

*Е.С. РЯБОВ*, асп., НТУ «ХПИ»

## **РЕАКТИВНЫЙ ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ**

Запропоновано для безредукторного привода використовувати реактивний індукторний двигун з аксіальним магнітним потоком, відмінністю якого від двигунів з аксіальним потоком є відсутність постійних магнітів і утворення електромагнітного моменту лише за рахунок зміни провідності повітряного проміжку та ступеню насичення магнітної системи двигуна. Наведено вирази для обчислення електромагнітного моменту двигуна.

It is offered for direct drive to use a transverse flux reluctance motor which difference from axial flux motor is absence of constant magnets and formation of the electromagnetic moment only at the expense of change of conductivity of an air gap and degree of satiation of the magnetic system of motor. Expressions are resulted for the calculation of electromagnetic moment of motor.

В качестве технологии, позволяющей создать тяговый электропривод с повышенной энергетической эффективностью, многими специалистами в области железнодорожного транспорта как в нашей стране, так и за рубежом, считается безредукторный тяговый привод [1,2]. Однако, при переходе к безредукторному приводу необходимо сохранить силу тяги, что требует применения высокомоментного двигателя, способного «компенсировать» отсутствие редуктора. К тому же, такой двигатель имеет ограниченные геометрические размеры, поскольку должен разместиться в пространстве между колёсными центрами. Эти два условия оказывают решающее значение на выбор типа тягового двигателя для безредукторного привода.

Анализ источников показывает, что преимущественно для безредукторного привода используются синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Это обусловлено высокими удельными показателями машин этого типа [3-5]. В тоже время, в качестве альтернативного варианта рассматриваются двигатели с поперечным полем (с аксиальным магнитным потоком) (Transverse flux motor (TFM), Axial flux motor, (AFPM)), которые уже нашли применение на трамваях (Франция, Германия) и автобусах с гибридным приводом (Великобритания) [6]. Кроме того, был разработан опытный образец двигателя для высокоскоростного поезда ICE железных дорог Германии [7]. С конструктивным выполнением магнитной системы таких двигателей и принципом действия можно ознакомиться в [5-11]. Отличительной особенностью этих машин является применение постоянных магнитов, что и позволяет получить высокие удельные показатели. Электромагнитный момент образуется за счёт взаимодействия магнитного поля постоянных магнитов и магнитного поля, обусловленного током фазной обмотки, а также изменения проводимости воздушного зазора. Однако известны конструкции

двигателей, в которых постоянные магниты не применяются. В русскоязычной литературе они известны как многопакетные реактивные индукторные двигатели с аксиальным магнитным потоком (в англоязычной литературе – Transverse flux reluctance motor (TFRM)).

В статье рассматривается реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком (АИД) для безредукторного тягового привода.

Конструкция такого двигателя (на примере трёхфазной машины) и его фазы показана на рис. 1. В корпусе статора 1 расположены магнитопроводы 5, во внешней части которых имеются вырезы для установки сердечников 2. Между магнитопроводами расположен каркас 7, в котором смонтирована фазная катушка 3.

Ротор имеет аналогичную конструкцию. На корпусе 9 расположены магнитопроводы 6, во внутренней части которых имеются вырезы под сердечники 8. Конструктивный каркас 7 установлен для увеличения жёсткости конструкции.

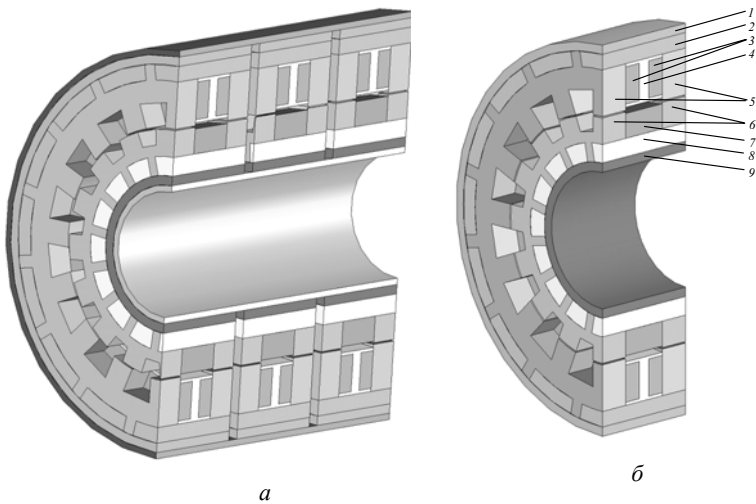


Рисунок 1 – Конструкция трёхфазного АИД (а) и его фазы (б)

- 1 – корпус статора, 2 – сердечник статора, 3 – фазная катушка, 4 – каркас катушки, 5 – магнитопровод статора, 6 – магнитопровод ротора, 7 – каркас, 8 – сердечник ротора, 9 – корпус ротора

Двигатель имеет количество фаз  $m$  ( $m > 3$ ), при этом статора (или ротора) должны быть смещены на  $360/(mZ)$  геометрических градусов по угловому положению. Здесь  $Z$  – количество зубцов статора (ротора).

Принцип действия рассматриваемого двигателя аналогичен принципу действия реактивного индукторного двигателя традиционной конструкции.

В положении, близком к рассогласованному, (зубец статора находится против «паза» ротора или зубцы статора и ротора частично перекрыты), фазную катушку подключают к источнику питания, вследствие чего по ней начинает протекать электрический ток (рис. 2а). При этом магнитное поле, возникающее при протекании тока в катушке, начинает втягивать зубцы ротора под зубцы статора. Это и приводит к вращению ротора. При достижении согласованного положения (зубец статора располагается против зубца ротора – рис. 2б) катушка отключается от источника питания. Поскольку другая фаза смещена на угол  $360/(mZ)$ , то в ней созданы условия для возникновения вращения ротора (при смещении фазных блоков на угол  $360/(mZ)$  всегда в одном из блоков зубцы статора перекрывают зубцы ротора). Далее процесс повторяется.

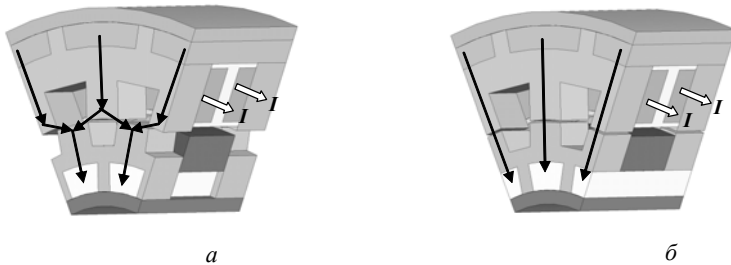


Рисунок 2 – К пояснению принципа действия АИД  
(сплошные стрелки – путь прохождения магнитного потока,  
контурные стрелки – направление протекания фазного тока  $I$ )

Как видим, при таком конструктивном исполнении электромагнитный момент образуется за счёт изменения проводимости воздушного зазора. Следует отметить, что на электромагнитный момент в реактивных индукторных двигателях также влияет насыщение магнитной системы [1].

Для определения мгновенного значения электромагнитного момента одной фазы двигателя используем выражение [12]:

$$M_k = \frac{\partial W_k'}{\partial \gamma} \Big|_{i=const} \quad (1)$$

где  $\partial W_k'$  – изменения коэнергии фазы, обусловленные изменением угла поворота ротора  $\partial \gamma$ ,

$i$  – ток в обмотке.

Коэнергия вычисляется по формуле:

$$W_k' = \int_0^{i_k} \Psi_k(i_k, \gamma) di \quad (2)$$

где  $\Psi_k(i_k, \gamma)$  – зависимость потокоцепления фазы от фазного тока и угла поворота ротора.

Тогда электромагнитный момент фазы двигателя равен:

$$M_k = \left. \frac{\partial \int_0^{i_k} \Psi_k(i_k, \gamma) di}{\partial \gamma} \right|_{i=const} \quad (3)$$

Мгновенное значение электромагнитного момента двигателя равно сумме мгновенных значений электромагнитного момента каждой их фаз:

$$M_\Sigma = \sum_{k=1}^m \left( \left. \frac{\partial \int_0^{i_k} \Psi_k(i_k, \gamma) di}{\partial \gamma} \right|_{i=const} \right) \quad (4)$$

Таким образом, считаем, что применение рассмотренного АИД в безредукторном приводе, в принципе, возможно. Для окончательного вывода о целесообразности применения такого двигателя и типе подвижного состава, для которого можно применить этот двигатель, необходимы детальные исследования. В их основу могут быть положены приведенные в статье выражения для определения электромагнитного момента АИД.

**Список литературы:** 1. *Куреев А.В.* Тяговый вентильно-индукторный привод электроподвижного состава // Железнодорожный транспорт. –2008, №7. – С. 50–54. 2. *Курбасов А.С., Подопросветов А.В., Рязанкин В.Н., Сорин Л.Н.* Специализированный электровоз для тяжеловесных поездов // Железнодорожный транспорт. – 2007. – №1. – С. 33–36. 3. Концепция современного тягового привода [Текст] // Железные дороги мира. – 1999.– № 06. – С. 40 – 45. 4. Непосредственный тяговый привод локомотива // Железные дороги мира. – 2004. – № 1. – С. 20–26. 5. *Омельяненко В.И., Любарский Б.Г., Рябов Е.С. и др.* Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава // Локомотив-информ. – 2008. – №1. – С. 16–19. 6. *Wilhelm Hackmann.* Systemvergleich unterschiedlicher Radnabenantriebe für den Schienennahverkehr: Asynchronmaschine, permanenterrechte Synchronmaschine, Transversalfflussmaschine. Doktor-Ingenieurs vorgelegte Dissertation, Technischen Universitat Darmstadt, 214p., 2003. 7. Тяговый двигатель с возбуждением постоянными магнитами. // Железные дороги мира – 2004. – №9. – С.12–14. 8. *M. Bork and G. Henneberger,* “New Transverse Flux Concept for An Electric Vehicle Driver System”, in Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, volume 3, pp. 308-313, Vigo, Spain, 1996. 9. *H. Hoffman, H. Web and J. Landrath,* “New Permanent Magnet Excited Synchronous Machine with High Efficiency at Low Speeds”, in Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, volume 3, pp. 35-39, Pisa, Italy, 1988. 10. *C. P. Maddison, B. C. Mecrow and A. G. Jack,* “Claw Pole Geometries for High Performance Transverse Flux Machine”, in Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, volume 1, pp. 340-345, Istanbul, Turkey, September, 1998. 11. *H. Weh and H. May,* “Achievable Force Densities for Permanent Magnet Excited Machines in New Configurations”, in Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, volume 3, pp. 1107-1111, Munchen, Germany, 1986. 12. *Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И. и др.* Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / Под ред. А.В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 213 с.

Поступила в редакцию 30.09.2010