмет – это предмет, состоящий из геометрически и физически равных частей, определенным образом расположенных друг относительно друга.

Геометрическое равенство в этом случае – это либо **совместимое равенство** (конгруэнтность), либо **зеркальное равенство** (инверсия).

Симметрическое преобразование** – это совмещение с помощью зеркального отражения и других способов совмещения плоских или пространственных фигур.

Симметричной фигурой называется всякая фигура, которая может совмещаться сама с собой в результате одного или нескольких последовательно произведенных симметрических преобразований.

Симметрия геометрических фигур есть их свойство содержать в себе равные и однообразно расположенные части.

Элементы симметрии – вспомогательные геометрические элементы (точки, линии, плоскости), с помощью которых осуществляются симметрические преобразования.

Плоскость симметрии (обозначение "m") – воображаемая плоскость, которая делит фигуру на две зеркально равные половины.

Ось симметрии (обозначение "n") – ось, при полном обороте вокруг которой фигура несколько раз приходит в совмещение сама собой.

Порядок оси симметрии – число совмещений

* Определения даны автором

** Законы преобразования фигур в пространстве должны быть следствием законов симметрии самого пространства [16]

при полном обороте фигуры. Оси симметрии могут быть любого порядка от 1 до ∞ .

Элементарный угол поворота – наименьший угол поворота, при котором фигура совмещается сама с собой. Из пространственных фигур ось симметрии бесконечного порядка могут иметь все тела вращения, в том числе цилиндр, которому соответствует активная часть $D^2 \times L$ ЭМ.

Всякая **машина, в том числе ЭМ**, вращающаяся вокруг определенной оси, по обеим концам которой господствуют разные условия, принимает симметрию n.

Центр симметрии (обозначение "C") – центр, в котором происходит инверсионное отражение фигуры: каждая точка фигуры переносится по прямой через точку "C" на равное расстояние.

Говорят, что фигура имеет центр симметрии C, если фигура совмещается сама с собой инверсией в данной точке.

КОМБИНАЦИИ ОСИ СИММЕТРИИ С ЦЕНТРОМ СИММЕТРИИ И ПЛОСКОСТЯМИ СИММЕТРИИ В ЭМ

Основные комбинации элементов симметрии ЭМ представлены на принципиальных схемах внутренней SxV ЭМ в табл. 2.

Ось симметрии ЭМ "n" – ось вращения ротора ЭМ.

Центр симметрии ЭМ "C" – центр тяжести активной части ЭМ, расположенный на оси симметрии "n"

Продольная плоскость симметрии ЭМ (обозначение* "m_∥") – плоскость зеркальной симметрии, проходящая по оси симметрии "n" ЭМ

Поперечная плоскость симметрии ЭМ (обозначение* "m_⊥") – плоскость зеркальной симметрии, проходящая перпендикулярно оси симметрии "n" через центр тяжести активной части ЭМ.

Вид симметрии ЭМ – полная совокупность всех элементов симметрии ЭМ.

Символы вида симметрии ЭМ – порождающие элементы симметрии ЭМ, записанные с помощью символов симметрии: . (точка) – обозначает параллельность (или совпадение), например: оси "n" и плоскости "m_∥" симметрии; : (двоеточие) – обозначает перпендикулярность плоскости симметрии "m_⊥" к оси симметрии "n"; { } – система, ∩ – пересечение подсистем.

КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ СХЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ПО ВИДАМ СИММЕТРИИ ЭМ

Для первоначального анализа следует рассмотреть отдельно классификацию внутренней схемы $SxV_{(вт)}$, которая представлена в табл. 2, затем классификацию внешней схемы $SxV_{(вн)}$, а затем их системные комбинации $\{SxV_{(вт)} \cap SxV_{(вн)}\}$ в целом для всей СО ЭМ.

Однако здесь ограничимся подробным рассмотрением лишь внутренней $SxV_{(вт)}$ (табл. 2), представляющей большее значение для эффективности всей СО ЭМ.

В отношении же внешней $SxV_{(вн)}$ ограничимся ссылкой на традиционную их классификацию для закрытых ЭМ, приведенную, например, в [18] и на морфологический анализ СО закрытых ЭМ в работе автора [2].

При этом нужно отметить, что если во внутренней $SxV_{(вт)}$ традиционные и новые симметричные решения достаточно известны в зарубежных (SCHORCH, JEUMONT-SCHNEIDER, Mitsubishi Denki [19, 20] и отечественных ("Украина", BAO2, 2АТД, [21, 22]) разработках, то **симметричные ре-**

шения во внешней СхВ_(вн) разработаны недостаточно и встречаются чрезвычайно редко. Поэтому, как было показано в морфологической таблице [2] ещё имеются незаполненные ячейки этой таблицы, которые могут представлять новые технические решения на уровне изобретений, не только по внутреннему, но и по внешнему вентиляционному тракту.

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭМ

На основании проведенного анализа СО с позиций теории симметрии и опыта разработки симметричных СО можно сформулировать "Принципы проектирования симметричных систем охлаждения ЭМ" – табл. 3. Использование этих принципов должно послужить проектировщикам методологическим инструментом при совершенствовании СО ЭМ.

Таблица 2

Классификация внутренних схем вентиляции эм по видам симметрии

Схема вентиляции	Условное обозначение с учетом симметрии	Принципиальная схема внутренней вентиляции активной части (D-L) ЭМ	Символ вида симметрии	Характеристика симметрии схемы
Аксиальная (А)	A(n)		m·n	Схема имеет поворотную ось симметрии порядка "n" и совпадающую с ней (параллельную) плоскость зеркальной симметрии "m="
	A(c)		m·n·C	То же самое, что в A(n) плюс центр симметрии "C"
Аксиально-радиальная (AR)	встречная $AR_{(m_{\perp})}^{bc}$		m·n:m_{\perp}	То же самое, что в A(n) плюс поперечная плоскость зеркальной симметрии "m_{\perp}". Движение х/а встречное вентиляционному действию центрального радиального канала.
	согласная $AR_{(m_{\perp})}^{cr}$		m·n:m_{\perp}	То же самое, что в $AR_{(m_{\perp})}^{bc}$, но движение х/а согласное с вентиляционным действием радиальных каналов.
Радиальная (R)	$R_{(m_{\perp})}^{cr}$		m_{\perp}·\infty:m_{\perp}	То же самое, что $AR_{(m_{\perp})}^{cr}$, но аксиальные каналы в сердечнике отсутствуют, а хладгент в радиальные каналы поступает через аксиальные каналы вала.

* обозначение "m=" и "m_{\perp}" введены автором для отличия продольной и поперечной зеркальных осей при обозначении ими на схемах соответствующих плоскостей симметрии.

№ п/п	Принципы проектирования	Критерии повышения эффективности охлаждения * ЭМ
1.	Увеличение элементов симметрии повышает вид симметрии СО повышает эффективность охлаждения ЭМ	Снижаются тепловые перекосы по длине и по периметру активных частей ЭМ. Повышается коэффициент равномерности нагрева $K_{к.н.} = T_{ср.} / T_{max}$ и коэффициент экономичности охлаждения $K_{э.э} = P_a / (P_a - P_{охл.})$
2.	Предпочтительны СО с более высоким уровнем (видом) симметрии: радиальные (символ вида симметрии $\infty\text{-}m\text{-} : m\text{-}$) и аксиально-радиальные (символ вида симметрии $n\text{-}m\text{-} : m\text{-}$), которые имеют лучшие возможности для повышения эффективности охлаждения	То же, что в п. 1, но так же увеличивается поверхность охлаждения активных частей S_a и коэффициенты качества конструкции СО $K_{к.н.}$ и $K_{к.п.} = S_{охл.} / S_a$
3.	Для уменьшения дисимметрии в аксиальных $C_{,B}$ нужно применять схему $A_{(c)}$ с центральной симметрией, (символ вида симметрии $m\text{-}n\text{-}C$)	То же, что в п. 1, но при этом нужно оценить некоторую тангенциальную неравномерность охлаждения по периметру активных частей в торцевых частях
4.	Вентиляционные расчеты ЭМ с симметричным СО нужно выполнять с соответствующими упрощениями, например, при наличии зеркальной плоскости симметрии "m-l" расчет ведут на 1/2 часть ЭМ.	В упрощении вентиляционного расчета симметричных СО отражается их геометрические особенности и их совершенство по сравнению с асимметричными СО.
5.	При разработки СО закрытых ЭМ необходимо отдельно анализировать варианты симметричных систем внутреннего $CxV_{(BT)}$ и внешнего $CxV_{(BШ)}$ вентиляционных трактов, а за тем синтезировать их системные комбинации $\{CxV_{(BT)} \cap CxV_{(BШ)}\}$ в целом для всей СО ЭМ.	Достижение симметрической согласованности внутренней и внешней подсистемы и позволяет минимизировать теплоперепады между внутренним и внешним контурами воздушного охлаждения ЭМ.

Примечание: *Коэффициенты эффективности охлаждения ЭМ и обозначение входящих в них параметров принято в соответствии с [14].

ВЫВОДЫ

1. Общая теория симметрии применительно к СО ЭМ позволяет научно проанализировать и обосновать принципы их конструктивного совершенства.

2. Физически совершенство СО выражается в уменьшении тепловых перекосов, многовариантности технических решений повышения эффективности охлаждения активных частей при симметричных СО, и повышении за счет этого теплового использования ЭМ.

3. Классификация и анализ $CxV_{()}$ на основании теории симметрии позволяют сформулировать "Принципы проектирования симметричных $CxV_{()}$ ЭМ", что в свою очередь дает методологическую возможность дальнейшего совершенствования конструкции ЭМ и повышения важнейших их технических характеристик (снижение масса-габаритных показателей и повышение КПД).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Конохов Н.Н. О отечественной концепции развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей типа ВАО2. // Труды симпозиума "ЭЛМАШ-2004", МА. "Интерэлектромаш", Москва, октябрь 2004-177, т.2, С.21-26.
- [2] Конохов Н.Н. Анализ концепций развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей // Электротехника и электромеханика. -2005. -№1- С. 47-50.
- [3] Конохов Н.Н. Принцип симметрии - как концепция развития конструкции электрических машин // Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования. Труды международного симпозиума "ЭЛМАШ-2006", МА "Интерэлектромаш", октябрь 2006, Москва, 2006г. -140 в 2-х т.т., Т.2 С. 128-134.
- [4] Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин // Электротехника и электромеханика. - 2007. -№3 - С. 36-38.
- [5] Акульшина Л.И. Исследование параметров высоковольтных асинхронных двигателей с радиальной и аксиальной системами вентиляции // Сб. науч. трудов УкрНИИВЭ г. Донецк: 2007.- С. 194 -199.
- [6] Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1970.- 632 с.
- [7] Шубников А.В., Копчик В.А. Симметрия в науке и искусстве. - М.: Наука, 1972. - 340 с.
- [8] Переходные процессы в электрических машинах и

- [9] аппаратах и вопросы их проектирования // Гольдберг О.Д. и др. - М.: Высш. школа, 2001 - 512 с.
- [9] Рязанов В.Г., Генендер И.С. Программа теплового расчета на ЭВМ асинхронного двигателя с аксиальной вентиляцией // Электрические машины переменного тока, Сб. трудов ЦПКТБ КЭМ - Л.: Энергия, 1973. - С. 192-198.
- [10] Радин В.И., Черченков В.В. Вентиляционные и тепловые расчеты асинхронных короткозамкнутых двигателей с пакетированными сердечниками // Электротехника. - 1968.- № 2. - С. 30-33.
- [11] Шпайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. - М.: Высшая шк., 1989 - 239 с.
- [12] Шуйский В.П. Расчет электрических машин. Л.: Энергия, 1968 - 731 с.
- [13] Безрученко В.М., Варченко В.К., Чумак В.В., Тягові електричні машини електрорухомого складу. Дніпропетровськ, Дніпропетровський нац. унів. залізничного транспорту, 2003 - 247 с.
- [14] Борисенко А.И., Костиков О.И., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. - М.: Энергоатомиздат, 1983 - 297 с.
- [15] Влияние потока хладагента на уровень нагрева электрических машин. Liebe Wolfgang. Einhalten der Temperaturgenze elektrischen Maschinen und Einfluß des Kühlstroms. "Maschinenmarkt" 1978, 84, № 35, 704-707 (нем.).
- [16] Желудев И.С. Физика кристаллов и симметрия. -М.: Наука, 1987. - 192 с.
- [17] Повилейко Р.П. Симметрия в технике // Принцип симметрии. - М.: Наука, 1978. - С. 335 -351
- [18] Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б., Коробов В.К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрыво неопасного исполнения. -М.: Энергия, 1970 - 184 с.
- [19] Заявка ФРГ № 3242018 МКИ НО2К 3/46, 1981 г.
- [20] Патент США № 4442371, МКИ НО2К 3/46, 1984 г.
- [21] Авт. св. СССР № 851656. Электрические машины // Збарский Л.А., Конохов Н.Н. и др., БИ № 48, 30.12.80.
- [22] Патент РФ № 1725322. Электрическая машина // Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Ширнин И.Г., Бурковский А.Н., 1993 г.

Поступила 10.10.2007