

Применение совмещённых обмоток в одноимённо-полюсных индукторных двигателях

СМИРНОВ А.Ю., КАШКАНОВ А.О.

Рассматривается конструкция одноимённо-полюсной индукторной машины с возбуждением от совмещённой обмотки, создающей одновременно и вращающееся магнитное поле якоря, и поле возбуждения. Совмещённая обмотка позволяет упростить конструкцию машины, уменьшить расход изоляции и конструкционной стали, являющейся одновременно и частью внешне замкнутого магнитопровода для прохождения потока возбуждения в аксиально-радиальном направлении. Конкретизируется распределение по фазам катушек совмещённой обмотки при многофазном исполнении, для трёхфазного четырёхполюсного варианта обмотки построена интегральная кривая распределения МДС. Предложены уточняющие зависимости для расчёта электромагнитного момента двигателя с зубчатыми структурами на роторе и статоре с учетом изменения магнитной проводимости зазора при перемещении ротора на половину зубцового деления. Значения момента подставляются в уравнения машинной постоянной (Арнольда) для определения диаметра расточки при проектировании. Приведена формула для оценки теплового состояния машины с совмещённой обмоткой. Сделан вывод о возможных областях применения одноимённо-полюсных индукторных двигателей с совмещённой обмоткой: при повторно-кратковременных режимах работы, необходимости форсировки момента, а также в сочетании с магнитоэлектрической машиной на общем валу.

Ключевые слова: индукторный двигатель, совмещённая обмотка, внешнезамкнутый магнитопровод, зубцовая зона, расточка статора, электромагнитный момент

В системах автоматики и телемеханики, в устройствах позиционирования регулирующих органов получили применение одноимённо-полюсные индукторные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов на роторе [1] или на статоре [2], магнитный поток в которых замыкается в аксиально-радиальном направлении. Благодаря развитым зубчатым структурам двигателя обеспечивают высокую точность перемещения и остановки подвижных частей привода в заданном положении. При этом отсутствие перемагничивания магнитного потока по направлению позволяет уменьшить потери холостого хода и повысить КПД по сравнению с переменноплюсными индукторными двигателями, особенно при питании напряжением высокой частоты.

Вместе с тем внедрение в магнитную цепь участков большого магнитного сопротивления, каковыми являются постоянные магниты из сплавов неодима, самария, а также ферриты, приводит к ухудшению качества регулирования момента и частоты вращения. По этой причине в случае кратковременных бросков нагрузки единственные возможные решения — использование двигателя с большим моментом, а значит более дорогого и габаритного, либо применение электромагнитного возбуждения.

Наиболее известная конструкция одноимённо-полюсной машины с электромагнитным

возбуждением [1] содержит обмотку возбуждения, представленную одной или двумя катушками 1 и 2 (рис. 1). Они расположены по одну или по обе стороны пакета статора 3 с обмоткой якоря 4. Внешне замкнутый магнитопровод представлен корпусом и подшипниковыми щитами и втулками на статоре и роторе, ограничивающими нерабочий воздушный зазор (соответственно детали 5–8 на рис. 1). Пакет статора и зубчатый магнитопровод ротора 9 ограничивают рабочий зазор 10. Поток возбуждения, создаваемый катушками 1 и 2, в осевом направлении направлен встречно по отноше-

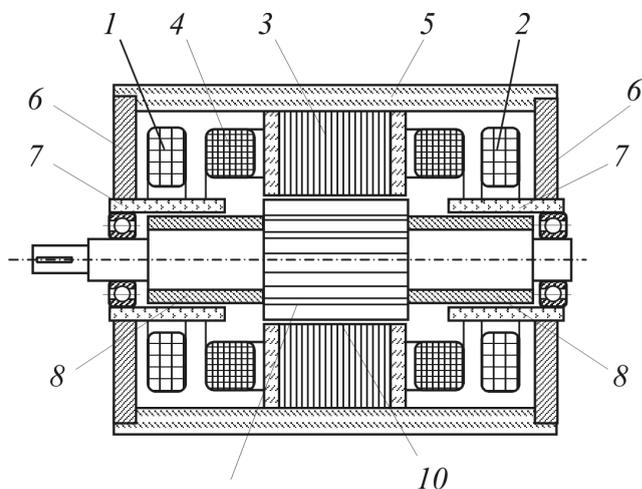


Рис. 1. Одноимённо-полюсный индукторный двигатель с электромагнитным возбуждением

нию друг к другу в корпусе 5 и суммируется в радиальном направлении в пакете статора 4 и магнитопроводе ротора 9, пересекая рабочий зазор 10.

Конструкцию машины можно существенно упростить, исключив катушки 1 и 2 контура возбуждения и передав его функции обмотке якоря 4. Прямым аналогом такого решения является машина с трёхфазно-однофазной совмещённой обмоткой, которая помимо вращающегося поля якоря создаёт неподвижное поле, замыкающееся вокруг лобовых частей [2].

Трёхфазная обмотка, создающая, помимо вращающегося, неподвижное поле, замыкающееся вокруг лобовых частей (рис. 2) [3], состоит из катушечных групп, соединённых в две параллельные трёхфазные звезды с изолированными нулевыми точками, которые являются точками равного потенциала относительно напряжения на зажимах фаз. При питании зажимов фаз трёхфазным напряжением она создаёт вращающееся магнитное поле якоря. При питании нулевых точек трехфазных звёзд постоянным напряжением, которое может быть подано одновременно с напряжением на фазных зажимах, создаётся неподвижное униполярное поле возбуждения, замыкающееся вокруг лобовых частей через внешнезамкнутый магнитопровод.

В машине с такой обмоткой исключаются катушки обмотки возбуждения 1 и 2 (рис. 1). Недостатком являются высокие потери при создании поля возбуждения, обусловленные повышенным значением активного сопротивления вследствие увеличенной длины лобовых частей катушек с диаметральной шаг. Эти участки нагреваются наиболее сильно, теплосъём с них затруднён из-за отсутствия примыкания к магнитопроводу статора, что ограничивает допустимую плотность тока в проводах, а значит и мощность машины. Кроме того, выполнение шага катушек диаметральной приводит к существенному увеличению вылета лобовых частей, т.е. осевого габарита обмотки и машины в целом.

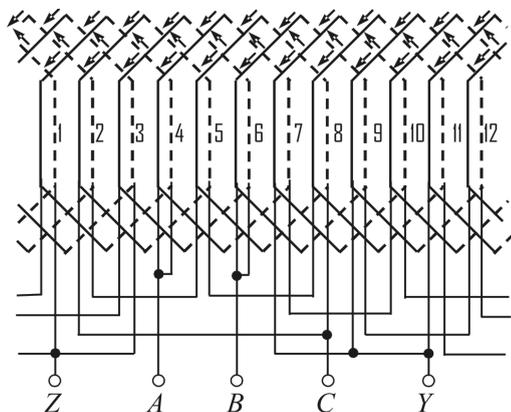


Рис. 2. Трёхфазно-однофазная четырёхполюсно-униполярная совмещённая обмотка одноимённо-полюсной индукторной машины

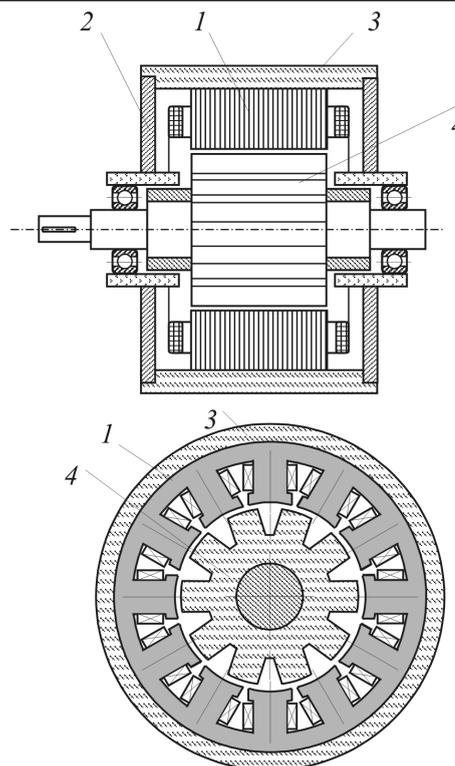


Рис. 3. Одноимённо-полюсная индукторная машина с электромагнитным возбуждением посредством совмещённой обмотки на явно выраженных полюсах обмотки статора

Меньшие потери на возбуждение и лучший теплоотвод от лобовых частей обеспечивает машина на рис. 3. Пакет статора машины имеет многофазную обмотку якоря из $2mp$ равномерно распределённых одинаковых катушек, где m – число фаз; p – число пар полюсов; катушки расположены на явно выраженных полюсных выступах пакета, по одной катушке на каждом выступе, у машины зубчатый ротор и внешне замкнутый магнитопровод для замыкания потока лобовых частей, создающих поток возбуждения в аксиально-радиальном направлении. Катушки обмотки соединены в две параллельные m -фазные звезды (рис. 4) с выводами нулевых точек, с согласным включением катушек в фазах каждой звезды при $p \geq 2$, с подключением к нулевой точке первой звезды начал катушек, а к нулевой точке второй звезды – концов катушек. Первая фаза первой звезды образована катушками с номерами $2N-1+2mK$, отсчитываемыми по окружности пакета статора, начиная от катушки, произвольно принимаемой за первую, где N – номер фазы, $K=0, 1, \dots, (p-1)$, а фазы второй звезды образованы катушками с чётными номерами.

В варианте машины с трёхфазной четырёхполюсной обмоткой общее число катушек составляет 12. Они соединены в две параллельные звезды с согласным включением катушек в фазах каждой звезды (рис. 4). Звёзды снабжены общими выводами одноимённых фаз A, B и C и отдельными выводами нулевых точек звёзд 01 и 02 , изолированных

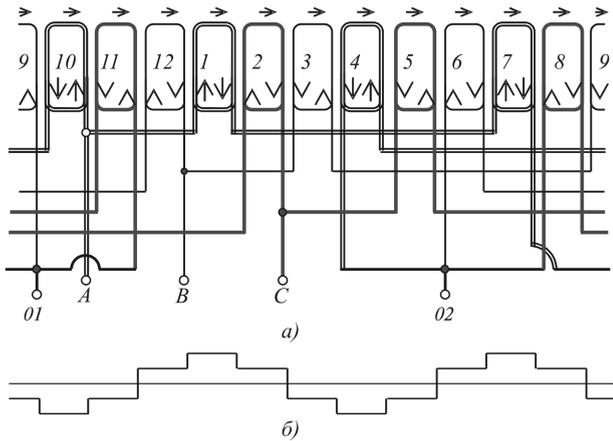


Рис. 4. Трёхфазно-однофазная четырёхполюсно-униполярная совмещённая обмотка одноимённо-полюсной индукторной машины (а) и интегральная кривая распределения МДС поля якоря (б)

друг от друга. Нулевая точка первой звезды 01 образована подключением к ней начал катушек ветвей фаз, нулевая точка второй звезды 02 образована подключением к ней концов катушек ветвей фаз.

Число зубцов Z на зубчатом магнитопроводе ротора 4 отличается от числа явно выраженных полюсных выступов N пакета 2 на число пар полюсов p , образованных обмоткой 1 . Как правило, оно меньше числа полюсных выступов $Z = N - p$, но возможно и превышение числа зубцов ротора над числом полюсных выступов на число пар полюсов p .

При питании зажимов A, B, C трёхфазным напряжением создаётся вращающееся $(2p=4)$ -полюсное поле. Интегральная кривая распределения его МДС поля (рис. 4,б) построена для момента времени, при котором ток фазы A равен удвоенному значению тока фаз B и C и противоположен им по направлению. Направление тока в пазах обозначено под их номерами стрелками и галочками соответственно для токов полного и половинного значения.

При питании нулевых точек 01 первой звезды и 02 второй звезды постоянным током вокруг лобовых частей катушек создаётся неподвижное поле неизменной полярности, поскольку ток во всех лобовых частях имеет одинаковое направление. Оно показано верхними стрелками в области лобовых частей катушек на рис. 4,а. При этом ток лобовых частей катушек с каждой стороны пакета статора 1 образует окружность, создающую неподвижное поле возбуждения.

Поле, созданное токами (по рис. 4,а) лобовых частей катушек с левой стороны, пересекает рабочий зазор b и замыкается в аксиально-радиальном направлении через пакет статора 1 , корпус 3 и детали внешнезамкнутого магнитопровода, те же, что и у двигателя на рис. 1.

Для уменьшения единичного углового перемещения при работе в шаговом приводе, а значит повышения точности позиционирования ротора, возможны варианты с гребенчатыми зубцовыми зонами на статоре [4].

Машина с совмещённой обмоткой может быть использована в одноимённо-полюсных индукторных двигателях в целях упрощения конструкции и уменьшения расхода обмоточной меди за счёт исключения отдельной обмотки возбуждения и конструктивных элементов, обеспечивающих её крепление внутри корпуса статора.

В отличие от других совмещённых обмоток рабочими сторонами катушек при создании потока возбуждения в рассмотренных обмотках являются их лобовые части, а не пазовые. Использование двигателей с такими обмотками совместно с двигателями с постоянными магнитами обеспечивает более широкие возможности регулирования их общего момента изменением тока возбуждения. При проектировании следует учитывать, что протекание фазного тока и тока возбуждения по одной и той же обмотке увеличивает в ней тепловыделение и приводит к повышенному нагреву. Поэтому пределы выбора линейной нагрузки

$$A = \frac{2mw_{\phi}i_1}{\pi D} \tag{1}$$

при проектировании должны быть скорректированы в меньшую сторону. В (1) m – число фаз обмотки; w_{ϕ} – число витков фазы; i_1 – ток фазы; D – диаметр расточки.

Электромагнитный момент индукторной машины с зубчатым ротором пропорционален переменной составляющей поля в зазоре. Она определяется разностью максимального и минимального значений потока при наибольшей магнитной проводимости зазора, т.е. при совпадении геометрических осей зубцов статора и ротора и наименьшей магнитной проводимости зазора при совпадении осей зубцов с осями пазов.

С учётом этого среднее значение электромагнитного момента, развиваемого при действии од-

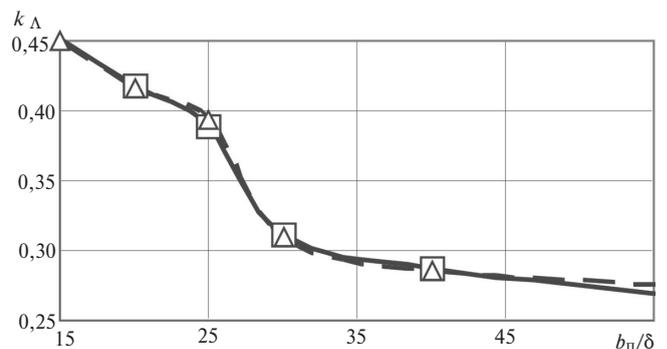


Рис. 5. Относительное значение проводимости зазора под пазом

ной фазы, можно выразить через токи фазы i_1 , контура возбуждения i_2 и амплитуду магнитной проводимости зазора под полюсами с катушками фазы Λ_m :

$$M = \frac{1}{2} i_1 i_2 \Lambda_m (1 - k_\Lambda) \frac{Z}{\pi}, \quad (2)$$

где Z – число зубцов на роторе; k_Λ – коэффициент, характеризующий уменьшение магнитной проводимости воздушного зазора по сравнению с максимальной проводимостью при повороте ротора на половину зубцового деления. Его удобно вычислить заранее для определённого диапазона значений точными численными методами в функции относительного по отношению к зазору открытия паза $b_{\text{п}}/\delta$ и использовать в виде расчётных кривых при проектировании.

Характеристики, рассчитанные методом конечных элементов на модели фрагмента зубцовой зоны (рис. 5), определены для пазов прямоугольной формы высотой, равной 60 % ширины открытия паза, и для пазов круглого профиля с прямоугольным участком. Размер прямоугольного участка составлял 20% открытия паза. Характеристики практически совпадают.

Подставляя в (2) расчётное значение момента из технического задания, с учётом (1) можно подобрать токи (МДС) обмотки при питании её относительно разных групп зажимов. Путём приравнивания двух выражений для машинной постоянной (Арнольда), электромагнитной и механической [5], определяется диаметр расточки [4]:

$$D^3 = \frac{6,388M}{\alpha_\delta k_B k_{\text{об}} \lambda A B_\delta}, \quad (3)$$

где $\alpha_\delta, k_B, k_{\text{об}}$ – коэффициенты полюсного перекрытия, формы поля и обмоточный; λ – относительная по отношению к диаметру длина ротора. Индукция в зазоре B_δ является функцией тока лобовых частей при питании обмотки от источника постоянного напряжения через группу зажимов 01–02. Ток, необходимый для её создания, подлежит оценке после определения диаметра и длины расточки по упрощённой схеме замещения, содержащей только линейные проводимости рабочего и нерабочего воздушных зазоров.

Ввиду того, что по единственной обмотке машины протекают и ток якоря, и ток возбуждения, удельная тепловая нагрузка от электрических потерь в обмотке Q подлежит обязательной оценке на стадии проектирования:

$$Q = \frac{1140r_\Phi \left(m i_1^2 + \frac{i_2^2}{m} \right)}{[1 + 0,004(T_{\text{нагр}} - 20)]\pi D_s l_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где r_Φ – активное сопротивление фазы; D_s – наружный диаметр статора; $l_{\text{ср}}$ – средняя длина витка. Под током возбуждения i_2 понимается общий ток через зажимы 01 и 02 от источника постоянного напряжения. Для изоляции класса нагревостойкости F допустимо не более $1500 \div 2000 \frac{\text{А}^2}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}$. При

использовании проводов с изоляцией классов нагревостойкости В и Н допустимые значения корректируются умножением на поправочный коэффициент 0,75 и 1,3 соответственно [6].

Несмотря на необходимость выбора меньшего значения линейной нагрузки для увеличения площади сечения проводов и пазов под обмотку и габаритов статора и машины в целом применение совмещённой обмотки может оказаться оправданным. Преимущества достигаются существенным упрощением конструкции, экономией изоляции и конструкционной стали, а также лучшими условиями теплопередачи вследствие хорошего примыкания сосредоточенных катушек к магнитопроводу статора. Наибольший положительный эффект от использования совмещённой обмотки следует ожидать в машинах с повторно-кратковременным режимом работы, в машинах, по условиям эксплуатации которых требуется кратковременная форсировка момента, а также при их работе на общий вал в одном механизме с магнитоэлектрическим двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учебное пос. для электромеханических и электроэнергетических вузов. М.: Высшая школа, 1985, 255 с.
2. Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины: Учебное пос. для электротехнических вузов. М.: Высшая школа, 1985, 231 с.
3. Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (спец. курс). М.: Изд-во Форум, 2015, 192 с.
4. Смирнов А.Ю., Зимин А.Ю. Проектирование одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе. – Электричество, 2015, № 2, с. 54–59.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980, 928 с.
6. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1984, 431 с.

[17.04.2019]

А в т о р ы: Смирнов Александр Юрьевич – доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, диссертацию защитил в 2001 г.

Каишканов Артём Олегович – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта.

Application of Integrated Windings in Homopolar Inductor Motors

SMIRNOV Alexander Yu. (*N. Novgorod State Technical University named R.Ye. Alekseyev, Russia*) — Associate Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KASHKANOV Artem O. (*Volga State University of Water Transport, N. Novgorod, Russia*) — Ph. D.-student

The article considers the design of a homopolar inductor machine excited from an integrated winding that concurrently produces the rotating armature magnetic field and the excitation field. The use of an integrated winding makes it possible to simplify the machine design, to decrease the consumption of insulation and structural steel, which simultaneously serves as part of the externally closed magnetic core for the passage of excitation flux in the axial-radial direction. The integrated winding distribution among the coil phases for the multiphase version is detailed, and the integral MMF distribution curve for the three-phase four-pole version of the winding is plotted. More accurate dependences for calculating the electromagnet torque of a motor with tooth structures on the rotor and stator are proposed that take into account the change of the gap permeance when the rotor is shifted by half the slot pitch. The torque values are substituted in the Arnold constant equations for determining the bore diameter in designing. A formula for estimating the thermal state of the machine with an integrated winding is given. A conclusion about the possible application fields of homopolar inductor motors with the integrated winding has been drawn: for operation in repeated short-term modes, when there is a need to force the torque, and when used in combination with a permanent-magnet machine on a common shaft.

Key words: inductor motor, integrated winding, externally closed magnetic core, tooth zone, stator bore, electromagnetic torque

REFERENCES

1. But D.A. *Beskontaktnye elektricheskiye mashiny* (Contactless electrical machines). Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 255 p.
2. Armenskiy E.V., Falk G.B. *Elektricheskiye mikromashiny* (Electrical micromachines). Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 231 p.
3. Smirnov A.Yu. *Inductornye mashiny. Proektirovaniye i vichislitel'nyi analiz (spets. kurs)* (Inductor machines. Design and computational analysis (special rate)). Moscow, Forum, 2015, 192 p.
4. Smirnov A.Yu., Zimin A.Yu. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No 2, pp. 54–59.
5. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energiya, 1980, 928 p.
6. Goldberg O.D., Gurin Ya.S., Sviridenko I.S. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* (Design of electric machines). Moscow, Vysshaya shkola, 1984, 431 p.

[17.04.2019]