

**А.Е. Друбецкий**

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна)

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОГТЕОБРАЗНЫМИ ПОЛЮСАМИ

На начальных этапах развития и в настоящее время бесколлекторный тяговый привод базируется на асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором и вентильных двигателях (ВД), конструктивно выполненных как стандартные синхронные машины. Такая конструкция ВД, хотя и проще чем у коллекторных, но сложнее, чем у асинхронных. Единственным преимуществом ВД является более простой алгоритм системы управления и менее сложная силовая цепь. В дальнейшем, по мере развития силовой полупроводниковой электроники и появлению микропроцессорных систем управления, на первый план вышла простота конструкции и поэтому асинхронные двигатели вытеснили вентильные. Однако в нынешнее время предпринята попытка заново пересмотреть возможности ВД. Как следует из всего вышесказанного, для успешной конкуренции с асинхронными ВД должны быть обязательно бесконтактными.

На сегодняшний день существует несколько видов бесконтактных ВД: индукторные, реактивные, с постоянными магнитами, с когтеобразными полюсами и с вращающимися трансформаторами. Последний тип ВД, несмотря на бесконтактность, конструктивно является еще более сложным, чем обычный ВД. Рассмотрим ВД с когтеобразными полюсами как представляющий большой интерес, поскольку данная конструкция до нынешнего времени не рассматривалась как основа мощного вентильного привода.

Бесконтактная конструкция синхронных машин с когтеобразными полюсами впервые была предложена А. Г. Иосифьяном и Д. Г. Свечарником [1] для изготовления на их основе бесконтактных сельсинов. В дальнейшем данная конструкция была детально изучена в Институте энергетики АН Латвийской ССР и во ВНИИЭМ [2, 3].

Статор и якорная обмотка ВД с когтеобразными полюсами такие же, как и в обычных синхронных и асинхронных машинах. Все остальные активные и некоторые конструктивные части имеют существенные отличия. В частности, особенностями данной конструкции является ее бесконтактность и полное отсутствие обмоток на роторе. Обмотка возбуждения расположена на статоре, что позволяет осуществить подвод тока к ней без контактных колец и щеток. Указанное расположение обмотки возбуждения позволяет выполнить ее в виде двух колец, расположенных на специальных выступах подшипниковых щитов. Такая конструкция обмотки возбуждения является предельно

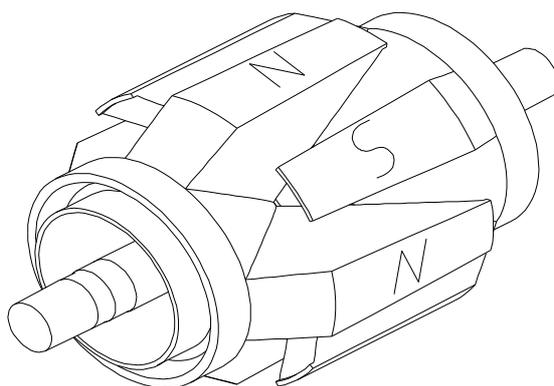


Рис. 1. Общий вид ротора с когтеобраз-

простой и технологичной при обслуживании и ремонте (ее можно легко заменить, сняв лишь подшипниковый щит). В машинах с когтеобразными полюсами собственно обмотка возбуждения не создает чередования полюсов, как это происходит в машинах традиционной конструкции. Ее назначение – создать основной магнитный поток машины, а для создания переменного магнитного потока (чередования полюсов) и существует ротор с когтеобразными полюсами (рис. 1).

Конструктивно ротор состоит из трех частей (рис. 2): вала 1 с немагнитной вставкой 2 и двух полюсных систем северной и южной полярности (N и S соответственно), каждая из которых представляет собой цилиндрическую стальную отливку 4 с когтеобразными полюсными выступами 3. Подшипниковые щиты и станина, в отличие от обычных машин, выполняют роль магнитопровода. Таким образом, магнитный поток проходит не только по статору, но и снаружи него, благодаря чему такие машины еще называют машинами с внешнезамкнутым магнитным потоком.

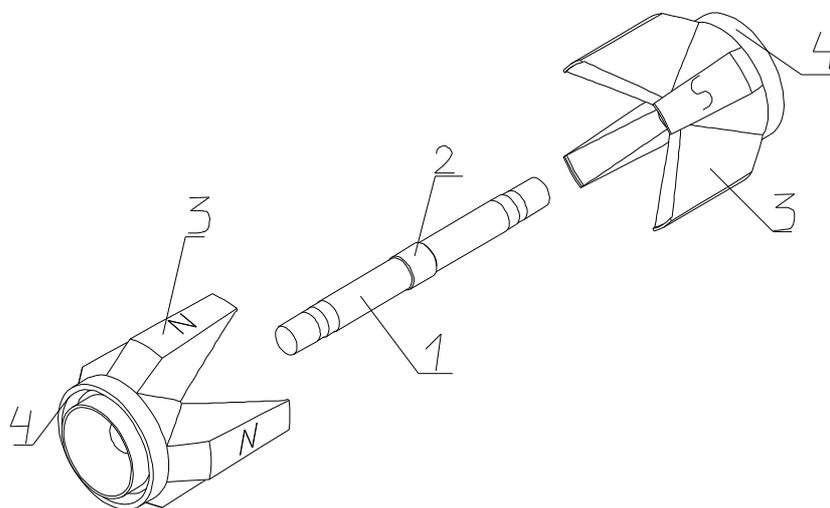


Рис. 2. Составные части когтеобразного ротора

Рассмотрим магнитную цепь, проходящую через ротор (на рис. 3 средняя магнитная силовая линия (МСЛ) отмечена пунктиром). Общий магнитный поток, проходя через цилиндр полюсных систем, разделяется на части, число которых соответствует числу пар полюсов. Магнитный поток одной пары полюсов замыкается по цепи: полюс одной полярности 1 (например, северный) – воздушный зазор 2 – статор 3 – воздушный зазор 2 – полюс другой полярности 1 (например, южный), цилиндр полюсных систем 4, где магнитные потоки всех пар полюсов опять соединяются. Из цилиндра полюсных систем одной полярности магнитный поток проходит через дополнительный воздушный зазор 5, подшипниковый щит 6, станину 7, подшипниковый щит 6, дополнительный воздушный зазор 5 и попадает в цилиндр полюсных систем другой полярности 4. Направление магнитного потока в статоре, такое же, как и в обычных машинах, т.е. перпендикулярно плоскости рисунка, но на самом рис. 3 оно не показано.

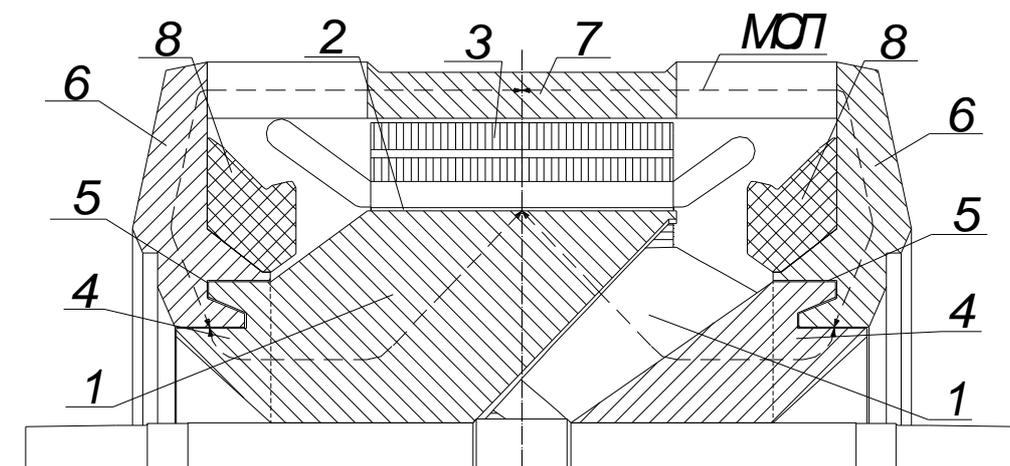


Рис. 3. Магнитная цепь ВД с когтеобразными полюсами

В работе [4] отмечено, что для наилучшей добротности магнитопровода последний должен иметь одинаковую индукцию во всех сечениях. И если для статора и подшипниковых щитов это условие удовлетворить сравнительно легко, то для ротора представляет некоторые трудности. Поэтому основные геометрические размеры ротора очень жестко связаны между собой. Для упрощения изучения соотношений геометрических размеров магнитопровода ротора принято условно разделять его на четыре участка с соответствующими сечениями [5]: характерное сечение полюса  $S_{\Pi}$ , сечение шейки полюса  $S_{Ш}$  ( $S_{\Pi}$  и  $S_{Ш}$  представляют собой конические поверхности), сечение основания полюса  $S_{O}$  и сечение цилиндра полюсных систем  $S_{\Pi}$  (рис 4). Между этими сечениями должны существовать определенные соотношения:

$$\frac{S_{Ш}}{S_{\Pi}} = \chi_{Ш}; \quad \frac{S_{O}}{S_{\Pi}} = \chi_{O}; \quad \frac{S_{\Pi}}{p \cdot S_{\Pi}} = \chi_{\Pi}, \quad (1)$$

где  $p$  – число пар полюсов.

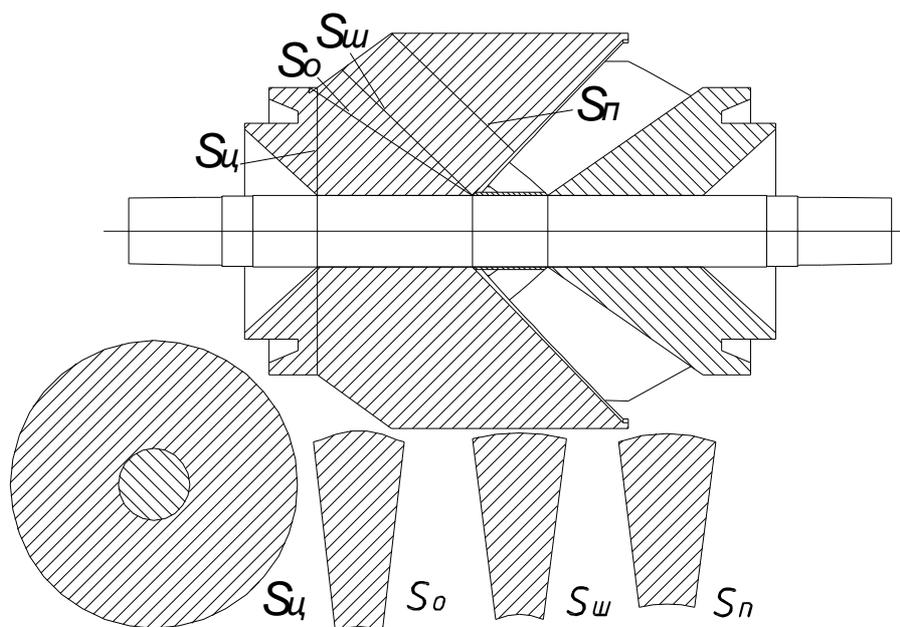


Рис.4. Характерные сечения когтеобразного ротора

Экспериментальные исследования и практика проектирования машин с когтеобразными полюсами малой мощности показывают, что приближенно можно положить:

$$\chi_{\text{ц}} \approx 1,2; \chi_{\text{о}} \approx 1,1; \chi_{\text{ш}} \approx 1,05. \quad (2)$$

При выполнении расчета тягового ВД с когтеобразными полюсами указанные коэффициенты получились такими:  $\chi_{\text{ц}} = 1,2$ ;  $\chi_{\text{о}} = 1,099$ ;  $\chi_{\text{ш}} = 1,036$ . При изменениях этих коэффициентов, т.е. соотношения площадей сечений, падение магнитного напряжения на участках магнитопровода оказалось больше, чем при их оптимальном соотношении (2). Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что соотношения (2) справедливы и для машин средней и большой мощности.

Важными параметрами, которые характеризуют работу синхронной машины в переходных режимах, являются сверхпереходные и переходные индуктивные сопротивления. Поскольку ВД работает в непрерывных переходных режимах, то для него большую важность представляют сверхпереходные индуктивные сопротивления. Они определяют значение коммутационного индуктивного сопротивления [6] и соответственно коммутационной индуктивности, которая в свою очередь определяет длительность процесса коммутации тока с одной фазы на другую [7]. У ВД обычной конструкции изменение сверхпереходных сопротивлений достигается изменением соответствующих параметров демпферной обмотки, так как шихтованный ротор практически не оказывает влияния на прохождение переменного магнитного потока. У ВД с когтеобразными полюсами демпферная обмотка отсутствует, а ее роль выполняют сам массивный ротор, массивные подшипниковые щиты и станина [8]. Следует от-

метить тот факт, что добиться невысоких значений сверхпереходных индуктивных сопротивлений у ВД с когтеобразными полюсами существенно проще, чем у ВД обычной конструкции, о чем свидетельствует произведенный расчет:  $X_d'' = 0,149$ ,  $X_q'' = 0,1565$  для ВД обычной конструкции [6] и  $X_d'' = 0,102$ ,  $X_q'' = 0,103$  – с когтеобразными полюсами. Причем дальнейшее снижение этих параметров у ВД обычной конструкции затруднительно, прежде всего, из-за ограниченного пространства для размещения демпферной обмотки (она размещается в зубцах неявнополюсного ротора).

Сравним достоинства и недостатки данной и традиционной конструкции вентильного двигателя.

Первое, как уже отмечалось, это бесконтактность и простота конструкции, т.е. такой двигатель не нуждается в ремонте вплоть до крупных его видов, а техническое обслуживание состоит лишь в осмотре. Исключение составляет только внеплановый ремонт, однако и он может быть произведен без особого труда (кроме якорной обмотки, все остальные части меняются легко, и требуют лишь частичной разборки двигателя).

Второе, в отличие от обычных ВД, у которых для охлаждения обмотки возбуждения неявнополюсного ротора необходимо последний делать относительно большого диаметра, в ВД с когтеобразными полюсами такая необходимость отпадает ввиду ее отсутствия на роторе. Соответственно размеры ротора ограничиваются предельно допустимой магнитной индукцией в нем.

Третье, расположение обмотки возбуждения на статоре (8 на рис. 3) позволяет более эффективно охлаждать ее, а непосредственный контакт с массивным подшипниковым щитом еще более способствует этому.

Четвертое, такая конструкция позволяет получить оптимальную централь двигателя 604 мм и соответственно установить редуктор с максимально возможным передаточным числом  $\mu = 4,19$  [7], что в свою очередь позволяет увеличить силу тяги. У ВД обычной конструкции ограничение по минимально допустимой толщине тела остова наступает раньше, чем централь достигает своего оптимального значения (см. пример расчета ВД [6]).

Пятое, простота достижения возможности уменьшения сверхпереходных индуктивных сопротивлений позволяет улучшить тяговые характеристики электровоза [6].

Рассмотрим недостатки.

Первое, так как у ВД с когтеобразными полюсами, кроме внутреннего, есть внешний магнитопровод, масса данных машин больше, чем обычных на 30 %. Это обстоятельство, однако, не сказывается на тягово-сцепных свойствах электровозов. Существует также возможность снижения массы двигателя за счет применения в нем материалов с улучшенными магнитными свойствами, но это же в равной степени затрагивает и ВД обычной конструкции.

Второе, магнитная цепь ВД с когтеобразными полюсами имеет значительно большую протяженность и довольно развитые магнитные потоки рассеяния, что требует увеличения МДС обмотки возбуждения и, соответственно, увеличение ее размеров. Данное обстоятельство не вызывает особых трудно-

стей при проектировании, поскольку в двигателе имеется достаточно места для ее размещения.

Третье, как следствие увеличения обмотки возбуждения, некоторое снижение КПД за счет возрастания потерь на возбуждение. Но и здесь существует возможность оптимизации числа витков и токовой нагрузки обмотки возбуждения с целью снижения потерь.

Четвертое, несколько большие габариты в радиальном направлении из-за наличия внешнего магнитопровода. Проведенный расчет тягового ВД показал, что эта разница составляет всего лишь 2 % по сравнению с ВД обычной конструкции и принципиального значения не имеет.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что ВД с когтеобразными полюсами может применяться в качестве тягового и успешно конкурировать с асинхронными и коллекторными машинами на электровозах переменного тока. Продольный разрез ВД с когтеобразными полюсами представлен на рис. 5.

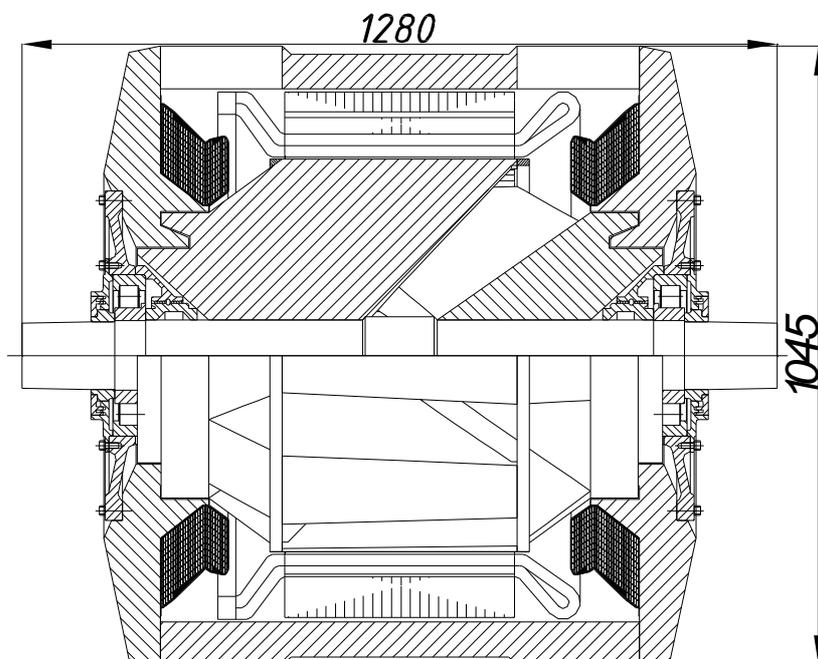


Рис.5. Продольный разрез вентильного двигателя с когтеобразными полюсами

#### Список литературы

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
2. Аpsит В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами. – Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959. – 300 с.
3. Куцевалов В.М. Бесконтактные синхронные двигатели //Бесконтактные электрические машины – 1966. – ч. 1. – С. 42–50.
4. Аpsит В.В. Добротность магнитопроводов //Система электроснабжения транспортных средств – 1953. – Вып. 2. – С. 83–90.
5. Сика З.К. Геометрия когтеобразных индукторов //Бесконтактные электрические машины. – 1968. – Т. 7 – С. 95–123.
6. Проектирование тяговых электрических машин /Находкин М.Д., Василенко Г.В., Бочаров В.И. и др. – М.: Транспорт, 1976. – 623 с.

7. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе/ Тихменев Б.Н., Горин Н.Н., Кучумов В.А. и др. – М., Транспорт, 1976, 280 с.
8. Туманов В.И. Расчетное и экспериментальное определение сверхпереходных параметров синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком // Вестник электропромышленности. – 1962. – №6. – С. 41–44.