

## СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЦИП СИММЕТРИИ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Конохов Н.Н., к.т.н., доц.

Донецкий институт железнодорожного транспорта

Украина, 83018, Донецк, ул. Горная 6, ДонИЖТ, каф. "ЕСЕ"

тел. (062) 319-01-466 319-08-30, e-mail: eltechdrti@yandex.ru

*Розглянута історія теорії систем і теорії симетрії та їх застосування до аналізу окремих вузлів і елементів електричних машин (ЕМ). Із загальної позиції теорії систем та теорії симетрії розглянуті проблеми удосконалення конструкції ЕМ. Аналізуються переваги розвитку конструкції ЕМ з радіально-аксіальною системою охолодження (символ симетрії n:t) перед ЕМ з аксіальною системою охолодження (символ симетрії t).*

*Рассмотрена история теории систем и теории симметрии и их применения для анализа отдельных элементов и узлов электрических машин (ЭМ). С общей позиции теории систем и теории симметрии рассмотрены проблемы совершенствования конструкции ЭМ. Анализируются преимущества развития конструкции ЭМ с радиально-аксиальной системой охлаждения (символ симметрии n:t) перед ЭМ с аксиальной системой охлаждения (символ симметрии t).*

### ВВЕДЕНИЕ

Теория систем и теория симметрии имеют каждая свою историю и относительно недавно стали применяться для анализа технических систем.

Понятия "система" и "системный анализ" в научные исследования ввели философы, биологи и психологи: в 30-е годы XX века философия явилась источником возникновения общественного направления, названного теорией систем [1]. Уже в 60-е годы появился термин "системотехника" (Темников Ф.Е.) для технических направлений. Для других направлений стали использовать термин "системология" (Новиков И.Б.), а для задач управления – термин "кибернетика". В последние годы можно отметить появление даже специальных учебников по "Теории технических систем" [2].

Разработка же теории симметрии и осознание методологической значимости принципа симметрии имеет более давнюю историю [3]. Еще в конце XIX века П. Кюри писал о "симметрии электрического и магнитного полей", переосмысливая классическое понятие, переводя его с философского уровня на методологический. В 1907 году в лекциях проф. Вульфа Г.В., изданных в России отдельной книжкой "Симметрия и ее проявления в природе", отмечается общность законов симметрии в мире живых организмов и в неорганической природе.

Академик В.И. Вернадский в 20-х годах в серии своих работ развивает идеи о широком научном значении принципа симметрии, оценивая симметрию как "основной принцип понимания сущего". В 1939 году ученик Вульфа академик А.В. Шубников публикует статью "Правило Ампера и симметрия мира", где отстаивает общий характер симметрии физических явлений, а затем совместно с профессором В.А. Копчиком во втором издании своей книги "Симметрия" обобщает достижения в области учения о симметрии [4].

В 70-90 годах уже появляются отдельные работы, посвященные симметрии в технике и технологии [5-7]. Например, в [6] проблема симметрии обсуждается как предпосылка к созданию теории художественного конструирования в технике и машиностроении. Отмечается, что "В технике (в конструировании) симметрия означает такой принцип организации элементов композиции, когда их взаимное расположение дает возможность говорить о присутствии оси симметрии, плоскости симметрии или других признаков симметрии".

В предисловии к [4] заключается, что "Симмет-

рия, рассматриваемая как закон строения структурных объектов, сродни гармонии. В способности ощущать ее там, где другие ее не чувствуют, и состоит, по нашему мнению, вся эстетика научного и художественного творчества".

Таким образом, несмотря на разный возраст теории систем и теория симметрии начали применяться для анализа технических систем примерно в одно время: в 70е - 80е годы XX столетия, а для теоретических исследований ЭМ они начали применяться еще позже и раздельно. Например, при разработки и создании в 90-е годы единой международной серии асинхронных двигателей (АД) стран СЭВ "Интер-электро" уже применялся системный анализ [8]. Причем, при разработке уникальной серии системный анализ применяли как для типично большой системы, включающей в себя проектирование, прогнозирование и планирование.

В качестве примера применения теории симметрии для анализа подсистемы ЭМ (электрических обмоток) можно привести ряд работ профессора Дегтева В.Г. [9, 10, 11 и др.].

### ЦЕЛЬ ПУБЛИКАЦИИ

В данной работе автор делает, как ему кажется, первую попытку обобщить на основании системного анализа опыт применения принципа симметрии к анализу конструкции наиболее распространенных ЭМ, какими являются АД.

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИММЕТРИИ К АНАЛИЗУ КОНСТРУКЦИИ ЭМ

Системный анализ, как метод поиска путей развития технических систем, представляет значительный конструкторский интерес, т.к. по определению в [12] "Системный анализ – есть прикладная диалектика", превращение проблемы в проблематику.

Если рассматривать ЭМ как структурный объект, систему, состоящую из разнородных элементов [1], то такую систему можно представить.

$$S_{ЭМ} \equiv \langle \mathcal{E}, И, М, К, ТВ, R, Z \rangle, \quad (1)$$

где  $S_{ЭМ}$  – система (электромеханическая) ЭМ;  $\mathcal{E}, И, М, К, ТВ$  – электрические, изоляционные, магнитные, конструктивные, тепловентиляционные элементы типа  $A = \{a_i\}$ ;  $R = \{r_i\}$  – связи между элементами системы;  $Z$  – цель.

Модель системы АД (1), необходимая для дальнейшего анализа, представлена на рис. 1.

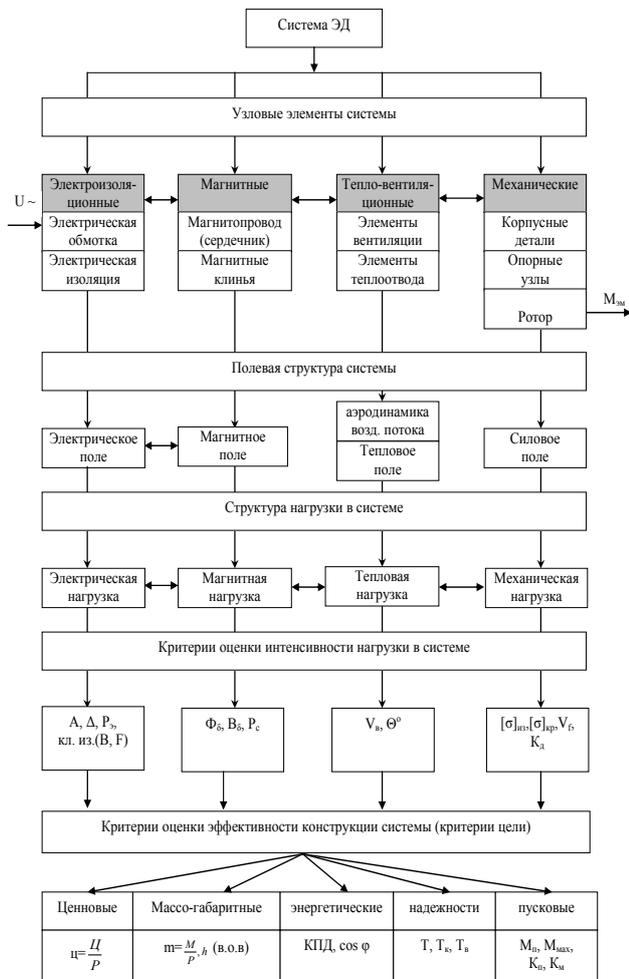


Рис. 1. Модель системы асинхронного двигателя

Рассмотрим возможности применения теории симметрии к анализу конструкции узловых элементов системы ЭД в соответствии с этим рисунком.

Как уже отмечалось достаточно разработанной является теория симметрии для подсистемы ЭМ – электрических обмоток. Применение проф. Дегтевым В.Г. аналитического аппарата классической теории симметрии позволило ему не только дать теоретическое толкование, адекватное понятию "симметрия многофазной обмотки", но и производить научно обоснованный анализ и синтез обмоток ЭМ. К недостатку публикаций [9, 10, 11] следует отнести отсутствие примеров применения теоретических исследований для совершенствования обмоток конкретных типов ЭМ и новых их разработок.

В отношении подсистемы магнитных элементов – магнитопроводов теория симметрии могла бы, например, дать объяснение рекомендациям по выбору соотношения числа пазов статора и ротора  $Z_1/Z_2$ , которые до сих пор не имеют теоретического обоснования, а были получены подбором лучших соотношений опытным путем. Также преимущества применения магнитных клиньев более полно могут быть объяснены с позиции теории симметрии.

В отношении конструктивных элементов имеются отдельные указания в плане общего машиностроения, например [6], на то, что конструкция, обладающая весовой и геометрической симметрией, имеет суженный спектр частот собственных колебаний. Поэтому рассмотрение и анализ вопросов вибрации и механического и аэродинамического шума ЭМ с при-

менением теории симметрии может дать новые подходы к решению этих проблем. В качестве сравнительного примера разрешения технических противоречий при создании аксиально-упругих подшипниковых узлов для ЭМ [13] можно привести дисимметричную (символ симметрии  $n$ ) конструкцию прототипа [14] и симметричную (символ симметрии  $n : m$ ) конструкцию изобретения по патентам РФ [15], разработанных для снижения виброактивности и динамических нагрузок в подшипниковых узлах АД серии ВА02 мощностью свыше 500 кВт.

### КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРИНЦИПА СИММЕТРИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИИ АД

Практический интерес представляет применение принципа симметрии к анализу тепло-вентиляционной подсистемы АД – системе охлаждения (СО), т.к. конструктивные и технологические резервы развития АД к концу XX столетия практически были исчерпаны.

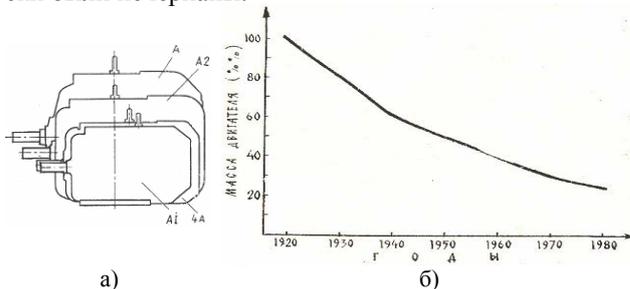


Рис. 2. Сравнительные габариты АД разных серий (а) и график уменьшения их массы по годам (б) [8]

Как было показано в работах [16, 17] для средних и крупных закрытых (взрывозащищенных) АД именно системное решение СО определяет "конструктивный скелет" всего электродвигателя.

Классическим является примерно пропорциональное снижение массы и габарита АД при их очередном совершенствовании (рис. 2). Обратимся к последним достижениям западных фирм, т.н. евродвигателям, под которые создана прогрессивная шкала МЭК: эти двигатели имеют более низкую высоту оси вращения (в.о.в.) в сравнении с аналогичными отечественными взрывозащищенными (закрытыми) АД серии ВА02, ВА04, 1ВА0, ВАД, ВА05К, ВА05П, ДА304 и др. (рис. 3).

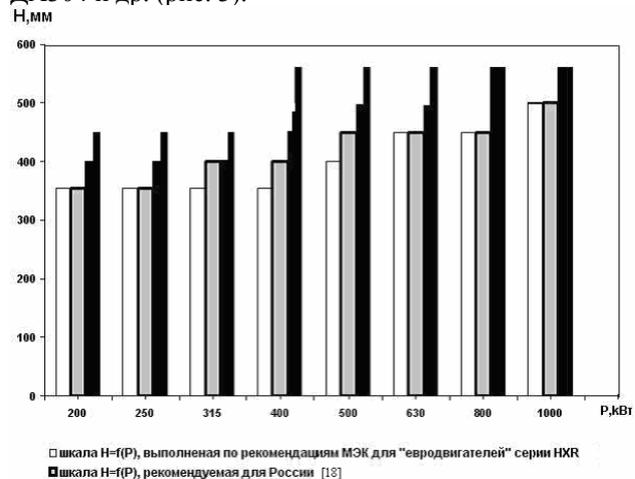


Рис. 3. Шкала высоты оси вращения  $h = f(P)$  для закрытых В/В АЭД (исп. IP44) при  $2p=4$  в диапазоне мощностей 200-1000 кВт

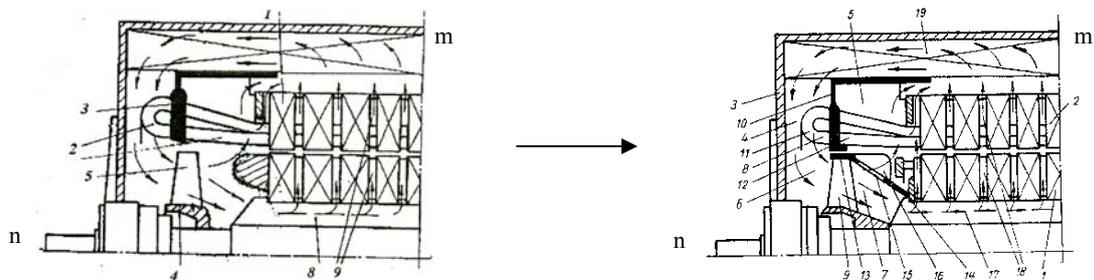


Рис. 4. Предлагаемое решение (одно из нововведений) развития симметричной конструкции от серии ВА02 к серии ВА05 [20]

Однако такое сравнение (а, следовательно, и преимущество) евродвигателей не является корректным, потому, что снижение в.о.в. ( $h$ ) достигнуто не пропорционально со снижением удельной массы  $m$  (см. рис. 1, масса - габаритные критерии  $m$  и  $h$ ), а искусственным удлинением ("растягиванием") ЭД т.е. путем изменения пропорций между длиной и высотой АД. Вопрос о соотношении главных размеров  $L/D$  и пропорциях ЭД следует рассмотреть отдельно с учётом общей теории пропорций [19]. В работах [16, 17] было показано, что чем в большей степени удлиняется двигатель по сравнению с классическим отношением  $L/D$ , тем больше дисимметрия СО, больше перекокс температуры по длине обмотки статора и, следовательно, больше проигрыш в эффективности охлаждения ЭМ. С позиции теории симметрии "длинные" двигатели требуют аксиальной СО (символ симметрии  $n$ ) и продольного обтекания труб и каналов охлаждения, а классические ЭМ могут развиваться по более симметричной аксиально-радиальной СО (символ симметрии  $n : m$ ), сохраняющей преимущества поперечного, радиального обтекания труб и каналов охлаждения. Больше того, сохраняя поперечную плоскость зеркальной симметрии  $m$  (и желательно не только для внутренней, но и для внешней схемы охлаждения) можно создавать новые конструктивные решения СО для средних и крупных АД [17]. Для иллюстрации на рис. 4 показан, например, один из усовершенствованных узлов СО [20], предназначенный для новой серии ВА05[21], - в сравнении с СО АД серии ВА02 [22]. Важно отметить и то, что новые СО, которые могут быть созданы с использованием принципа симметрии, отличаются многовариантностью [16, 17], могут придавать новый патентоспособный внешний вид (дизайн) ЭМ и сериям отечественных АД в целом.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. К концу XX столетия, как отмечалось в [8], из конструкции ЭМ и материалов было "выжато" почти все (см. рис. 2 б).

2. Целый ряд "новых" серий высоковольтных ЭД, созданных в начале XI века (ВА04, 1ВА0, ВАД, ВА05К, ВА05П) практически не имеют преимуществ по массо-габаритным показателям перед ЭД серии ВА02 (созданных в 70-е годы).

3. Поэтому необходимые новые конструктивные решения могут быть найдены с использованием нетрадиционных для ЭМ теорий: теории систем и теории симметрии.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Финаев В.И., Глод О.Д. Основы теории систем: Учебное пособие, Таганрог: издательство ТРТУ, 2000, -68 с.  
 [2] Голубенко А.Л. Петров А.С. Кашура А.Л. Теория технических систем. Учебное пособие. К. из-во "Аристей", 2004.  
 [3] Овчинников Н.Ф. Симметрия – закономерность при-

роды и принцип познания // Принцип симметрии. – М.: Наука, 1978. – С. 4-38.

[4] Шубников А.В., Копчик В.А. Симметрия в науке и искусстве. – М.: Наука, 1972. – 340 с.  
 [5] Повилейко Р.П. Симметрия в технике. Новосибирск, 1974.  
 [6] Повилейко Р.П. Симметрия в технике // Принцип симметрии. – М.: Наука, 1978. – С. 335-351.  
 [7] Дурнев В.Д., Талашкевич И.П. Симметрия в технологии. – СПб.: Политехника, 1993 – 256 с.  
 [8] Радин В. Рождение серии. Наука и техника. 1985, С. 38-44.  
 [9] Дегтев В.Г. Синтез симметричных трехфазных обмоток с заданным уровнем избирательности // Электричество - 1993 - №4. - С. 40-44.  
 [10] Дегтев В.Г. Симметрия и свойства многофазных обмоток // Электротехника і електромеханіка. - 2002.-№1. - С. 23-27.  
 [11] Дегтев В.Г., Шульгин Д.Н. Свойства многофазных обмоток с максимальной симметрией // Электротехника і електромеханіка.- 2005 - №1.- С. 38-40.  
 [12] Перегудов Ф.И. Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. –М.: ВШ, 1989.  
 [13] Конохов Н.Н. Разработка и применение аксиально-упругих подшипниковых узлов в электрических машинах // Труды респ. школы – семинара молодых ученых: Повышение эффективности генерирования, передачи и использования электроэнергии. Алушта, ноябрь 1985-ИЭД АН УССР, Киев. – 1987. С. 2-9  
 [14] Авт. св. СССР № 509949. Устройство для крепления подшипника ротора электрической машины // А.Д. Глушенко, В.Е. Верхогляд, А.Д. Беленький и др., 1976 г.  
 [15] Патент РФ № 792497. Подшипниковый узел электрической машины // Н.Н. Конохов, Е.В. Останкович и др., 1993  
 [16] Конохов Н.Н. Об отечественной концепции развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей типа ВА02.//Труды симпозиума "Элмаш-2004", МА "Интерэлектромаш", Москва, октябрь 2004-177, т.2, С. 21-26.  
 [17] Конохов Н.Н. Анализ концепций развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей // Электротехника і електромеханіка.-2005. -№1- С. 47-50.  
 [18] Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования // Гольдберг О.Д. и др. – М.: Высш. школа, 2001 – 512 с.  
 [19] Повилейко Р. Архитектура машины. – Зап. – Сиб. кн. отд., 1974, -95 с.  
 [20] Обоснование создания новой серии высоковольтных взрывозащищенных электродвигателей ВА05. Технический отчет ПИЖЦ 520058.00, рук. к.т.н. Конохов Н.Н., УкрНИИВЭ, г. Донецк, 1996г. 11 с.  
 [21] Патент РФ №1725322. Электрическая машина // Конохов Н.Н., Збарский Л.А. Бурковский А.Н. Ширшин И.Г., 1993 г.  
 [22] Авт. св. СССР №838922. Электрическая машина // Збарский Л.А., Конохов Н.Н., Макагон В.А. Поршневу Ю.В. Ширшин И.Г., 1981 г.

Поступила 22.09.2006