

УДК 621.313.3

**ДВИГАТЕЛИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РЕДУКЦИЕЙ ЧАСТОТЫ
ВРАЩЕНИЯ С ВЕНТИЛЬНЫМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ****А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вяльцев***Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск*

В статье представлены конструктивные особенности двигателей с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием. Рассмотрен гармонический состав магнитного поля данных двигателей при использовании дробных зубцовых обмоток. Приведены аналитические выражения для магнитодвижущей силы обмотки и представлены данные рабочих гармоник для реактивных двигателей и двигателей с вентильным подмагничиванием при различном числе фаз. Описан принцип действия этих машин. Для расчета магнитного поля в воздушном зазоре использован метод гармонических проводимостей. В результате получены аналитические соотношения для распределения магнитного поля в воздушном зазоре и электромагнитного момента. После анализа полученных выражений в статье приведены условия, при выполнении которых происходит образование электромагнитного момента. Описание конструкции, принципа действия двигателей с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием проводится в наглядном сравнении с двигателями реактивного типа. При этом иллюстрируется лучшее использование активного объема машин с вентильным подмагничиванием. Помимо этого приведено сравнение двигателей с вентильным подмагничиванием по коэффициенту использования активного объема с классическими электрическими машинами (синхронными, асинхронными и машинами постоянного тока) для различных значений мощностей.

Ключевые слова: двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения, двигатели с вентильным подмагничиванием, дробные зубцовые обмотки, электромагнитный момент, магнитное поле, электрические двигатели.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-49-61

Введение

Двигатели, работа которых основана на притяжении ферромагнитных тел в магнитном поле, были известны еще в начале прошлого века. К таким двигателям относятся двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения реактивного типа (обмотки запитаны токами прямой последовательности) [1], с вентильным подмагничиванием ДЭР-В (ток обмоток содержит постоянную составляющую) [2], синхронные реактивные двигатели с зубчатым ротором без обмоток и зубчатым статором, обмотки которого питаются однополярными импульсами тока [1–4]. В зарубежной литературе они известны под аббревиатурой SRM (Switched Reluctance Motor) [3–7], у нас в стране их называют вентильно-индукторными – ВИД [8].

Так как сила притяжения не зависит от направления тока, наряду с более простой конструкцией ДЭР-В требуют и более простого преобразователя по сравнению с использованным в асинхронном приводе. Отмеченные обстоятельства объясняют природу интереса различных фирм к рассматриваемому классу двигателей и приводов, имеются проекты и даже выполненные образцы до 1000 кВт и выше.

Целью данной работы является представление процесса преобразования энергии в рассматриваемых двигателях с позиций общей теории электрических машин, а также все это подчеркивает необходимость получения основных соотношений, обеспечивающих создание моделей ДЭР-В, анализ и синтез которых проводится методами общей теории электромеханических преобразователей энергии.

1. Конструкция

ДЭР-В могут быть выполнены в трех-, четырех- и шестифазном исполнении. В данной работе рассматриваются шестифазные двигатели с вентильным подмагничиванием и показано их преимущество перед двигателями реактивного типа.

Преобразование энергии ДЭР-В определяется переменной составляющей проводимости воздушного зазора, которая зависит от геометрии зубцовой зоны двигателя, от величины зазора, от соотношения чисел зубцов статора и ротора и от числа фаз. Установлено, что глубина модуляции проводимости, определяющая рабочую гармонику при данной величине зазора, наименьшая в трехфазном и практически вдвое больше в шестифазном двигателе. В результате в последнем случае удастся получить вдвое большее значение момента с единицы объема, и это обстоятельство в большей мере компенсирует усложнение инвертора по сравнению с трехфазным.

На рис. 1 представлены магнитная система шестифазного ($m = 6$) двигателя и варианты схем включения двигателей реактивного типа и с вентильным подмагничиванием. Обмотка статора выполнена из отдельных катушек, размещенных на зубцах статора. Это так называемые дробные зубцовые обмотки с

$$q = \frac{z_1}{2pm} = \frac{c}{d} < 1,$$

где z_1 – число зубцов статора; p – число пар полюсов; m – число фаз; c, d – некоторые целые числа; $\frac{c}{d}$ – несократимая дробь. Вопросы теории этих обмоток изложены в [9].

Частота вращения ротора будет определяться известным соотношением

$$\omega_r = 2\pi f_1 / Z_2,$$

здесь f_1 – частота питающей сети; z_1 – число зубцов ротора.

В двигателях с вентильным подмагничиванием на действительном зубце также могут быть выполнены более мелкие зубцы. Получаемая структура соответствует так называемой гребенчатой зубцовой зоне. Этим самым повышается число элементарных зубцов ротора и снижается частота вращения ротора.

Обмотка может быть запитана системой токов прямой последовательности (синхронные реактивные двигатели, рис. 1, а) и системой токов, содержащей постоянную составляющую (синхронные двигатели с вентильным подмагничиванием, рис. 1, б). Ток фазы с постоянной составляющей может формироваться путем включения фаз по схеме, приведенной на рис. 1, в, путем подачи постоянного тока в нулевые точки полуфаз, либо же с помощью шестифазного инвертора, заменяющего вентили (рис. 1, б) и обеспечивающего аналогичное распределение тока фаз.

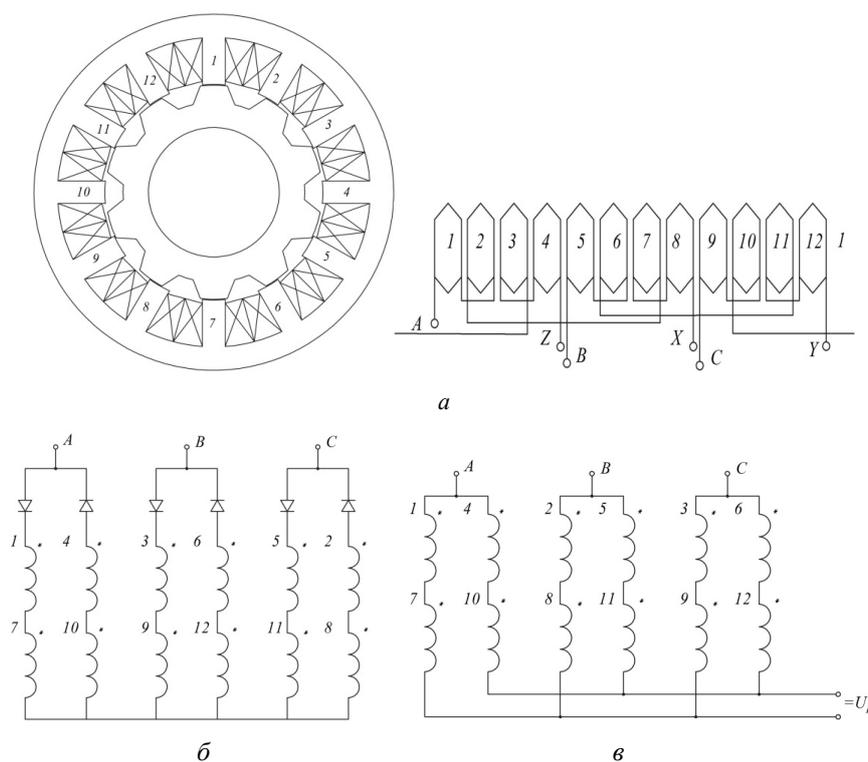


Рис. 1 – Конструкция двигателя и схемы обмоток двигателя:
 а – реактивного типа (обмотка с $q = 2/5$); б и в – с вентильным подмагничиванием
 (обмотка с $q = 1/2$)

Fig. 1 – Motor design and motor winding diagrams:
 a – a reluctance motor type (winding with $q = 2/5$), b and c – a motor with switched magnetization
 (winding with $q = 1/2$)

2. Принцип действия двигателя

Принцип действия двигателя может пояснить картина распределения магнитного поля, приведенная на рис. 2 (для реактивного двигателя и с вентильным подмагничиванием). Нетрудно заметить, что в обоих двигателях электромагнитный момент возникает благодаря разнице магнитных проводимостей по осям d и q . Причем движущий момент создается электромагнитными силами, действующими в области воздушного зазора, где производная от проводимости воздушно-го зазора по угловой координате положительна:

$$f = F_m^2 \frac{d\lambda}{d\alpha} \geq 0,$$

здесь F_m – магнитодвижущая сила в рассматриваемой точке воздушного зазора.

Таким образом, для получения максимального момента необходимо обеспечить магнитное поле в воздушном зазоре только в зонах, где производная от магнитной проводимости имеет один знак.

В реактивных двигателях, в отличие от двигателей с вентильным подмагничиванием, магнитное поле имеет место и в областях, где $d\lambda / d\alpha \leq 0$. Этот недостаток приводит к снижению электромагнитного момента двигателя. С этой точки

зрения синхронный двигатель с вентильным подмагничиванием предпочтителен, его движущий момент выше, так как у него отсутствует магнитное поле в областях воздушного зазора, где производная проводимости отрицательна.

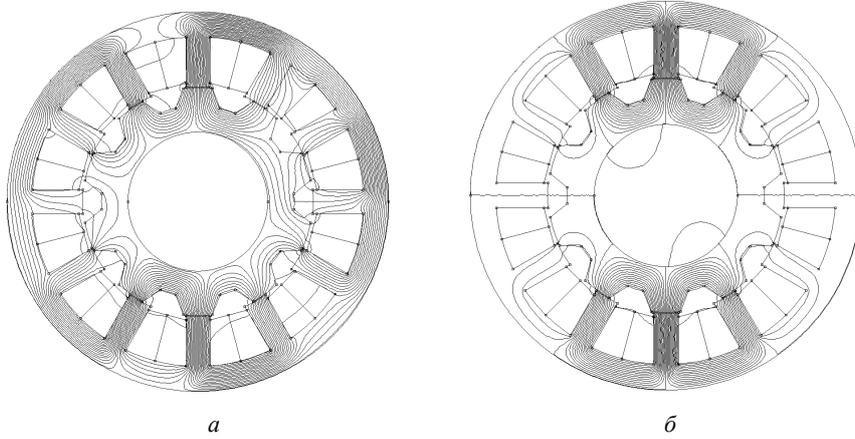


Рис. 2 – Распределение магнитного поля в двигателях:

a – реактивного типа (обмотка с $q = 2/5$), *б* – с вентильным подмагничиванием (обмотка с $q = 1/2$)

Fig. 2 – Magnetic field distribution in motors:

a – reluctance motor type (winding with $q = 2/5$); *b* – with switched magnetization (winding with $q = 1/2$)

Работу этих двигателей можно пояснить следующим образом. Модуляция магнитного потока в воздушном зазоре обеспечивается как переменной проводимостью воздушного зазора, так и дробными зубцовыми обмотками с $q < 1$, создающими две «сильные» гармоника магнитодвижущей силы (МДС) F_{1m} и F_{2m} с близкими, но не равными числами полюсов p_1 и p_2 , и вращающихся в противоположных направлениях с угловой частотой ω_1 .

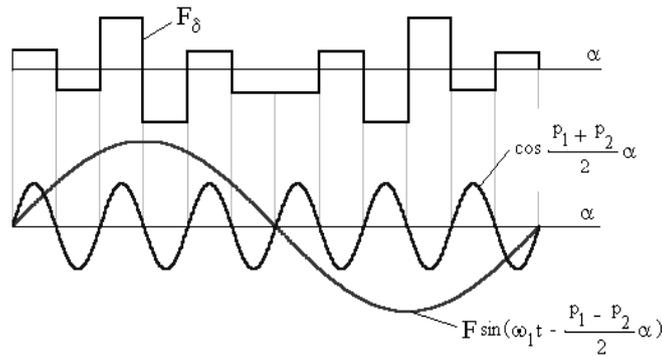


Рис. 3 – Распределение МДС в воздушном зазоре обмотки с $q = 2/5$ реактивного двигателя

Fig. 3 – Distribution of mmf in the winding air gap for reluctance motor with $q = 2/5$

Для двигателей реактивного типа результирующая МДС, созданная обмоткой, имеет вид

$$F_p = F_{1m} \sin(\omega_1 t - p_1 \alpha) + F_{2m} \sin(\omega_1 t + p_2 \alpha) \approx \\ \approx 2F_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{p_1 - p_2}{2} \alpha\right) \cos \frac{p_1 + p_2}{2} \alpha.$$

Полученное после замены суммы синусов произведение синуса и косинуса можно трактовать как произведение неподвижной и бегущей волн. На рис. 3 представлен характер изменения МДС F_δ зубцовой обмотки на одном периоде, а также представление ее в виде произведения неподвижной и бегущей волн МДС F_p , для обмотки с $q = 2/5$ (двигатель реактивного типа). Бегущая с угловой частотой волна модулирует неподвижную волну, в результате максимум результирующей МДС перемещается в пространстве также со скоростью ω_1 , не зависящей от числа полюсов рабочих гармоник. Синхронно с максимумом перемещается и явнополюсный ротор.

В двигателях с вентильным подмагничиванием постоянная составляющая тока, протекающая по обмотке (см. рис. 1, б), создает неподвижную в пространстве волну МДС с полюсностью p_0 :

$$F_0 = F_{0m} \cos(p_0 \alpha).$$

Нетрудно заметить, что полюсность неподвижной гармоники МДС p_0 равна

$$p_0 = \frac{p_1 + p_2}{2}.$$

Тогда результирующая МДС в двигателе с вентильным подмагничиванием распределена только на половине периода обмотки:

$$F_p = F_{1m} \sin(\omega_1 t - p_1 \alpha) + F_{2m} \sin(\omega_1 t + p_2 \alpha) + F_{0m} \cos(p_0 \alpha) = \\ = \cos(p_0 \alpha) \left[2F_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{p_1 - p_2}{2} \alpha\right) + F_{0m} \right].$$

Такое распределение приведено на рис. 4 для двигателя с обмоткой, имеющей $q = 1/2$. Модулирующая волна также перемещается с угловой частотой ω_1 , но распределена в пространстве с периодом 2α .

Приведенные распределения МДС на рис. 3 и 4 еще раз иллюстрируют физическую сторону причины лучшего использования активного объема в двигателях с вентильным подмагничиванием по сравнению с двигателями реактивного типа. В двигателях с вентильным подмагничиванием МДС распределена только на половине периода расточки статора в областях, где изменение проводимости от углового положения ротора положительно ($d\lambda/d\alpha > 0$), т. е. в этих двигателях нет зон на расточке статора, в которых образуются отрицательные электромагнитные силы.

Приведенные выше иллюстрации поясняют причину того, что максимум магнитного потока перемещается вдоль расточки статора с частотой ω_1 , не зависящей от числа полюсов рабочих гармоник. Синхронно с максимумом магнитного потока перемещается и явнополюсный ротор. Строгое доказательство этого приводится ниже.

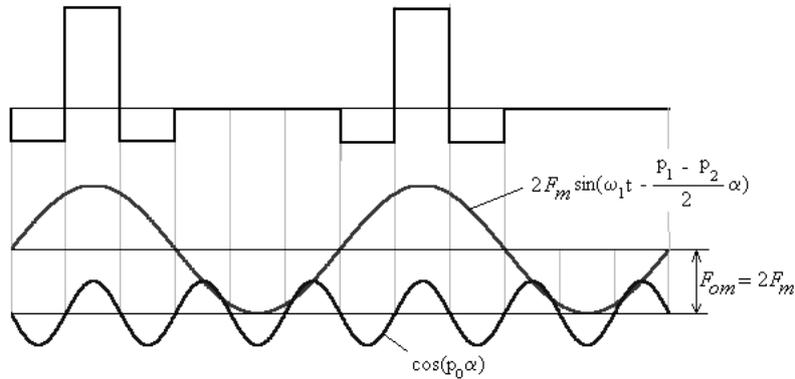


Рис. 4 – Распределение МДС обмотки с $q = 1/2$ шестифазного двигателя с вентильным подмагничиванием

Fig. 4 – Distribution of MMF of the winding for a switched magnetization six-phase motor with $q = 1/2$

Данные рабочих гармоник дробных зубцовых обмоток некоторых двигателей приведены в таблице [1].

Данные рабочих гармоник МДС некоторых двигателей
Data of the working harmonics of the MMF of some motors

	Реактивные	С вентильным подмагничиванием		
	$m = 3$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 6$
z_1	12	6	8	12
q	2/5	1	1	1/2
p_1	7	1	6	4
p_2	5	–	2	8
p_0	–	3	4	6

3. Магнитное поле и электромагнитный момент двигателя с вентильным подмагничиванием

Наибольшую роль при расчете любого электрического двигателя играет поле в области воздушного зазора. Зная величину и характер распределения магнитного поля в воздушном зазоре, можно определить все основные характеристики двигателя, включая момент и индуктивности обмоток.

Для расчета магнитного поля используем метод гармонических проводимостей [11]. Используя этот метод, можно получить простые аналитические соотношения для распределения магнитного поля в воздушном зазоре, для электромагнитного момента, которые позволяют проводить не только анализ, но и синтез двигателей.

Нормальную составляющую индукции в воздушном зазоре $B_\delta(\alpha)$ определим из известного приближенного выражения, полагая, что магнитная проницаемость стального магнитопровода равна бесконечности ($\mu = \infty$) [10]:

$$B_\delta(\alpha) = \lambda_\delta(\alpha) \sum_{v=0}^{\nu} F_v(\alpha),$$

здесь $F_\nu(\alpha)$ – амплитуда ν -й гармоники магнитодвижущей силы; $\lambda_\delta(\alpha)$ – удельная эквивалентная проводимость воздушного зазора.

Для исследования основных явлений в машинах с переменным магнитным сопротивлением в представленной ниже модели вместо реальных зубчатых структур статора и ротора рассматривается модель с гладким статором и явнополюсным ротором, которому соответствует эквивалентная удельная проводимость воздушного зазора, отражающая действительный пространственный характер распределения зубцовых проводимостей:

$$\lambda_\delta(\alpha) = \lambda_0 + \sum_1^k \lambda_k \cos[k(z_2\theta - n\alpha)], \quad (1)$$

здесь $\theta = \omega_r t - \theta_0$ – угол между осью фазы статора и осью максимальной проводимости воздушного зазора (осью d); α – текущая угловая координата, отсчитываемая от оси фазы статора; n – число периодов проводимости воздушного зазора $n = |Z_2 - Z_1|$; λ_0 и λ_k – постоянная и k -я переменная составляющие проводимости воздушного зазора.

Электромагнитный момент определим как результат взаимодействия гармоник вращающегося магнитного поля и соответствующих гармоник распределения поверхностной плотности тока [10]:

$$M_\varepsilon = \int_0^{2\pi} B(\alpha) j(\alpha) R d\alpha,$$

где $j(\alpha)$ – поверхностная плотность тока, соответствующая пространственному распределению МДС обмотки; R – радиус расточки статора.

Этот способ определения закона распределения магнитного поля и электромагнитного момента имеет большую наглядность и позволяет рассмотреть принцип работы электрических машин. Особенно это актуально на начальном этапе анализа электрических машин.

Поверхностный ток получается в результате замены зубчатого магнитопровода гладким и распределения тока каждого паза в виде тонкого слоя на поверхности магнитопровода [10]. Форма кривой плотности поверхностного тока непрерывно изменяется в соответствии с изменением тока в пазах.

Изменение плотности поверхностного тока вдоль расточки статора представим в виде производной МДС по углу поворота ротора α :

$$j = -\frac{dF}{Rd\alpha},$$

здесь $Rd\alpha$ – длина элемента поверхности.

Период изменения плотности поверхностного тока равен периоду изменения тока в пазах. При этом каждой гармонической МДС соответствует своя гармоническая плотности поверхностного тока.

Рассмотрим принцип действия двигателей с переменным магнитным сопротивлением, ограничившись в эквивалентной проводимости постоянной составляющей и первой гармоникой, а в магнитодвижущей силе обмотки – двумя основными гармониками, вращающимися в противоположных направлениях, и гармоникой от постоянной составляющей тока (1).

При питании однозубцовых обмоток двигателя по схеме (см. рис. 1, а) по катушкам, наряду с токами прямой последовательности, начинает протекать

и постоянная составляющая тока. Основные гармоники МДС, созданные током прямой последовательности и постоянной составляющей, приведены в таблице.

При переменном воздушном зазоре, изменяющемся по гармоническому закону (1), все эти гармоники участвуют в образовании электромагнитного момента.

Используя полученные выражения МДС для основных гармоник от постоянной составляющей тока и от токов прямой последовательности, найдем гармонический состав магнитного поля с учетом переменного воздушного зазора и рассмотрим механизм взаимодействия этих гармоник:

$$B_{\delta} = F_{\delta} \lambda_{\delta} = [F_{m1} \cos(\omega_1 t - p_1 \alpha) + F_{m2} \cos(\omega_1 t + p_2 \alpha) + F_0 \cos(p_0 \alpha)] [\lambda_0 + \lambda_1 \cos(z_2 \omega_r t - n \alpha)],$$

здесь p_0 – число пар полюсов МДС от постоянной составляющей тока.

После перемножения и преобразований получим

$$\begin{aligned} B_{\delta} = & \lambda_0 F_{mv1} \cos(\omega_1 t - p_1 \alpha) + \lambda_0 F_{mv2} \cos(\omega_1 t + p_2 \alpha) + F_0 \lambda_0 \cos(p_0 \alpha) + \\ & + 0,5 \lambda_1 F_{mv1} \cos(z_2 \omega_r t + \omega_1 t - n \alpha - p_1 \alpha) + \\ & + 0,5 \lambda_1 F_{mv1} \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n \alpha + p_1 \alpha) + \\ & + 0,5 \lambda_1 F_{mv2} \cos(z_2 \omega_r t + \omega_1 t - n \alpha + p_2 \alpha) + \\ & + 0,5 \lambda_1 F_{mv2} \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n \alpha - p_2 \alpha) + \\ & + 0,5 \lambda_1 F_0 \cos(z_2 \omega_r t - n \alpha + p_0 \alpha) + 0,5 \lambda_1 F_0 \cos(z_2 \omega_r t - n \alpha - p_0 \alpha). \end{aligned}$$

Рассмотрим электромагнитный момент двигателя с вентильным подмагничиванием как результат взаимодействия гармоник магнитного поля и соответствующих гармоник плотности поверхностного тока того же порядка.

В двигателях с вентильным подмагничиванием плотность поверхностного тока представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} j_v = & - \frac{dF_v}{R d\alpha} = j_{vm1} \cos(\omega_1 t - p_1 \alpha + \pi / 2) + \\ & + j_{vm2} \cos(\omega_1 t + p_2 \alpha + \pi / 2) + j_{vm0} \cos(p_0 \alpha + \pi / 2). \end{aligned}$$

Электромагнитный момент может быть определен как

$$\begin{aligned} M = & l_{\delta} R^2 \int_0^{2\pi} [j_{vm0} \cos(p_0 \alpha + \pi / 2) 0,5 \lambda_1 F_{mv1} \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n \alpha + p_1 \alpha) + \\ & + j_{vm0} \cos(p_0 \alpha + \pi / 2) 0,5 \lambda_1 F_{mv2} \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n \alpha - p_2 \alpha) + \\ & + j_{vm1} \cos(\omega_1 t - p_1 \alpha + \pi / 2) 0,5 \lambda_1 F_0 \cos(z_2 \omega_r t - n \alpha - p_0 \alpha) + \\ & + j_{vm2} \cos(\omega_1 t + p_2 \alpha + \pi / 2) 0,5 \lambda_1 F_0 \cos(z_2 \omega_r t - n \alpha + p_0 \alpha)] d\alpha = \\ & = \frac{1}{4} l_{\delta} R^2 \lambda_1 \int_0^{2\pi} (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8) d\alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 = & F_{mv1} j_{vm0} [\cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n \alpha + p_1 \alpha + p_0 \alpha + \pi / 2), \\ a_2 = & \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n \alpha + p_1 \alpha - p_0 \alpha - \pi / 2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_3 &= F_{mv2} j_{vm0} [\cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2 \alpha + p_0 \alpha + \pi / 2), \\
 a_4 &= \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2 \alpha - p_0 \alpha - \pi / 2), \\
 a_5 &= F_0 j_{vm1} [\cos(z_2 \omega_r t + \omega_1 t - n\alpha - p_1 \alpha - p_0 \alpha + \pi / 2), \\
 a_6 &= \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1 \alpha - p_0 \alpha - \pi / 2), \\
 a_7 &= F_0 j_{vm2} [\cos(z_2 \omega_r t + \omega_1 t - n\alpha + p_2 \alpha + p_0 \alpha + \pi / 2), \\
 a_8 &= \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2 \alpha + p_0 \alpha - \pi / 2)].
 \end{aligned}$$

После интегрирования соответствующих составляющих получим

$$M = \frac{\pi}{8} \lambda_1 l_\delta D^2 [j_{vm0} (F_{mv1} + F_{mv2}) + F_0 (j_{vm1} + j_{vm2})] \sin \theta_v. \quad (3)$$

В образовании электромагнитного момента участвуют a_2, a_3, a_6 и a_8 , полученные в (2) при выполнении условия

$$n = z_2 - z_1 = p_1 - p_0 = p_0 - p_2$$

и при частоте вращения ротора, определяемой выражением

$$\omega_r = \frac{\omega_1}{z_2}. \quad (4)$$

Составляющие a_1, a_4, a_5 и a_7 выражения (2), зависящие как от времени, так и от угла α , представляют собой дополнительные моменты, которые при частоте вращения ротора (4) образуют пульсирующие во времени моменты. Среднее их значение за период изменения тока равно нулю.

В случае, когда число зубцов статора больше числа зубцов ротора,

$$n = z_2 - z_1 = -(p_1 - p_0) = -(p_0 - p_2). \quad (5)$$

В образовании электромагнитного момента участвуют гармоники a_1, a_4, a_5 и a_7 при частоте вращения

$$\omega_r = -\frac{\omega_1}{z_2}, \quad (6)$$

а составляющие a_2, a_3, a_6 и a_8 дадут дополнительные пульсирующие во времени моменты.

Подставив в (3) значения плотностей поверхностного тока, получим следующее выражение электромагнитного момента:

$$M = \frac{\pi}{2} \lambda_1 l_\delta D F_0 [F_{mv1} (p_0 + p_1) + F_{mv2} (p_0 + p_2)] \sin \theta_v.$$

Аналогичное выражение получается и в случае образования электромагнитного момента другой группой гармоник, удовлетворяющих соотношению (5), но при частоте вращения ротора по (6).

4. Коэффициент использования активного объема машины

Коэффициент использования активного объема машины представляет собой отношение момента к активному объему машины

$$C_A = M / D^2 l \quad (7)$$

и позволяет оценить величину силы f_y , приходящейся на единицу поверхности расточки статора

$$f_y = 2C_A / \pi.$$

Анализ выражения (7) показывает, что значение f_y при индукции в зубце $B_z = 2$ Тл (большее значение ограничивается насыщением магнитной системы) и определенной геометрии воздушного зазора может достигать величины $f_y = 1,7...2$ Н/см².

Для классических машин магнитоэлектрического и индуктивного типа значение удельной силы существенно зависит от диаметра расточки машины D_a . Так, при $D_a \leq 80$ мм она лежит на уровне $0,5$ Н/см², по мере роста диаметра она растет практически линейно, достигая при диаметре $D_a = 400$ мм величины 3 Н/см².

Такая зависимость удельного показателя от диаметра в отмеченном классе машин объясняется необходимостью размещения токовых систем обмоток на роторе. В ДЭР-В такого ограничения нет, именно поэтому можно говорить о преимуществе данных машин над асинхронными и особенно машинами постоянного тока малой мощности (малого диаметра). Это преимущество с ростом мощности (диаметра) будет уменьшаться.

За двигателями с вентильным подмагничиванием остается преимущество, связанное с практическим отсутствием лобовых частей обмотки, возможность получения высоких скоростей за счет безобмоточного ротора, простота конструкции и технологии, хорошие регулировочные свойства. Успешное развитие силовой электроники при существенном снижении ее стоимости обеспечат широкое применение ДЭР-В.

Заключение

Пояснен принцип действия электрических машин с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием с единых позиций общей теории электрических машин.

Получено выражение электромагнитного момента и основные соотношения двигателей с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием.

Показано, что электродвигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения имеют явное преимущество перед двигателями реактивного типа

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А.Ф. Синхронные двигатели с переменным магнитным сопротивлением с дробными ($q < 1$) однозубцовыми обмотками // Научный вестник НГТУ. – 1997. – № 3. – С. 177–188.
2. Жуловян В.В., Шевченко А.Ф., Панарин А.Н. Синхронный редукторный двигатель с вентильным подмагничиванием для исполнительных электромеханизмов // Системы и устройства автоматики. – Красноярск, 1980. – С. 53–58.
3. Патент 4035680 США. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением / С.Р. Maeder. – Оpubл. 1978, Бюл. № 6.
4. Патент 2272519 Франция. Синхронный двигатель с магнитной редукцией / С. Maeder. – Оpubл. 19.12.75; публ. СССР 1977 г., Бюл. № 3.

5. **French I.R.** Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment // IEE Proceedings B. – 1984. – Vol. 131, N 5. – P. 209–219.
6. **Krishnan R., Arumugan R., Lindsay J.F.** Design procedure for switched-reluctance motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1988. – Vol. 24, N 3. – P. 456–461.
7. **Miles A.R.** Design of a 5 MW, 9000 V switched reluctance motor // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1991. – Vol. 6, N 3. – P. 484–491.
8. **Птах Г.К.** Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 23–33. – URL: <http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3-5.pdf> (дата обращения: 29.09.2021).
9. **Шевченко А.Ф.** Магнитодвижущие силы однозубцовых дробных обмоток с $q < 1$ // Научный вестник НГТУ. – 1996. – № 2. – С. 99–110.
10. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
11. **Вольдек А.И.** Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. – 1966. – № 7. – С. 46–52.

MOTORS WITH ELECTROMAGNETIC REDUCTION OF ROTATION FREQUENCY WITH SWITCHED MAGNETIZATION

Shevchenko A.F., Chestyunina T.V., Toporkov D.M., Vyaltcev G.B.,
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper presents design features of motors with electromagnetic reduction of rotation frequency with switched magnetization. The harmonic composition of the magnetic field of such motors is considered when using fractional slot windings. Analytical expressions for the magnetomotive force of the winding are given and data on operating harmonics for reluctance motors and motors with switched magnetization at different numbers of phases are presented. The principle of operation of such machines is described. The method of harmonic permeances was used to calculate the magnetic field in the air gap. As a result, analytical expressions were obtained for the distribution of the magnetic field in the air gap and the electromagnetic torque. After analyzing the expressions obtained, the paper presents the conditions under which the formation of an electromagnetic torque occurs. The design and the operation principle of motors with electromagnetic reduction of rotation frequency with switched magnetization is described and compared visually with reluctance motors. It illustrates a better use of the active volume in machines with switched magnetization. In addition, a comparison between motors with switched magnetization and classical electric machines (synchronous, induction and direct current machines) in terms of the utilization of an active volume factor for different power values is given.

Keywords: motors with electromagnetic reduction of rotation frequency, motors with switched magnetization, fractional slot windings, electromagnetic torque, magnetic field, electric motors.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-49-61

REFERENCES

1. Shevchenko A.F. Sinkhronnye dvigateli s peremennym magnitnym soprotivleniem s drobnymi ($q < 1$) odnozubtsovymi obmotkami [Synchronous motors with variable reluctance and fractional slot windings]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1997, no. 3, pp. 177–188.
2. Zhulovyan V.V., Shevchenko A.F., Panarin A.N. Sinkhronnyi reduktorny dvigatel' s ventilyonym podmagnichivaniem dlya ispolnitel'nykh elektromekhanizmov [Synchronous gear motor with valve magnetization for executive electromechanisms]. *Sistemy i ustroystva avtomatiki* [Automation systems and devices]. Krasnoyarsk, 1980, pp. 53–58.
3. Maeder C. *Variable reluctance motor*. Patent US, no. 4035680A, 1978.

4. Maeder C. *Motors having windings on the stator and a variable reluctance soft-iron rotor without windings*. Patent FR, no. 2272519, 1975.
5. French I.R. Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment. *IEE Proceedings B*, 1984, vol. 131, no. 5, pp. 209–219.
6. Krishnan R., Arumugan R., Lindsay J.F. Design procedure for switched-reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1988, vol. 24, no. 3, pp. 456–461.
7. Miles A.R. Design of a 5 MW, 9000 V switched reluctance motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, vol. 6, no. 3, pp. 484–491.
8. Ptakh G.K. Ventil'no-induktornyi reaktivnyi elektropriwod srednei i bol'shoi moshchnosti: zarubezhnyi i otechestvennyi opyt [Switched reluctance drive medium and high power: foreign and domestic experience]. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal = Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 23–33. Available at: <http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3-5.pdf> (accessed 19.09.2021).
9. Shevchenko A.F. Magnitodvizhushchie sily odnozubtsovykh drobnnykh obmotok s $q < 1$ [Magnetomotive forces of fractional slot windings with $q < 1$]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1996, no. 2, pp. 99–110.
10. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 928 p.
11. Vol'dek A.I. Issledovanie magnitnogo polya v vozdushnom zazore yavno-polyusnykh sinkhronnykh mashin metodom garmonicheskikh provodimostei [Investigation of the magnetic field in the air gap of single-pole synchronous machines by the method of harmonic conductivities]. *Elektrichestvo = Electrical Technology*, 1966, no. 7, pp. 46–52.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Шевченко Александр Федорович – родился в 1948 году, д-р техн. наук, профессор, профессор и заведующий кафедрой «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрические машины с дробными зубцовыми обмотками (с постоянными магнитами, с электромагнитной редуцией частоты вращения, индукторные). Опубликовано более 120 научных работ. (Адрес: Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: a.shevchenko@corp.nstu.ru).

Shevchenko Aleksandr Fedorovich (b. 1948) – Doctor of Sciences (Eng.), professor and head of the Electromechanics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electrical machines with fractional slot windings and permanent magnets and switch reluctant motors. He is the author of 120 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: a.shevchenko@corp.nstu.ru).



Честюнина Татьяна Викторовна – родилась в 1978 году, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрические машины с дробными зубцовыми обмотками, с постоянными магнитами. Опубликовано 16 научных работ. (Адрес: Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: chestyunina@corp.nstu.ru).

Chestyunina Tatiana Viktorovna (b. 1978) – PhD (Eng.), associate professor at the Electromechanics Department in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on electrical machines with fractional slot windings and permanent magnets. She is the author of 16 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: chestyunina@corp.nstu.ru).



Топорков Дмитрий Михайлович – родился в 1988 году, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: расчет и моделирование электрических машин. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).

Toporkov Dmitriy Mikhailovich (b. 1988) – PhD (Eng.), associate professor at the Electromechanics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on calculation and simulation of electrical machines. He is the author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).



Вяльцев Георгий Бенцианович – родился в 1986, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электромеханика, численные методы моделирования электрических машин. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: vyalcev@corp.nstu.ru).

Vyaltsev Georgy Bentsianovich (b. 1986) – PhD (Eng.), associate professor at the Department of Electromechanics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electromechanics and numerical methods for electrical machines modeling. He is the author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vyalcev@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 21 сентября 2021 г.
Received September 21, 2021*

To Reference:

Shevchenko A.F., Chestyunina T.V., Toporkov D.M., Vyaltsev G.B. Dvigateli s elektromagnitnoi reduktsiei chastoty vrashcheniya s ventil'nym podmagnichivaniem [Motors with electromagnetic reduction of rotation frequency with switched magnetization]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 4(53), pp. 49–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-49-61.