

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН С АКСИАЛЬНЫМ ПОТОКОМ

С.А. Ганджа
г. Челябинск, ЮУрГУ

THE ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC CAPACITY FOR VARIOUS DESIGNS OF VALVE CARS WITH THE AXIAL STREAM

S.A. Gandja
Chelyabinsk, South Ural State University

Приведены зависимости электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений и двух типов коммутации. Дан сравнительный анализ эффективности конструкций по величине развиваемого электромагнитного момента.

Ключевые слова: вентильный электропривод, вентильные машины с аксиальным зазором, эффективность.

Dependences of electromagnetic capacity for various designs and two types of switching are given. The comparative analysis of the efficiency of designs on size of the developed electromagnetic torque is given.

Keywords: valve electric drive, valve cars with axial gap, efficiency.

В настоящее время в диапазоне малых и средних мощностей все чаще применяются электроприводы на базе вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП). ВМАП настолько активно развиваются, что можно говорить о зарождении нового класса электроприводов. Практическая потребность в серийном освоении этих электрических машин определяет актуальность теоретических исследований по их анализу и оптимальному проектированию.

К настоящему времени на практике применяется большое количество конструктивных модификаций ВМАП [1]. Классификация наиболее часто применяемых конструкций представлена на рис. 1.

Некоторые конструктивные исполнения активных частей ВМАЗ с различными формами магнитов и катушек представлены на рис. 2-4.

Расчетные модели приведенных конструкций имеют особенности, обусловленные спецификой их геометрии. Выведем значения электромагнитного момента и электромагнитной мощности исполнений, приведенных на рис. 2-4.

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность для ВМАП с цилиндрическими магнитами и кольцевыми катушками

Определим электромагнитный момент фазы, в положении при котором он имеет максимальное значение. Это положение, при котором ось коль-

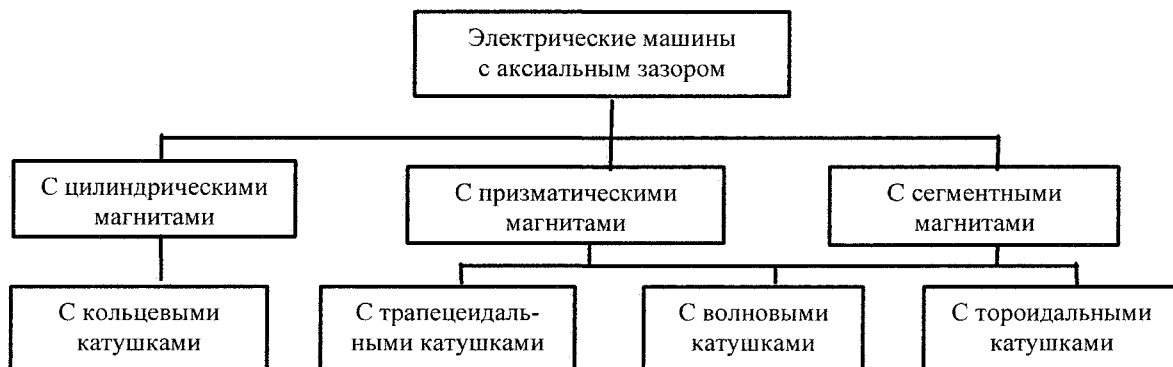


Рис. 1. Классификация ВМАП

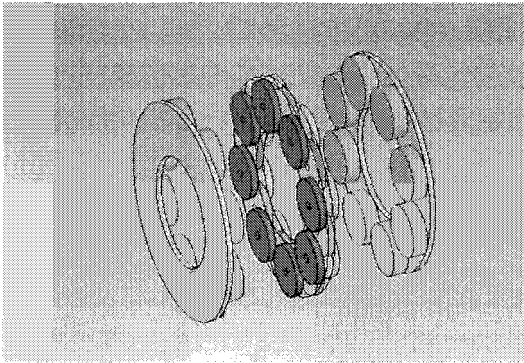


Рис. 2. Конструктивное исполнение ВМАП с цилиндрическими магнитами и кольцевыми катушками

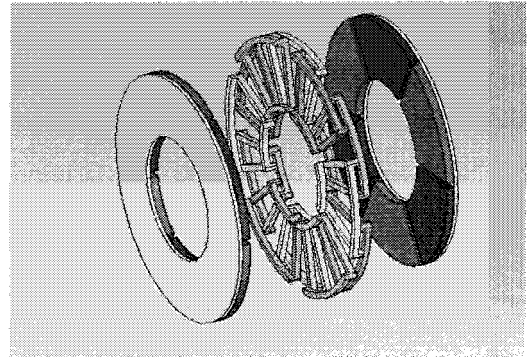


Рис. 3. Конструктивное исполнение ВМАП с сегментными магнитами и трапециевидными катушками

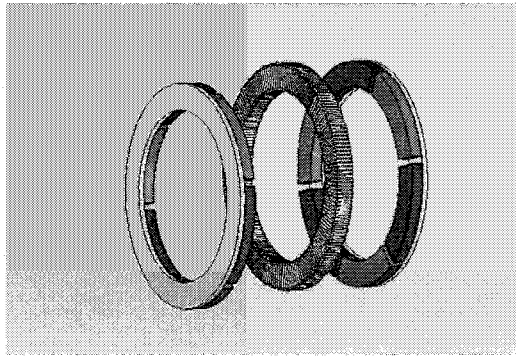


Рис. 4. Конструктивное исполнение ВМАП с сегментными магнитами и тороидальными катушками

ценой катушки совпадает с геометрической нейтралью. Эскиз магнитной системы и якорной обмотки представлен на рис. 5. Для облегчения ссылок на приведенные ниже зависимости обозначим данную конструкцию как модель 1.

Реальное значение магнитной индукции в зазоре заменим ее средним значением, полагая, что она не меняется в пределах полюсного деления.

Электромагнитный момент будут создавать только силы, направленные по оси X.

Элементарный моменту j -го витка.

$$dM_j = dM_{\alpha 1j} + dM_{\alpha 2j},$$

где

$$\begin{aligned} dM_{\alpha 1j} &= dF_{\alpha 1xy} (R_{cp} + r_{\theta j} \sin \alpha_1) = \\ &= i_a B_{cp} r_{\theta j} \cos \alpha_1 (R_{cp} + r_{\theta j} \sin \alpha_1) d\alpha_1; \\ dM_{\alpha 2j} &= dF_{\alpha 2xy} (R_{cp} + r_{\theta j} \sin \alpha_2) = \\ &= i_a B_{cp} r_{\theta j} \cos \alpha_2 (R_{cp} + r_{\theta j} \sin \alpha_2) d\alpha_2, \end{aligned}$$

здесь $dF_{\alpha 1xy}, dF_{\alpha 2xy}$ – элементарные силы, действующие на левую и правую половины витка;

R_{cp} – средний радиус кольца магнитной системы;

$r_{\theta j}$ – радиус j -го витка.

Момент j -го витка.

$$M_j = \int_0^{2\pi} (dM_{\alpha 1j} + dM_{\alpha 2j}) = i_a B_{cp} D_{cp} d_{\theta j},$$

где D_{cp} – средний диаметр кольца магнитной системы;

$d_{\theta j}$ – диаметр j -го витка.

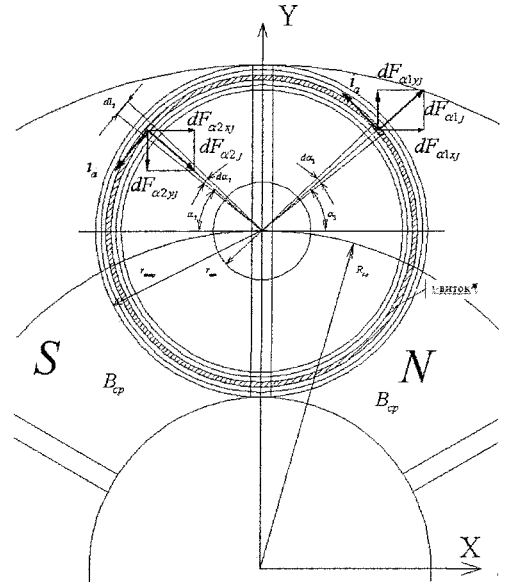


Рис. 5. Эскиз магнитной системы и обмотки якоря ВМАП с кольцевыми обмотками якоря

Максимальный момент фазы

$$M_{\max f \text{ mod } 1} = p \sum_{j=1}^{W_c} M_j = i_a B_{cp} D_{cp} d_{k. \text{cp}} p W_c.$$

где W_c – число витков в катушечной секции;

$d_{к.ср}$ – средний диаметр кольца катушечной секции.

Выразим средний диаметр кольца катушечной секции через толщину кольца магнитной системы

$$d_{к.ср} = \frac{L_{\kappa}}{2}.$$

Дополнительный анализ показал, что от угла поворота момент фазы меняется по закону косинуса:

$$M_{f \text{ mod } 1}(\gamma_{\text{эл}}) = M_{\max f \text{ mod } 1} \cos(\gamma_{\text{эл}}),$$

где $\gamma_{\text{эл}}$ – поворот якоря относительно индуктора в электрических градусах.

Определим максимальный электромагнитный момент машины для различных вариантов коммутации.

Для (180-180/m)-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\max \text{ mod } 1(180-180/m)} &= \\ &= M_{\max f \text{ mod } 1} \sum_{i=1}^{m-1} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right) = \\ &= \frac{1}{2} i_a B_{\text{ср}} D_{\text{ср}} L_{\kappa} p W_c \sum_{i=1}^{m-1} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right) = \\ &= \frac{\pi}{2} A_{\text{ср}} B_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\kappa} K_{\text{mod } 1(180-180/m)}, \end{aligned}$$

где $K_{\text{mod } 1(180-180/m)}$ – коэффициент модели 1 для (180-180/m)-градусной коммутации

$$K_{\text{mod } 1(180-180/m)} = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right)}{2m}.$$

Для 180-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\max \text{ mod } 1(180)} &= M_{\max f \text{ mod } 1} \sum_{i=1}^{m_c} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right) = \\ &= \frac{1}{2} i_a B_{\text{ср}} D_{\text{ср}} L_{\kappa} p W_c \sum_{i=1}^{m_c} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right) = \\ &= \frac{\pi}{2} A_{\text{ср}} B_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\kappa} K_{\text{mod } 1(180)}, \end{aligned}$$

где $K_{\text{mod } 1(180)}$ – коэффициент модели 1 для 180-градусной коммутации

$$K_{\text{mod } 1(180)} = \frac{\sum_{i=1}^{m_c} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right)}{2m}.$$

Физический смысл коэффициента модели заключается в определении доли, которую вкладывают фазы в создание максимального момента.

Определим средний электромагнитный момент и электромагнитную мощность для модели 1 при различных вариантах коммутации с учетом выведенных выше коэффициентов эффективности.

Для (180-180/m)-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\text{ср mod } 1(180-180/m)} &= \\ &= \frac{\pi}{2} A_{\text{ср}} B_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\kappa} K_{\text{mod } 1(180-180/m)} K_{\text{эф}(180-180/m)}, \\ P_{\text{эм mod } 1(180-180/m)} &= \\ &= \frac{\pi^2}{60} A_{\text{ср}} B_{\delta} n D_{\text{ср}}^2 L_{\kappa} K_{\text{mod } 1(180-180/m)} K_{\text{эф}(180-180/m)}, \end{aligned}$$

где n – частота вращения в об/мин.

Для 180-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\text{ср mod } 1(180)} &= \frac{\pi}{2} A_{\text{ср}} B_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\kappa} K_{\text{mod } 1(180)} K_{\text{эф}180}, \\ P_{\text{эм mod } 1(180)} &= \frac{\pi^2}{60} A_{\text{ср}} B_{\delta} n D_{\text{ср}}^2 L_{\kappa} K_{\text{mod } 1(180)} K_{\text{эф}180}. \end{aligned}$$

Теоретический интерес представляет выбор наиболее эффективного типа коммутации для модели 1 при одинаковых электромагнитных нагрузках и в одинаковых габаритах. Для количественной оценки введем коэффициент эффективности коммутации, как отношение электромагнитных мощностей (180-180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации:

$$\begin{aligned} K_{\text{эф. ком. mod } 1} &= \frac{P_{\text{эм. mod } 1(180-180/m)}}{P_{\text{эм. mod } 1(180)}} = \\ &= \frac{K_{\text{mod } 1(180-180/m)} K_{\text{эф}(180-180/m)}}{K_{\text{mod } 1(180)} K_{\text{эф}180}}. \end{aligned}$$

Графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз для наиболее характерного коэффициента полюсной дуги 0,7 приведена на рис. 6.

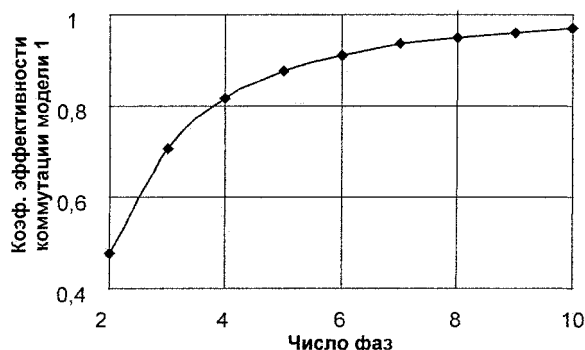


Рис. 6. Зависимость коэффициента эффективности коммутации для модели 1 при коэффициенте полюсной дуги 0,7

Анализ зависимости показывает, что для модели 1 180-градусная коммутация имеет существенное преимущество при малом числе фаз. При увеличении числа фаз это преимущество уменьшается.

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность для ВМАП с сегментными магнитами и трапецеидальными катушками

Эскиз магнитной системы и обмотки якоря ВМАП этой конструкции представлен на рис. 7. Обозначим эту конструкцию как модель 2.

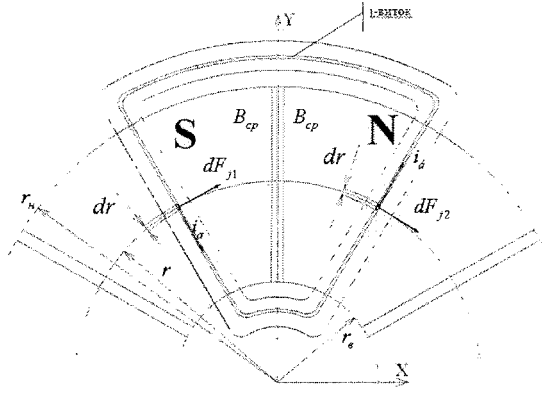


Рис. 7. Эскиз магнитной системы и обмотки якоря ВМАП с сегментными магнитами трапецеидальными обмотками якоря

Электромагнитный момент j -го витка

$$M_j = \int_{r_6}^{r_n} dM_{1j} + \int_{r_6}^{r_n} dM_{2j} = 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_6^2}{2}$$

Электромагнитный момент секции фазы

$$M_{w_c} = \sum_{j=1}^{w_c} M_j = 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_6^2}{2} w_c$$

Максимальное значение электромагнитного момента произвольной i фазы

$$M_{fi \max \text{mod} 2} = M_{w_c} p = 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_6^2}{2} w_c p$$

Анализ показывает, что для допущения о равномерном распределении магнитного поля в пределах полюсного деления со значением индукции B_{cp} для рассматриваемой конструкции все фазы в положении максимального момента будут вносить в него одинаковую долю. Поэтому, по аналогии с предыдущим анализом, можно принять:

– для (180-180/m)-градусной коммутации

$$K_{\text{mod} 2(180-180/m)} = 1;$$

– для 180-градусной коммутации

$$K_{\text{mod} 2(180)} = 1,$$

где $K_{\text{mod} 2(180-180/m)}$ – коэффициент модели 2 для (180-180/m)-градусной коммутации;

$K_{\text{mod} 2(180)}$ – коэффициент модели 2 для 180-градусной коммутации;

Максимальный электромагнитный момент для (180-180/m)-градусной коммутации

$$M_{\max \text{mod} 2(180-180/m)} = \sum_{i=1}^{m-1} M_{fi \max \text{mod} 2} K_{\text{mod} 2(180-180/m)} =$$

$$= 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_6^2}{2} w_c p K_{\text{mod} 2(180-180/m)} =$$

$$= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod} 2(180-180/m)}$$

Максимальный электромагнитный момент для 180-градусной коммутации

$$M_{\max \text{mod} 2(180)} = \sum_{i=1}^m M_{fi \max \text{mod} 2} K_{\text{mod} 2(180)} =$$

$$= 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_6^2}{2} w_c p K_{\text{mod} 2(180)} =$$

$$= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod} 2(180)}$$

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для (180-180/m)-градусной коммутации

$$M_{cp \text{mod} 2(180-180/m)} =$$

$$= M_{\max \text{mod} 2(180-180/m)} K_{к.эф}(180-180/m) =$$

$$= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod} 2(180-180/m)} K_{к.эф}(180-180/m)$$

$$P_{эм \text{mod} 2(180-180/m)} =$$

$$= \frac{\pi^2}{60} A_{cp} B_{cp} n D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod} 2(180-180/m)} K_{к.эф}(180-180/m)$$

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для 180-градусной коммутации

$$M_{cp \text{mod} 2(180)} = M_{\max \text{mod} 2(180)} K_{к.эф} 180 =$$

$$= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod} 2(180)} K_{к.эф} 180$$

$$P_{эм \text{mod} 2(180-180/m)} =$$

$$= \frac{\pi^2}{60} A_{cp} B_{cp} n D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod} 2(180)} K_{к.эф} 180$$

По аналогии с предыдущим анализом для количественной оценки введем коэффициент эффективности коммутации, как отношение электромагнитных мощностей (180-180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации:

$$K_{эф.ком \text{mod} 2} = \frac{P_{эм \text{mod} 2(180-180/m)}}{P_{эм \text{mod} 2(180)}}$$

$$= \frac{K_{\text{mod} 2(180-180/m)} K_{эф.(180-180/m)}}{K_{\text{mod} 2(180)} K_{эф.180}}$$

Графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз для коэффициента полюсной дуги 0,7 совпадает кривой, представленной на рис. 6.

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность для ВМАП с сегментными магнитами и тороидальными катушками

Эскиз магнитной системы и обмотки якоря ВМАП этой конструкции представлен на рис. 8. Обозначим эту конструкцию как модель 3.

Выделим на произвольном j -м витке обмотки элементарный проводник длиной dr и определим для него элементарный момент.

$$dM_j = i_a B_{cp} r dr,$$

Электромагнитный момент j -го витка

$$M_j = \int_{r_6}^{r_n} dM_j = 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_6^2}{2}$$

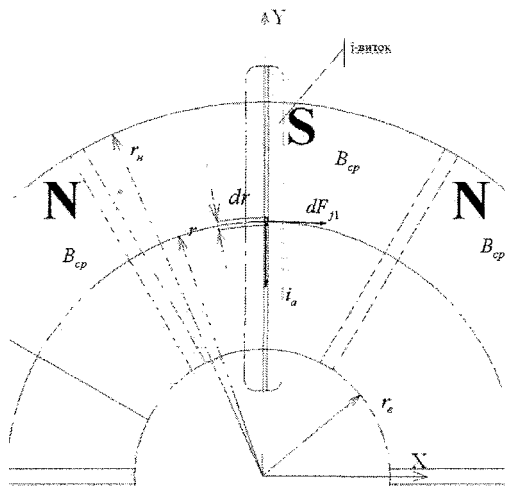


Рис. 8. Эскиз магнитной системы и обмотки якоря ВМАП с сегментными магнитами тороидальными обмотками якоря

Электромагнитный момент секции фазы

$$M_{w_c} = \sum_{j=1}^{w_c} M_j = 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_b^2}{2} w_c.$$

Максимальное значение электромагнитного момента произвольной i фазы

$$M_{fj \max \text{mod}3} = M_{w_{cc}} 2p = 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_b^2}{2} w_c 2p.$$

По аналогии с анализом для модели 2 можно сделать заключение, что для рассматриваемой конструкции все фазы в положении максимального момента будут вносить в него одинаковую долю. С учетом того, что обе стороны витка создают положительный момент в пределах одного полюса, для коэффициентов модели 3 можно принять следующие значения:

– для (180-180/m)-градусной коммутации

$$K_{\text{mod}3(180-180/m)} = 2;$$

– для 180-градусной коммутации

$$K_{\text{mod}3(180)} = 2.$$

Максимальный электромагнитный момент для (180-180/m)-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\max \text{mod}3(180-180/m)} &= \sum_{i=1}^{m-1} M_{fj \max \text{mod}3} K_{\text{mod}3(180-180/m)} = \\ &= 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_b^2}{2} w_c p K_{\text{mod}3(180-180/m)} = \\ &= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}3(180-180/m)}. \end{aligned}$$

Максимальный электромагнитный момент для 180-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\max \text{mod}3(180)} &= \sum_{i=1}^m M_{fj \max \text{mod}3} K_{\text{mod}3(180)} = \\ &= 2i_a B_{cp} \frac{r_n^2 - r_b^2}{2} w_c p K_{\text{mod}2(180)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}3(180)}. \end{aligned}$$

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для (180-180/m)-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\text{ср. mod}3(180-180/m)} &= M_{\max \text{mod}3(180-180/m)} K_{\text{к.эф}(180-180/m)} = \\ &= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}3(180-180/m)} K_{\text{к.эф}(180-180/m)}. \\ P_{\text{эм mod}3(180-180/m)} &= \\ &= \frac{\pi^2}{60} A_{cp} B_{cp} n D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}3(180-180/m)} K_{\text{к.эф}(180-180/m)}. \end{aligned}$$

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для 180-градусной коммутации

$$\begin{aligned} M_{\text{ср. mod}3(180)} &= M_{\max \text{mod}3(180)} K_{\text{к.эф}180} = \\ &= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}3(180)} K_{\text{к.эф}180}. \\ P_{\text{эм. mod}3(180-180/m)} &= \frac{\pi^2}{60} A_{cp} B_{cp} n D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}3(180)} K_{\text{к.эф}180}. \end{aligned}$$

По аналогии с предыдущим анализом для количественной оценки введем коэффициент эффективности коммутации, как отношение электромагнитных мощностей (180-180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации:

$$\begin{aligned} K_{\text{эф.ком. mod}3} &= \frac{P_{\text{эм mod}3(180-180/m)}}{P_{\text{эм mod}3(180)}} = \\ &= \frac{K_{\text{mod}3(180-180/m)} K_{\text{эф}(180-180/m)}}{K_{\text{mod}3(180)} K_{\text{эф}180}}. \end{aligned}$$

Графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз для коэффициента полюсной дуги 0,7 совпадает кривой, представленной на рис. 6.

Сравнительный анализ конструкций при (180-180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации

Приведенный анализ позволяет оценить модели 1, модели 2 и модели 3 с точки зрения развития электромагнитного момента в одинаковых габаритах при одинаковых электромагнитных нагрузках: модель 2 эффективнее модели 1, а модель 3 эффективнее модели 2 и соответственно модели 1. Практический интерес представляет количественный анализ этой эффективности.

Проведем этот анализ по следующей методике: для фиксированного числа фаз определим отношение электромагнитных мощностей для различных моделей и различных вариантов коммутации. Результаты сведем в таблицу.

В табл. 1 приведено сравнение моделей для варианта:

- коэффициент полюсной дуги 0,8;
- число фаз 3;
- коммутация 120-градусная.

Из таблицы видно, что самая эффективная модель 3 в одинаковых габаритах и с одинаковыми электромагнитными нагрузками развивает электромагнитный момент в 2 раза больший, чем модель 2 и 3,466 раза больший, чем модель 1.

Таблица 1

Сравнение эффективности моделей по развиваемому электромагнитному моменту для 120-градусной коммутации

Сравнение 3-фазных моделей для 120-градусной коммутации (коэф. пол. дуги 0,8)		Модель, с которой сравнивают		
		Модель 1	Модель 2	Модель 3
Модель, которую сравнивают	Модель 1	1	0,577	0,288
	Модель 2	1,733	1	0,5
	Модель 3	3,466	2	1

Таблица 2

Сравнение эффективности моделей по развиваемому электромагнитному моменту для 180-градусной коммутации

Сравнение 3-фазных моделей для 120-градусной коммутации		Модель, с которой сравнивают		
		Модель 1	Модель 2	Модель 3
Модель, которую сравнивают	Модель 1	1	0,667	0,333
	Модель 2	1,499	1	0,5
	Модель 3	3	2	1

В табл. 2 приведено аналогичное сравнение для 180-градусной коммутации. Приведенные таблицы удобно использовать на практике для выбора конструкции и типа коммутации в зависимости от проектной ситуации.

Выводы

1. По развиваемой электромагнитной мощности наиболее эффективной является модель 3 в одинаковых габаритах и с одинаковыми электромагнитными нагрузками для всех типов коммутации.

2. Для всех моделей наиболее эффективной является 180-градусная коммутация для любого

количества фаз и при любом значении полюсной дуги.

3. Для увеличения электромагнитной мощности магнитную систему надо выполнять с максимально возможным значением коэффициента полюсной дуги.

Литература

1. Ганджа, С.А. Вентильные электрические машины постоянного тока с аксиальным зазором. Анализ и синтез / С.А. Ганджа // Сб. тр. пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD FEMGmbH, 2005. - С. 372-376.

Поступила в редакцию 25.05.2010 г.

Ганджа Сергей Анатольевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и электромеханических систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов - разработка вентильных электроприводов постоянного тока. Контактный телефон: 8 (351) 267-90-57.

Sergey Anatolevich Gandja is Cand.Sc. (Engineering), Assistant Professor of the Electromechanics and Electromechanical Systems Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: design of valve electric drives with direct current. Tel.: 8 (351) 267-90-57.