

## АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИИ КРУПНЫХ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Конохов Н.Н., к.т.н., доц.  
Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДониЖТ)  
Украина, 83018, Донецк, ул. Горная, 6.  
тел/факс (0622)51-23-54, 51-28-31, E-mail: info@drti.donetsk.ua

*Аналізуються і порівнюються дві концепції розвитку потужних вибухозахищених електродвигунів (ВЄД): західно-європейської концепції „довгих” і вітчизняної концепції „симетричних” ВЄД. Доводиться, що для подальшого розвитку конструкції нових серій ВЄД типу ВАО5 треба додержуватися концепції симетричних ВЄД, яка теоретично і практично має перевагу і багатоваріантність конструктивних рішень.*

*Анализируются и сравниваются две концепции развития крупных взрывозащищенных электродвигателей (ВЭД): западноевропейской концепции „длинных” и отечественной концепции „симметричных” ВЭД. Показывается, что для дальнейшего развития конструкции новых серий ВЭД типа ВАО5 нужно ориентироваться на концепцию „симметричных” ВЭД, которая и в теоретическом и в практическом отношении имеет преимущества и многовариантность конструктивных решений.*

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] были рассмотрены перспективы и необходимость создания новых поколений крупных электрических двигателей взрывозащищенного исполнения (КЭДВИ) для топливно-энергетического комплекса (ТЭК) Украины и России в свете фундаментального значения, которое придается угольной и нефтегазовой индустрии в отечественной и мировой энергетике.

Наибольшее распространение и применение в мощном взрывозащищенном электроприводе ВЭД имеют асинхронные высоковольтные (В/В) ВЭД.

Начало серийному производству В/В ВЭД в СССР положили ХЭМЗ, освоивший в 60-е годы двигатели "Украина", и ВНИИВЭ, разработавший серию ВАО мощностью от 200 до 1000 кВт [2]. Благодаря этой разработке началось производство отечественной серии ВАО на заводах крупного электромашиностроения "Электромаш" (г. Тирасполь), ЛПГЗ (г. Лысьва) и "Сибэлектротяжмаш" (г. Новосибирск), а СССР смог отказаться от импорта В/В ВЭД из Германии, Бельгии и Франции.

В 80-е годы бала уже разработана и освоена вторая серия ВАО2, мощностью от 200 до 2000 кВт [3], производителями которой до настоящего времени являются ОАО "Электромаш" (г. Тирасполь) и ОАО "Привод" (г. Лысьва).

### ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ И КОНСТРУКТИВНЫЕ НОВОВВЕДЕНИЯ В СЕРИИ ВАО2

Одним из принципиальных новшеств серии ВАО2, определившим концептуальное преимущество конструкции типа ВАО2, явилась эффективная и компактная схема согласной аксиально-радиальной системы воздушного охлаждения (СВО) [4] (рис. 1), составившая как бы конструктивный скелет ВЭД новой серии. На этом компактном "скелете" были логически построены и новые эффективные технические решения других элементов и механических узлов ВАО2 [5-8 и др.]. В совокупности с новой системой В/В изоляции "Монолит-2" эти нововведения позволили снизить массо-габаритные показатели серии ВАО2 по сравнению с серией ВАО на 15-20% [9].

Привлекательность нововведения [4] вскоре подтвердилась патентной политикой известной японской фирмы Мицубиси Денки, которая годом позже, такую же схему охлаждения запатентовала в ФРГ [10] и в США

[11]. Это, очевидно, заставило ведущие западные электромашиностроительные фирмы искать другую концепцию развития конструкции новых своих серий. Такая концепция, получившая на западе впоследствии название "длинных" электродвигателей, будет рассмотрена и проанализирована ниже.

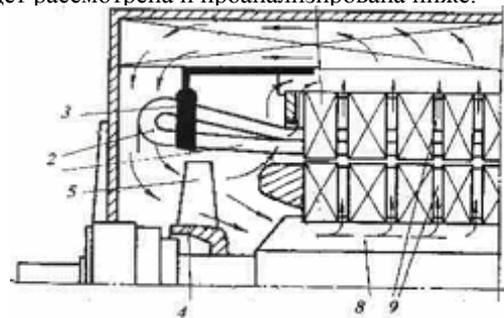


Рис.1 Схема согласной аксиально-радиальной СВО серии ВАО2

Что же касается серии ВАО2, то благодаря эффективной и компактной СВО она и сегодня, спустя более 20 лет, продолжает сохранять лучшие массо-габаритные показатели и удельную материалоемкость.

В подтверждение этому можно также привести тот факт, что "Завод Крупных Электрических Машин" (г. Новая Каховка) уже сейчас, в 2003 году освоил почти без существенных изменений серию ВАО2 для украинского рынка ТЭК [12].

### АНАЛИЗ ЗАПАДНОЙ КОНЦЕПЦИИ "ДЛИННЫХ" ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В конце 80-х годов за рубежом появились теоретические публикации [13], обосновывающие возможные преимущества "длинных" (дословно "колбасообразных") крупных электрических двигателей (КЭД). Теоретический анализ сравнения КЭД с традиционным отношением L/D и с увеличенным выходит за пределы данной статьи. Поэтому здесь лишь укажем, что в [13] упускался из рассмотрения наиболее важный для КЭД вопрос эффективности СВО. Классическая теория электрических машин говорит о том, что с ростом мощности удельные тепловые нагрузки на единицу охлаждающей поверхности растут пропорционально габариту КЭД:

$$P_{\Sigma} / S_{охл} \approx L, \quad (1)$$

где:  $P_{\Sigma}$  - суммарные тепловые потери;  $S_{охл}$  - общая охлаждающая поверхность;  $L$  - линейный размер.

Кроме этого напорные характеристики вентиляторов еще в большей степени, чем охлаждающая поверхность  $S_{охл}$ , зависят от диаметра КЭД:

$$Q \approx D_{н.вен.}^2, \quad (2)$$

где:  $Q$  - производительность вентилятора,  $D_{н.вен.}$  - наружный диаметр вентилятора.

Очевидно, что по обеим этим тепловентиляционным параметрам ( $S_{охл}$  и  $Q$ ) "длинные" КЭД будут уступать классическим КЭД с трубчатым теплообменником (ТТ).

Тем не менее, в конце 90 - х годов ряд западноевропейских фирм сообщили о производстве новых серий крупных ВЭД, выполняемых в литом оребренном корпусе, характерном для указанной концепции развития "длинных" электродвигателей (фирма ASEA - Brown Boveri, серия HXR мощностью до 1400 кВт; фирма Simens, серия "H-compact" мощностью до 1800 кВт; фирма "JEMONT-SCHNEIDER" мощностью до 1000 кВт).

Рассмотрим преимущества и недостатки "длинных" КЭД на примере серии "H-compact" фирмы Simens, как наиболее характерной западноевропейской серии, информация о научно - технических проблемах создания которой представлена в [14].

Некоторые преимущества "длинных" ВЭД:

- исключение ТТ из конструкции В/В ВЭД;
- искусственное уменьшение высоты оси вращения (ВОВ) за счет уменьшения диаметра и удлинения двигателя;
- снижение трудоемкости изготовления литого оребренного корпуса (по сравнению со сварным корпусом с ТТ);
- создание нового образа и дизайна крупных ВЭД типа "H-compact" с уменьшенной ВОВ;
- контроль и удержание европейского рынка крупных ВЭД за счет придания шкале мощностей с уменьшенной ВОВ "длинных" ВЭД статуса евростандарта.

Существенные недостатки "длинных" КЭД:

Для нивелирования принципиального недостатка "длинных" ВЭД - менее эффективной и асимметричной СВО - западноевропейским фирмам пришлось решать сложные научно-технические задачи, требующие дорогостоящих и трудоемких НИОКР:

- снижение тепловых потерь в активных частях (в первую очередь в меди) путём увеличения их объема и применения дорогостоящих марок электротехнической стали;
- разработка технологии литья длинных и густоорбренных чугуновых корпусов;
- дополнительное повышение теплопроводных свойств литых корпусов, шихтованных сердечников и корпусной изоляции MICOLASTIK обмотки статора;
- разработка уникальной технологии литья под давлением крупногабаритных КЗ алюминиевых роторных клеток длинных роторов;
- разработка специальных конструктивных мер, смягчающих неизбежные недостатки асимметричной СВО,

возникающие при применении "длинных" конструкций в КЭД, а именно:

- снижение напора вентиляторов из-за уменьшения их наружного диаметра;
- значительный перекоп температуры обмотки статора по длине при удлинении КЭД;
- отрыв наружного потока, обдувающего корпус, от его оребренной поверхности при удлинении КЭД;
- применение специальных конструктивно-технологических мер с целью повышения точности обработки и сборки всех узлов КЭД, исключаящих недопустимый прогиб вала и затиры в подшипниковых узлах и воздушном зазоре при "длинной" конструкции крупного ВЭД.

## ОБОСНОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ "СИММЕТРИЧНЫХ" ВЭД

Как уже было сказано, структурную основу (конструктивный скелет) серии ВАО2 представляет ее согласная, аксиально-радиальная СВО, выполнена по новой компактной схеме [4], принципиально требующей симметричного геометрического решения.

Известно, что в процессе развития (усложнения) электромеханической структуры количество дисимметрирующих факторов существенно возрастает [15]. В то же время "принцип симметрии должен быть основой любой теоретической системы, если эта система претендует на звание научной теории" [16]. Исходя из этого, теоретически следует стремиться к сохранению принципа симметричности в СВО - основополагающей подсистеме всех крупных электрических машин и ВЭД. Этот принцип хорошо согласуется и с рекомендациями по оптимизации электромагнитной системы ВЭД [17], сделанными на основании известной зависимости:

$$m = \frac{30 \cdot K_D^2 \cdot K_K \cdot \gamma_{cp}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot n_1 \cdot A_2 \cdot B_m}, \quad (3)$$

где:  $m$  - удельная масса ВЭД;  $\gamma_{cp}$  - средняя плотность объема активных материалов;  $n_1 = 60f_i/p$ ;  $K_D$  - отношение  $D_a/D_\delta$ ;  $K_K$  - конструктивный коэффициент;  $A_2$  - линейная нагрузка;  $B_m$  - индукция в зазоре.

Из (3) видно, что из всех параметров  $K_D$  имеет наибольшее влияние на изменение  $m$ , т.к. входит в это уравнение в квадрате. Влияние отношения  $D_a/D_\delta$  на степень совершенства машины во всех предыдущих сериях ВАО2 - ВАО4 не учитывалось и поэтому при проектировании серии ВАО5 на это следует обратить особое внимание, как на резерв снижения удельной материалоемкости  $m$ , согласующийся с развитием концепции "симметричных" ВЭД. При определенном объеме активной части  $D_a^2 L$  очевидно, что для уменьшения  $m$  следует стремиться к возможно-му увеличению диаметра расточки статора  $D_\delta$ .

Снижение же материалоемкости активных материалов в отечественном производстве имеет наибольший вклад в себестоимость ВЭД (табл. 1).

Таблица 1

Примерный вклад стоимости разных материалов* в общую себестоимость** материалов, применяемых в отечественных ЭД типа ВАО2-560-4							
Р, кВт	Изоляция в/в	Медь	Эл.тех. сталь	Трубы ТТ	Конструкционная сталь	Комплектующие изделия	Прочее
800-1600	15-17%	25-27%	30-37%	8%	7-8%	5-8%	5-7%

Примечания: \* - без учета отходов; \*\* - с учетом накладных затрат.

**Системный анализ концепции развития схем воздушного охлаждения (СВО) асинхронных КЭМ**

Схема внешней вентиляции		?		?		
Конструкция корпуса	Литой					
	Сварной					
Условное обозначение внешней вентиляционной системы	P	$P + \frac{T}{P}$	P+T	$P + \frac{T}{TT}$	TT	A+R
Условное обозначение внутренней вентиляционной системы		A	A;A+R	A+R	A+R	A+R
Подсистемы (схемы) внутренней вентиляции						

Условные обозначения: P – ребро; T – труба; TT – трубчатый теплообменник; A – аксиальная СВО; R – радиальная СВО

Прогрессивность "симметричной" концепции для асинхронных ВЭД обоснована автором также путем системного анализа трех принципиальных СВО на разных уровнях их подсистем (табл. 2). Ценность этой таблицы состоит еще и в том, что она является не только теоретическим обоснованием прогрессивности "симметричных" ВЭД, но позволяет указать новые (т.н. промежуточные) схемные решения СВО, которые представляют интерес и для средних, низковольтных ВЭД.

Подобный анализ этих вопросов выходит за пределы объема данной статьи. Поэтому ограничимся лишь указанием уже разработанных и запатентованных технических решений, направленных на развитие конструкции типа ВАО2 – это изобретения [18-20 и др.]

## ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ существующей серии ВАО2 и новых разработок ВАО2М (ВАО5) и ВАО4 по удельной материалоемкости, представленные на рис.2, наглядно показывает, что развитие ВАО2 в направлении совершенствования "симметричной" аксиально-радиальной СВО (серия ВАО5 (заделы ВАО2М)) логически приводит к новому поколению ВЭД с очередным уменьшением массо-габаритных показателей на 15-20 %.

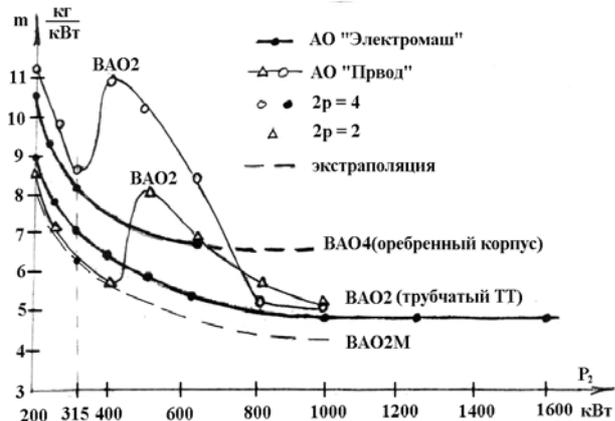


Рис.2. Зависимость удельной массы  $m$  от полезной мощности  $P_2$  электродвигателей серии ВАО2, модернизированных образцов ВАО2М (заделы серии ВАО5) и отрезка серии ВАО4 при  $2p = 2$  и  $4$

Примечание: Отрезок серии 400-1000 кВт ( $\Delta$ ) и отрезок серии 200 – 1000 кВт ( $O$ ) были спроектированы самим СКБ ОАО "Привод" под свои активные части, без использования новой схемы СВО [4] в период после разделения СССР.

2. Разработка же новых серий по западной концепции "длинных" ВЭД, в основе СВО которых лежит асимметричная аксиальная СВО (серии ВАО4), заведомо приводит к ухудшению (увеличению) массо-габаритных показателей и себестоимости ВЭД, что теоретически было показано автором при обосновании серии ВАО5 [17]. Такой же, очевидно, результат будет уметь и В/В ВЭД с серийным названием ВАД [21], в основу СВО которой (в противовес мнению автора) снова была положена западная концепция "длинных" оребренных ВЭД.

3. Разработчикам и отечественным заводам крупного электромашиностроения не следует необдуманно принимать хотя и новую, но тупиковую для наших серий ВЭД западную концепцию, а разрабатывать эффективную многовариантную отечественную концепцию симметричных ВЭД и КЭМВИ.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Конохов Н.Н., Резник Л.Б. Работы и перспективы УкрНИИВЭ и ИСЦВЭ в области создания крупных взрывозащищенных электроприводов для нефтегазового комплекса // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ, - Донецк, 1998 - с.20-27.
- [2] Горягин В.Ф., Дорошкевич И.Л., Збарский Л.А. и др. Новая серия ВАО асинхронных взрывонепроницаемых высоковольтных электродвигателей мощностью от 200 до 1000 кВт // "Электрические машины переменного тока" Сб. трудов ЦПКТБ КЭМ, Энергия, 1973 г., с.139-152.
- [3] Збарский Л.А., Ширнин И.Г., Горягин В.Ф. и др. Характеристики асинхронных взрывонепроницаемых двигателей серии ВАО2 мощностью 200 – 2000 кВт // Электротехника 1986, №10, с.43-46.
- [4] Авт. св. СССР №838922. Электрическая машина // Збарский Л.А., Конохов Н.Н., Макагон В.А. и др., 1981г.
- [5] Авт. св. СССР №851656. Электрическая машина // Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Поршнев Ю.В. и др., БИ №26, 15.07.81.
- [6] Авт. св. СССР №792498. Подшипниковый узел электрической машины // Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Поршнев Ю.В., БИ №48, 30.12.80.
- [7] Авт. св. СССР №904107. Взрывозащищенная электрическая машина // Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Поршнев Ю.В., и др., БИ №5, 07.08.82.
- [8] Патент РФ №792497. Подшипниковый узел электрической машины // Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Останкович Е.В. и др., 30.06.93.
- [9] Збарский Л.А., Бурковский А.Н., Конохов Н.Н., Сороко П.А. Эффективность системы охлаждения высоковольтных двигателей серии ВАО2 и пути ее совершенствования // В кн.: Взрывозащищенные электрические машины и трансформаторы: Сб. научн. трудов ВНИИВЭ - Донецк – 1988, с.9-16.
- [10] Заявка ФРГ №3242018, 1981г.
- [11] Патент США №4442371, 1984г.
- [12] "Завод Крупных Электрических Машин". Каталог продукции. 2004 год. г. Новая Каховка, г. Санкт-Петербург.
- [13] Mazumder P. An analytical approach to sausage motor design "Elec. India" 1977, 17, №24, 57-60 (англ.).
- [14] Siemens, "H-compact". Высоковольтные двигатели трехфазного тока. Фирменный каталог У 20001- E630-B110-X-5600, 16.
- [15] Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем. – К.: Наукова думка, 2002-288 с.
- [16] Овчинников Н.Ф. Симметрия – закономерность природы и принцип познания // Принцип симметрии.-М.: Наука 1978.-с.4-38.
- [17] Обоснование создания новой серии высоковольтных взрывозащищенных электродвигателей ВАО5. Технический отчет ПИЖЦ 520058. 005. УкрНИИВЭ, г. Донецк. 1996, 11 с. Патент РФ №1473018.
- [18] Электрическая машина // Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Ковалев Е.Б., Сороко П.А., 30.06.93.
- [19] Патент РФ №1725322. Электрическая машина // Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Ширнин И.Г., Бурковский А.Н., 30.06.93.
- [20] Патент РФ №1525813. Ротор электрической машины // Конохов Н.Н., Волох В.Я., Никульников А.Г., 30.06.93.
- [21] Красников Г.В., Гасюк А.А., Ксензенко В.В. и др. Стендовые испытания электродвигателей ВАД-450М4 и ВАД-450Л4 на соответствие требованиям технических условий // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научн. тр. УкрНИИВЭ.-Донецк: 2003-с.94-97.

Поступила 22.07.04