

УДК 621.131

М.В.ЧЕРНЯВСКАЯ, М.Л.ГЛЕБОВА, И.Т.КАРПАЛЮК, кандидаты техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР СИСТЕМЫ С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Рассматриваются вопросы выбора машин постоянного тока в электроприводах большой мощности с широким и плавным диапазоном регулирования частоты вращения. Даны способы повышения технико-экономических и эксплуатационных показателей вентильных двигателей, имеющих два типа преобразователей.

Розглядаються питання вибору машин постійного струму в електричних приводах великої потужності з широким та плавним діапазоном регулювання частоти обертання. Наведено способи підвищення техніко-економічних та експлуатаційних показників вентильних двигунів, що мають два типи перетворювачів.

The choice of the direct current engines in the electric drive high power was considered. The engines with smooth direction the clock rate observed. The methods increase of the technical, economical and exploitation for ac electronic motors.

*Ключевые слова:* вентильный двигатель, преобразователь частоты, регулируемый электропривод.

В настоящее время основным направлением совершенствования промышленного оборудования для систем генерирования и потребления электроэнергии является повышение их производительности, экономичности и надежности, основанное на применении новейших достижений материаловедения, преобразовательной техники и автоматики. Значительные успехи достигнуты в области промышленной электроники, что явилось мощным стимулом для развития различного рода систем, в которых, благодаря органической связи электрических машин и статических преобразователей частоты, удастся не только повысить надежность и качество энергоснабжения, но и создать системы с новыми эксплуатационными свойствами, максимально адаптированные к внешним возмущениям. Среди таких систем особое место занимают вентильные двигатели (ВД), представляющие собой электромашино-вентильные системы (ЭМВС), состоящие из синхронных машин (СМ) и зависимых инверторов, управляемых датчиком положения ротора (ДПР) [1, 2].

Потребность в электроприводах большой мощности с широким и плавным диапазоном регулирования частоты вращения на современном этапе развития не может быть обеспечена в полной мере за счет традиционных машин постоянного тока (МПТ), где щеточно-коллекторный узел накладывает серьезные ограничения на предельные значения мощности, частоты вращения, напряжения. В этой связи исследование ВД, которые имеют равноценные с МПТ технические харак-

теристики, но более надежны при меньших эксплуатационных расходах, является актуальной задачей [3, 4].

Не останавливаясь подробно на анализе публикаций по данному направлению, отметим наиболее важные работы в области развития теории и практики вентильных двигателей.

Совместными усилиями ученых, инженеров, конструкторов созданы и внедрены двигатели с транзисторными или тиристорными коммутаторами широкого диапазона мощностей от долей Ватта до нескольких мегаватт. В частности, рядом известных заводов и фирм начато их серийное производство. Фирма "Тоio electric" (Япония) изготавливает четырехполусные ВД мощностью 15, 22, 37 кВт, а также шестиполусные – 55, 132 кВт и восьмиполусные – 200, 250, 315, 375 кВт. На заводах "Mitsubishi" и "Hitachi" (Япония) выпускаются ВД общепромышленного назначения от 6,5 до 600 кВт для привода прокатных станов от 100 до 300 кВт и электроподвижного состава мощностью 110-220 кВт. В проспекты "Siemens" и "AEGTelefunken" (Германия) включены ВД от 7,5 до 3800 кВт. На отечественных предприятиях – ВЭЛНИИ (г.Новочеркасск) и ЦНИИ МПС (г.Москва) – созданы электровозы ВЛ 80-5 и ВЛ 80-В с вентильными двигателями  $P_n = 1025$  кВт.

Для привода рудоразмельных и цементных мельниц разработаны тихоходные ВД. Мощность таких двигателей достигает 25 МВт (ХЭМЗ) при частоте вращения около 100 об./мин и 3,2-12 МВт (ЛПЭО "Электросила") при 12-15 об./мин.

Фирма Alsthom (Франция) в 1987 г. создала серию ВД мощностью 2,8-5,6 МВт для электропоездов ВВ 26000 и ТГВ/А, а для привода вентиляторов поставляет ВД мощностью 21 МВт с частотой вращения 5900 об./мин. Кроме того, следует отметить разработки завода "ЧКД-Прага" (Чехия), создавшего электропривод мощностью 25 МВт для разгона турбокомпрессора, фирмы " Union Carbide Corp." (США) – машины мощностью 2,6-19 МВт для предприятий химической промышленности, фирм "Siemens" (Германия) и " Brown Boveri" (Швейцария), осуществивших поставку безредукторных ВД для цементных мельниц мощностью до 10 МВт.

В 1989 г. в Германии была создана военная колесная машина 8x8 с электротрансмиссией на ВД с постоянными магнитами. Находящиеся в ступицах восемь колес ВД развивали вращательный момент до 26 кНм на каждом колесе и машина достигала скорости до 100 км/ч.

Вместе с тем приходится констатировать пока еще ограниченное промышленное использование ВД по целому ряду причин. Среди них обратим особое внимание на недостаточную изученность основных явлений, заставляющую весьма осторожно относиться к преимущест-

вам ВД при обсуждении технических альтернатив.

Среди значительного количества разнообразных методов анализа процессов в машиноventильных системах большинство базируется на существенных допущениях и построены для той или иной конкретной модификации схем, поэтому определяют лишь качественную картину явлений и не позволяют получить сравнительные характеристики. Мало внимания уделяется исследованиям переходных режимов, несмотря на их ведущую роль в современных электроприводах. Следует отметить также недостаток в хорошо апробированных методиках проектирования электрических машин, предназначенных для совместной работы с полупроводниковыми коммутаторами. Последние искажают формы кривых тока и напряжения якорных цепей, приводят к росту потерь, а следовательно, температур активных частей магнитопровода и обмоток, вызывают появление заметных пульсаций электромагнитного момента, являющихся причиной крутильных колебаний валов и увеличения механических нагрузок на отдельные элементы конструкций. При проектировании и технико-экономическом обосновании ВД необходим детальный учет перечисленных явлений. С другой стороны, рациональный выбор параметров машин позволяет расширить диапазон устойчивой работы преобразователя при регулировании частоты вращения и в переходных режимах.

Поскольку понятие ВД включает в себя систему, в общем виде представленную на рис.1, вопросы формирования требований к отдельным ее элементам связаны с условиями их совместной работы.

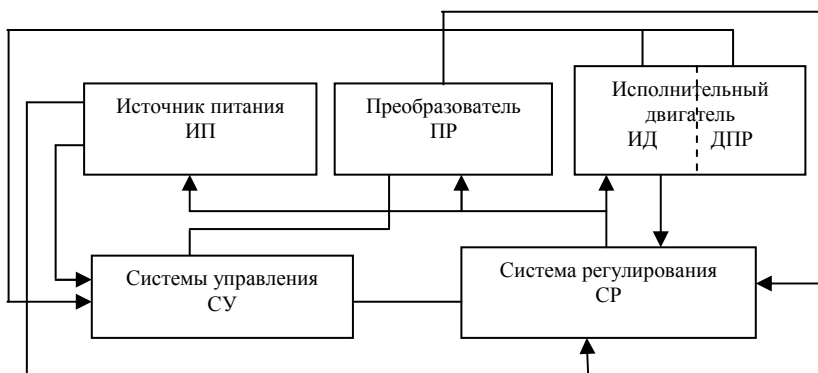


Рис.1 – Общая структура системы вентильного двигателя

Одной из трудностей создания регулируемого электропривода на базе ВД является многообразие возможных модификаций отдельных элементов системы и их возможных комбинаций. Накопленная весьма

обширная информация по данному вопросу, с одной стороны, и отсутствие обобщающих, методологически стройных публикаций, с другой, ставят на повестку дня вопросы обоснованной и широкой систематизации как структурного выполнения ВД, так и способов повышения их технико-экономических и эксплуатационных показателей.

В фундаментальных работах по ВД достаточно подробно описываются возможные варианты исполнения отдельных элементов системы ВД. Проводя систематизацию имеющейся информации, ограничимся рассмотрением систем средней (50-200 кВт) и большой мощности (>200 кВт). При этом силовые элементы системы ВД могут быть характеризованы согласно классификации, представленной на рис.2 для исполнительного двигателя и рис.3 – преобразователя.

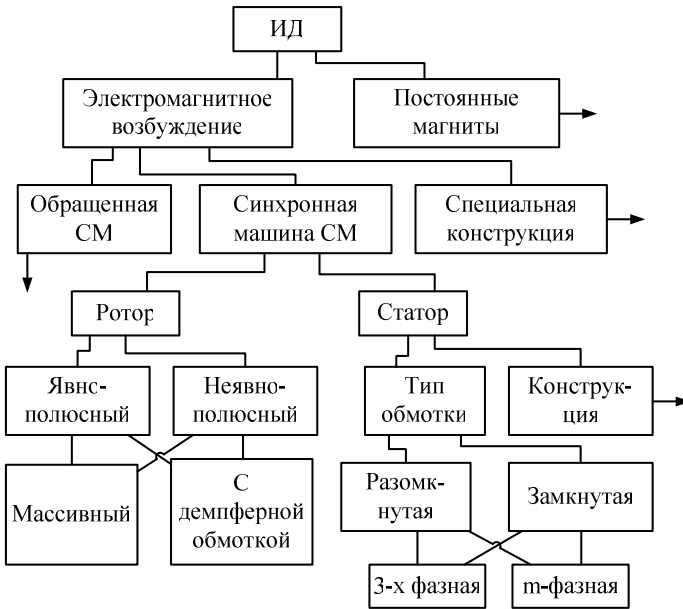


Рис.2 – Классификация исполнительных двигателей систем ВД

Элементарная математическая обработка данной, достаточно обобщенной, классификации, показывает, что число возможных вариантов исполнения преобразователя ( $B_{np}$ ) и исполнительного двигателя ( $B_d$ ) равны:

$$B_{np} = 2 * 3 * 2 * (3+1) = 48,$$

$$B_d = 1 * 1 * 2 * [2 * (1 + 2 * 2) + 2 * 2] = 28.$$

Здесь в ВД не включены случаи, отмеченные на рис.2 свободными стрелками. Третий элемент в силовой части системы ВД – источник питания (ИП) в автономных энергосистемах принимает равноценное участие в технико-экономических и эксплуатационных показателях.

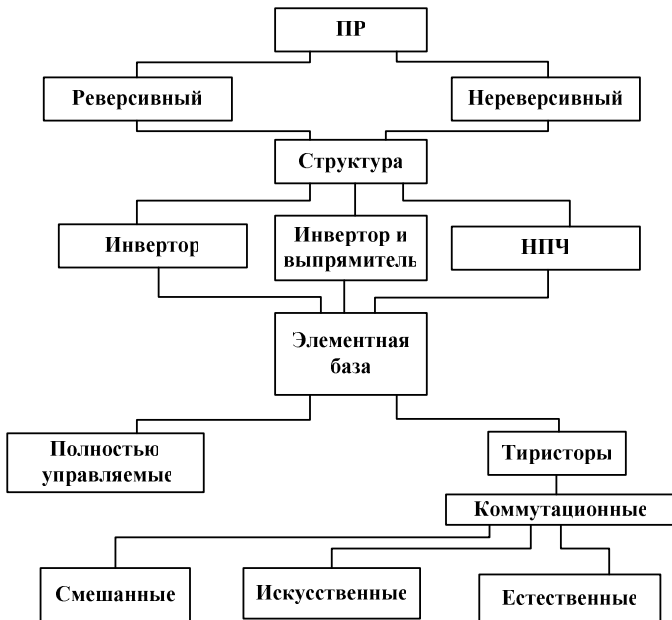


Рис.3 – Классификация преобразователей систем ВД

Таким образом, при создании регулируемого электропривода выбор рационального сочетания силовых элементов системы ВД представляет собой достаточно объемную задачу, решение которой в настоящее время в основном носит случайный характер.

В целом разработку системы ВД условно можно разделить на два этапа:

- выбор структуры системы;
- оптимизация параметров всех элементов системы.

Независимо от уровня решения этих вопросов их объединяет необходимость учета взаимного влияния между отдельными элементами.

При этом принятие оптимальных решений затруднено, с одной стороны, многообразием возможных модификаций отдельных элементов системы ВД (источник питания, преобразователь, исполнительный двигатель, системы управления и регулирования) и их возможных

комбинаций, с другой стороны, участие организаций и специалистов различных областей техники (электромашиностроение, преобразовательная техника, электропривод, автоматика) ограничивает возможности комплексного подхода при создании вентильных двигателей.

Первым этапом при создании системы ВД является выбор ее структуры, что определяется типом преобразователя (СПР) и исполнительного двигателя (ТИД). Опыт зарубежных и отечественных исследователей позволяет в настоящее время для систем средней и большой мощности ограничиться рассмотрением вариантов для СПР – тиристорные преобразователи с явным звеном постоянного тока (ЯЗПТ) (рис.4) и с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ) (рис.5); для ТИД – синхронная машина с трехфазным (ВДЗ) и шестифазным (ВД6) исполнением обмотки якоря.

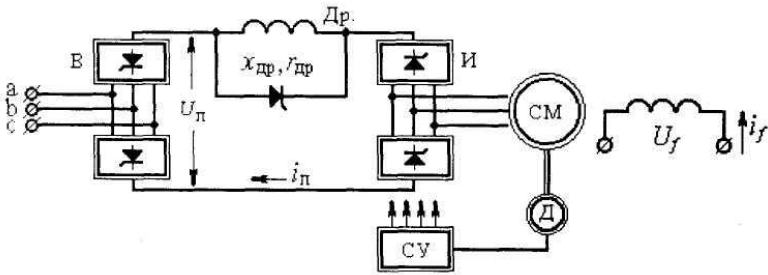


Рис.4 – Принципиальная схема вентильного двигателя, имеющего преобразователь с явным звеном постоянного тока (ЯЗПТ)

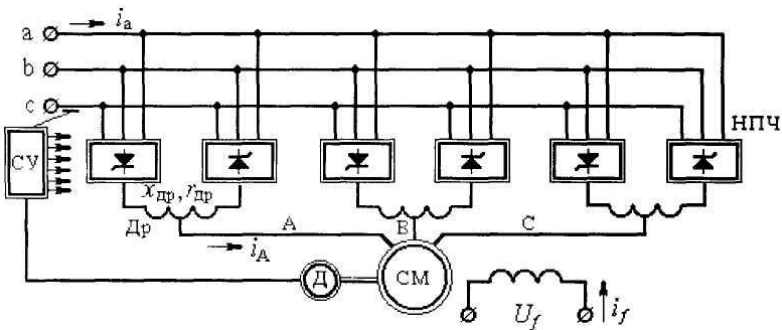


Рис.5 – Принципиальная схема вентильного двигателя с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ)

Общая сравнительная оценка вариантов исполнения преобразователя (табл.1) позволяет однозначно принять решение только для высокоскоростного электропривода ( $n_n > 1500$  об./мин), где преимущества ВД с ЯЗПТ значительны. Оптимизация структуры преобразователя при  $n_n < 1500$  об./мин определяется весовыми коэффициентами, характеризующимися, с одной стороны, габаритно-стоимостными показателями, с другой – показателями работы системы ВД в динамических режимах.

Таблица 1 – Сравнение показателей ВД с ЯЗПТ и с НПЧ

Достоинства	Недостатки
<i>ВД с явным звеном постоянного тока</i>	
1. Меньшее количество тиристорных элементов, простота схемы и системы управления. 2. Относительно меньше общие габариты и стоимость системы. 3. Рабочие свойства практически не зависят от соотношения частот на выходе инвертора и питающей сети.	1. Двукратное преобразование энергии 2. Сравнительно низкая перегрузочная способность 3. Необходимость использования алгоритмов управления элементами выпрямителя реализации пускового процесса и с низкими частотами вращения.
<i>ВД с непосредственным преобразователем частоты</i>	
1. Однократное преобразование энергии. 2. Более высокая перегрузочная способность. 3. Возможность самозапуска двигателя с высоким пусковым моментом без применения специальных алгоритмов управления тиристорами. 4. Лучшие динамические характеристики при использовании идеи коммутации тиристором напряжением сети.	1. Большое количество тиристорных преобразователей и сложность системы 2. Ограниченный диапазон рабочих частот на заданной частоте источника питания.

Научно-теоретические разработки и практическое внедрение ВД достаточно длительное время базировалось на использовании серийных синхронных двигателей (ВДЗ). Данная система (табл.2) имеет ряд существенных недостатков, поэтому одним из основных вопросов оптимального проектирования является выбор типа ИД. В настоящее время наибольшую конкуренцию системам ВДЗ составляют ВДб, где ИД выполнен с шестифазной обмоткой статора, соединенной в две трехфазные звезды. Общая сравнительная оценка ВДЗ и ВДб приведена в табл.2. Анализируя достоинства и недостатки ВДЗ и ВДб, следует отметить, что основными факторами при выборе типа ВД являются простота изготовления и эксплуатации ВДЗ и высокие технико-экономические показатели рабочих режимов ВДб.

Таблица 2 – Сравнение показателей ВДЗ и ВДб

Достоинства	Недостатки
<i>ВДЗ</i>	
1. Относительная простота исполнения, что влияет на стоимостные показатели системы. 2. Возможность использовать в качестве двигателя серийно выпускаемые машины. 3. Меньшее число конструктивных и токонесущих элементов.	1. Значительные пульсации момента в статических режимах. 2. Завышенные значения добавочных элементов в исполнительном двигателе. 3. Более высокие токовые и механические системы управления в аномальных и аварийных режимах. 4. Значительное влияние на силовые цепи.
<i>ВДб</i>	
1. Лучшие виброакустические свойства. 2. Существенно меньшие величины добавочных потерь и иное их распределение. 3. Меньшая чувствительность к асимметрии в системе управления и выше устойчивость системы в статических и динамических режимах. 4. Более благоприятные условия выхода из аварийных ситуаций.	1. Повышенные стоимостные показатели и затраты. 2. Технологически более сложная якорная схема, большее количество выводов. 3. Более сложная система управления.

Вторым этапом при создании системы ВД является выработка требований к параметрам отдельных ее элементов и их оптимизация. В общем случае автономной энергосистемы следует рассматривать параметры источника питания (относительная частота  $\omega_n$  и индуктивное сопротивление, определяющее внешнюю характеристику ИП –  $x_C$ ), силовых дросселей ( $r_{др}$ ,  $x_{др}$  или  $M_{др}$ ) и исполнительного двигателя (основными являются параметры, влияющие на коммутационные процессы преобразователя).

Таким образом, количественную оценку степени влияния параметров на основные показатели системы можно получить на базе исследований, учитывающих как физические процессы в отдельных элементах системы, так и связи между элементами. При этом сравнение систем ВД различных структур требует адекватности математического описания физических процессов.

1. Волчуков Н.П. Сравнительный анализ динамических свойств вентильных электрических машин с различными исполнительными двигателями // Вестник ХГПУ. Вып.11. – Харьков, 1999. – С.174-176.

2. Бертинов А.И. Специальные электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.

3. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1974. – 840 с.

4. Кононенко Е.В., Сипайлов Г.А., Харьков К.А. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.

Получено 29.09.2009