

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОММУТАЦИИ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ДЛЯ ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ЧИСЛЕ ФАЗ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ

С.А. Ганджа

(Южно-Уральский государственный университет)

Приведены зависимости электромагнитного момента и коэффициента эффективности якорной обмотки для двух типов двухполупериодной коммутации при произвольном числе фаз. Дан сравнительный анализ типов коммутации. Доказано преимущество 180-градусной коммутации по развиваемому электромагнитному моменту.

Ключевые слова: вентильный электропривод, вентильные машины с аксиальным зазором, коммутация вентильных машин.

Введение

Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком (ВМАП) являются новым классом электротехнических изделий, который активно развивается на отечественном и зарубежном рынках. Электроприводы на базе этих машин находят широкое применение как в системах общепромышленного применения, так и в системах специального назначения (космос, медицина, робототехника, вооружение).

ВМАП имеют различные варианты исполнения. Наиболее часто применимые конструктивные модификации представлены на рис.1.

Расширяющиеся потребности промышленного производства заставляют развивать теоретические исследования этих изделий в различных направлениях, в частности, в направлении повышения надёжности. Одним из эффективных способов повышения надёжности является увеличение числа фаз якорной обмотки. В связи с этим актуальной является задача теоретического исследования коммутации ВМАП для произвольного числа фаз.

Под коммутацией вентильной машины следует понимать подключение к внешней цепи и отключение от внешней цепи фаз обмотки якоря электронными ключами в периоды времени, когда создание электромагнитного момента наиболее выгодно. По характеру протекания тока коммутации подразделяются на однополупериодные, когда ток

в секциях фазы протекает только в одном направлении, и двухполупериодные, когда ток протекает в обоих направлениях.

Однополупериодная коммутация требует для своей работы более простой электронный коммутатор с меньшим числом силовых ключей, но при этом привод в целом имеет худшую энергетику за счёт менее эффективного использования меди якоря. В связи с этим из нижеприведённого анализа этот вид коммутации исключён.

Коммутации различают по периоду подключения фазы на межкоммутационном интервале. Когда фаза якоря проходит без коммутации все полюсное деление, говорят о 180-градусной коммутации. Если фаза подключается, когда она полностью зашла под полюсное деление, и отключается, когда она подошла к границе другого полюсного деления, то говорят о $(180 - 180/m)$ -градусной коммутации (где m – число фаз).

На практике наибольшее распространение получили вентильные электрические машины в трёхфазном исполнении, работающие при двухполупериодной 120-градусной коммутации. Этот тип коммутации достаточно хорошо исследован.

Анализ $(180 - 180/m)$ -градусной коммутации для ВМАП с произвольным числом фаз

Для анализа коммутации определим взаимодействие фаз с магнитным полем постоянных магнитов при различных положениях якоря и индуктора

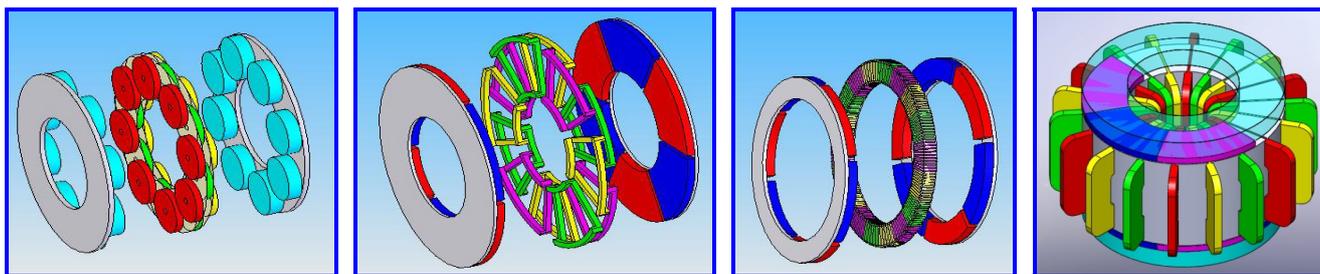


Рис. 1. Конструктивные исполнения ВМАП

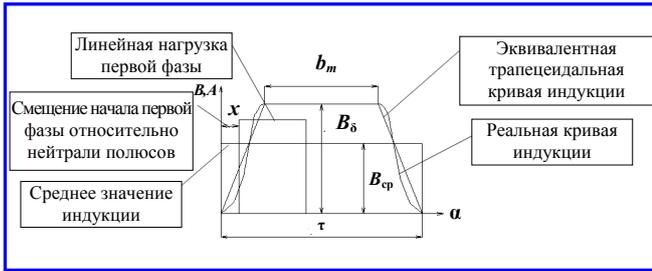


Рис. 2. Представление индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки

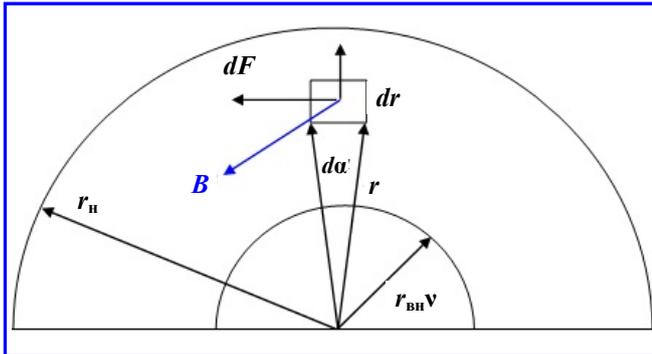


Рис. 3. Эскиз обобщённой аксиальной машины

друг относительно друга. При этом реальное распределение индукции в воздушном зазоре заменим трапецеидальным с эквивалентной амплитудой.

Под коэффициентом полюсной дуги будем понимать отношение

$$\alpha_\delta = \frac{b_m}{\tau},$$

где b_m – ширина полюса; τ – полюсное деление.

Линейную нагрузку проводников фазы представим в виде прямоугольников по ширине равных фазной зоне, а по амплитуде – средней линейной нагрузке фазы (рис. 2). Анализ проведём для относительных величин, приняв за базовое значение амплитуду индукции и среднюю линейную нагрузку на среднем диаметре аксиальной машины. Такое представление электрической машины для анализа следует признать традиционным [1].

Выведем уравнение электромагнитного момента для обобщённой аксиальной машины, представляющей собой диск с распределенным токовым слоем, который пронизывается магнитным потоком (рис. 3).

На рис. 4 представлена диаграмма различных положений витков с током на межкоммутационном интервале для двух полюсных делений и моменты подключения и отключения соответствующих фаз.

Уравнение элементарного электромагнитного усилия, действующего на бесконечно малый участок обобщённой аксиальной машины, на основа-

нии закона Ампера можно записать в следующем виде

$$dF = Bdidr,$$

где B – индукция элементарного участка; di – ток элементарного участка; dr – длина элементарного участка.

Для элементарного момента можно записать уравнение

$$dM = rdF = Brdidr, \quad (1)$$

где r – радиус расположения элементарного участка.

Представим индукцию как произведение амплитуды индукции в воздушном зазоре на относительную функцию изменения индукции в пределах полюсного деления:

$$B = B_\delta B(\alpha_{эл}), \quad (2)$$

где $\alpha_{эл}$ – угловая координата в электрических градусах.

По аналогии с индукцией, выразим функцию линейной нагрузки на среднем радиусе диска обобщённой аксиальной машины в зависимости от полюсного деления

$$A(x) = A_{cp} A_i(\alpha_{эл}, x),$$

где A_{cp} – амплитуда линейной нагрузки на среднем радиусе диска; $A_i(\alpha_{эл}, x)$ – относительная функция изменения линейной нагрузки для i -й фазы в пределах полюсного деления в электрических градусах; x – смещение начала первой фазы относительно нейтрали полюсов.

С учётом того, что между геометрическими и электрическими градусами существует соотношение

$$\alpha = 2p\alpha_{эл},$$

где $2p$ – число полюсов обобщённой аксиальной машины, выражение для тока элементарного участка можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} di(x) &= \frac{2\pi r_{cp} A_{cp} A_i(\alpha_{эл}, x)}{2\pi r} r 2pd\alpha_{эл} = \\ &= 2\pi r_{cp} A_{cp} A_i(\alpha_{эл}, x) d\alpha_{эл}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1) получим выражение для электромагнитного момента элементарного участка, который создает i -я фаза:

$$dM_{fi}(x) = 2\pi r_{cp} A_{cp} B_\delta B(\alpha_{эл}, x) r dr d\alpha_{эл}. \quad (4)$$

Для определения момента i -й фазы возьмём интеграл по поверхности диска обобщённой аксиальной

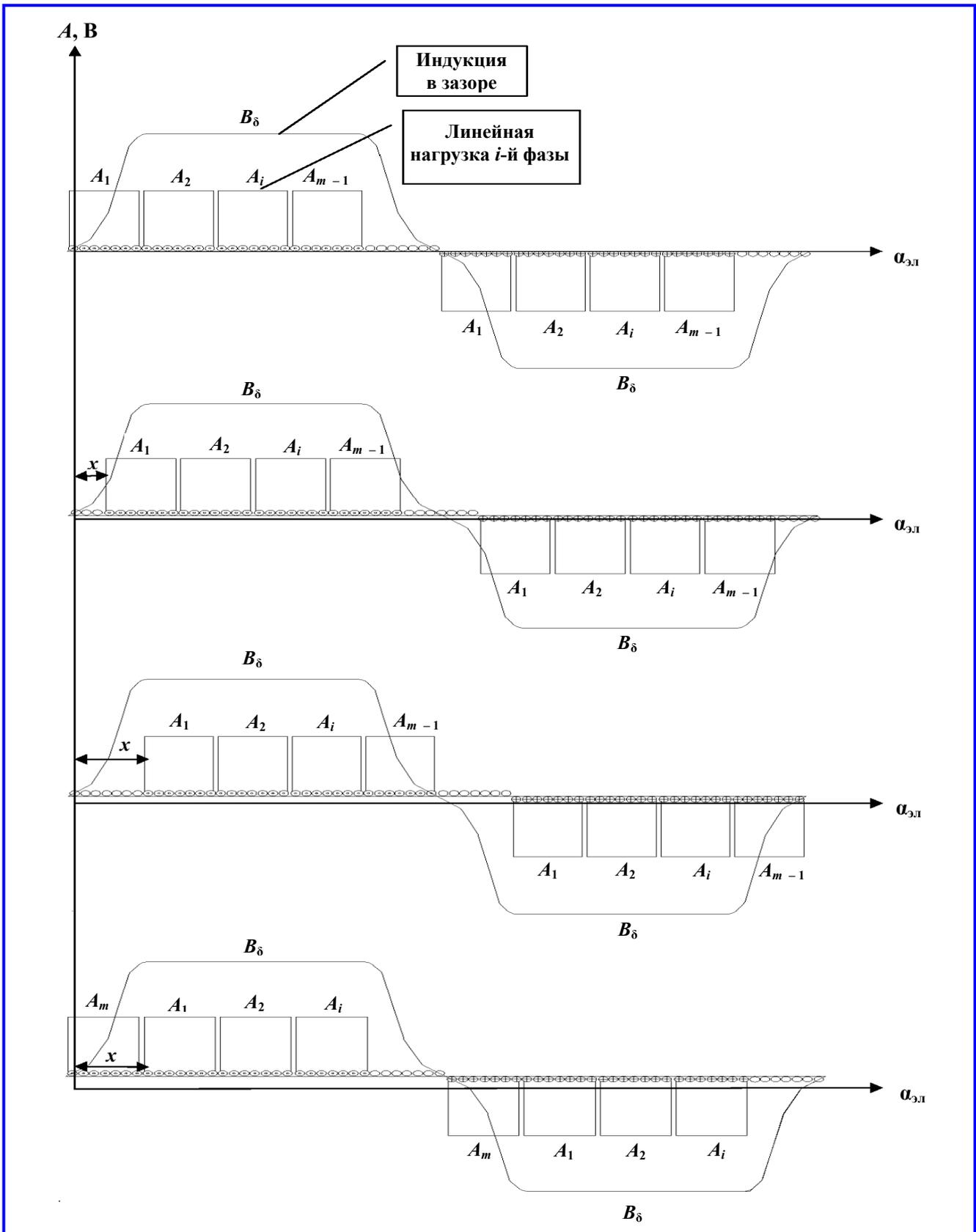


Рис. 4. Диаграмма переключения секций при двухполупериодной $(180 - 180/m)$ -градусной коммутации в положениях: *a* – подключения первой фазы; *б* – максимального момента; *в* – перед отключением фазы с номером $(m - 1)$; *г* – подключения фазы с номером m и отключения фазы с номером $(m - 1)$

машины:

$$M_{fi}(x) = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{н}}} \int_0^{2\pi} dM_{fi}(x) =$$

$$= 2pr_{\text{cp}} B_{\delta} A_{\text{cp}} \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{н}}} \int_0^{\pi_{\text{эл}}} B(\alpha_{\text{эл}}) A_i(\alpha_{\text{эл}}) r dr d\alpha_{\text{эл}} = \quad (5)$$

$$= \frac{p}{2} B_{\delta} A_{\text{cp}} D_{\text{cp}}^2 L_{\text{к}} B(\alpha_{\text{эл}}) A_i(\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}},$$

где D_{cp} – средний диаметр кольца обобщенной аксиальной машины; $L_{\text{к}}$ – толщина кольца обобщенной аксиальной машины.

За базовое значение момента примем выражение

$$M_{\delta} = \frac{p}{2} B_{\delta} A_{\text{cp}} D_{\text{cp}}^2 L_{\text{к}}. \quad (6)$$

Тогда зависимость относительного момента от смещения якоря относительно индуктора x для i -й фазы будет иметь вид

$$M_{fi}^*(x) = \int_0^{\pi_{\text{эл}}} B(\alpha_{\text{эл}}) A_i(\alpha_{\text{эл}}, x) d\alpha_{\text{эл}}. \quad (7)$$

Разложим функцию индукции и линейной нагрузки в гармонический ряд. Учтём при этом симметрию кривых относительно координатных осей [2].

Относительное значение индукции в воздушном зазоре:

$$B(\alpha_{\text{эл}}) = \sum_{n=1}^k a_n \sin(n\alpha_{\text{эл}}); \quad (8)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi_{\text{эл}}} \left(\int_0^{\frac{\pi_{\text{эл}}(1-\alpha_{\delta})}{2}} \frac{2\alpha_{\delta}}{\pi_{\text{эл}}(1-\alpha_{\delta})} \sin(n\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}} + \right.$$

$$+ \int_{\frac{\pi_{\text{эл}}(1-\alpha_{\delta})}{2}}^{\frac{\pi_{\text{эл}}(1-\alpha_{\delta})}{2} + \pi\alpha} \sin(n\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}} + \quad (9)$$

$$\left. + \int_0^{\frac{\pi_{\text{эл}}(1-\alpha_{\delta})}{2}} \frac{2(1-\alpha_{\delta})}{\pi_{\text{эл}}(1-\alpha_{\delta})} \sin(n\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}} \right),$$

где k – число членов гармонического ряда.

Относительное значение линейной нагрузки i -й фазы:

$$A_i(\alpha_{\text{эл}}, x) = \sum_{n1=1}^{k1} (a1_{n1}(i, x) \sin(n1\alpha_{\text{эл}}) + b1_{n1}(i, x) \cos(n1\alpha_{\text{эл}})); \quad (10)$$

$$a1_{n1}(i, x) = \frac{1}{\pi_{\text{эл}}} \left(\int_{-\pi_{\text{эл}} + (i-1)\frac{\pi_{\text{эл}}}{m}}^{-\pi_{\text{эл}} + i\frac{\pi_{\text{эл}}}{m} + x} (-1) \sin(n1\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}} + \right.$$

$$\left. + \int_{(i-1)\frac{\pi_{\text{эл}}}{m}}^{i\frac{\pi_{\text{эл}}}{m} + x} \sin(n1\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}} \right); \quad (11)$$

$$b1_{n1}(i, x) = \frac{1}{\pi_{\text{эл}}} \left(\int_{-\pi_{\text{эл}} + (i-1)\frac{\pi_{\text{эл}}}{m}}^{-\pi_{\text{эл}} + i\frac{\pi_{\text{эл}}}{m} + x} (-1) \cos(n1\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}} + \right.$$

$$\left. + \int_{(i-1)\frac{\pi_{\text{эл}}}{m}}^{i\frac{\pi_{\text{эл}}}{m} + x} \cos(n1\alpha_{\text{эл}}) d\alpha_{\text{эл}} \right), \quad (12)$$

где $k1$ – число членов в гармоническом ряду; i – номер фазы; m – число фаз.

Результирующий момент будет определяться суммой моментов всех фаз (одна фаза отключена)

$$M_{180-180/m}^*(x) = \sum_{i=1}^{m-1} M_{fi}^*(x). \quad (13)$$

Межтактовый интервал в электрических градусах составит величину $\pi_{\text{эл}}/m$. Среднее значение относительного момента в межтактовом интервале будет равно среднему моменту двигателя, так как электромагнитные процессы в межтактовых интервалах идентичны. Следовательно, среднее значение относительного электромагнитного момента можно определить по формуле

$$M_{\text{cp}(180-180/m)}^* = \frac{\int_0^{\frac{\pi_{\text{эл}}}{m}} M_{180-180/m}^*(x) dx}{\frac{\pi_{\text{эл}}}{m}}. \quad (14)$$

Из диаграммы рис. 4 видно, что не все витки вносят одинаковую долю в создание электромагнитного момента. Часть из них находится в зоне сильного магнитного поля с максимальной индукцией, часть – в зоне ослабленного поля и геометрической нейтрали, часть витков отключено от источника. Определим,

какая часть среднего относительного момента приходится на один электрический градус полюсного деления. По этому показателю можно судить об эффективности якорной обмотки в целом. Введём этот безразмерный показатель, назовём его коэффициентом эффективности якорной обмотки. Он будет зависеть от коэффициента полюсной дуги, числа фаз и может быть определён с помощью следующего выражения:

$$K_{\text{эф}(180-180/m)}(\alpha_\delta, m) = \frac{M_{\text{ср}(180-180/m)}^*}{\pi_{\text{эл}}}. \quad (15)$$

Графическая зависимость коэффициента эффективности якорной обмотки от числа фаз и коэффициента полюсной дуги для рассматриваемого типа коммутации представлена на рис. 5.

Абсолютное значение среднего момента можно определить, если умножить относительное среднее значение, взятое из (15) на базовую величину (6):

$$M_{\text{ср}(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} B_\delta A_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\text{к}} K_{\text{эф}(180-180/m)}. \quad (16)$$

Анализ зависимостей показывает, что для увеличения эффективности якорной обмотки с точки зрения повышения среднего электромагнитного момента необходимо увеличивать число фаз и коэффициент полюсной дуги.

Анализ 180-градусной коммутации для ВМАП с произвольным числом фаз

По аналогии с приведённым анализом выведем основные зависимости для 180-градусной коммутации.

Диаграмма переключений проводников для двухполупериодной 180-градусной коммутации представлена на рис. 6.

Зависимость индукции в воздушном зазоре, линейной нагрузки, момента одной фазы полностью соответствуют уравнениям (8), (10), (13).

Зависимость суммарного момента от угла поворота для рассматриваемого типа коммутации (все фазы включены):

$$M_{180}^*(x) = \sum_{i=1}^m M_{fi}^*(x). \quad (17)$$

Среднее значение момента

$$M_{\text{ср}180}^* = \frac{\int_{\frac{\pi_{\text{эл}}}{2m}}^{\frac{\pi_{\text{эл}}}{2}} M_{180}^*(x) dx}{\frac{\pi_{\text{эл}}}{2m}}. \quad (18)$$

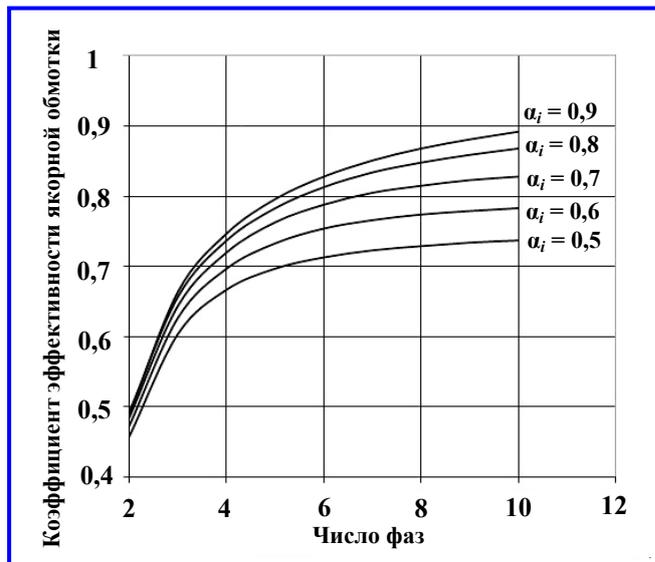


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности якорной обмотки от числа фаз при разных значениях коэффициента полюсной дуги для (180 – 180/m)-градусной коммутации

По аналогии с (14) определим коэффициент эффективности якорной обмотки

$$K_{\text{эф}180}(\alpha_\delta, m) = \frac{M_{\text{ср}180}^*}{\pi_{\text{эл}}}. \quad (19)$$

Графическая зависимость коэффициента эффективности якорной обмотки для рассматриваемого типа коммутации представлена на рис. 7.

Абсолютное значение среднего момента можно определить по уравнению

$$M_{\text{ср}180} = \frac{\pi}{2} B_\delta A_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\text{к}} K_{\text{эф}180}. \quad (20)$$

По аналогии с приведённым анализом можно сделать вывод, что при использовании 180-градусной коммутации для увеличения эффективности якорной обмотки с точки зрения повышения среднего электромагнитного момента необходимо увеличивать число фаз и коэффициент полюсной дуги.

Сравнение (180 – 180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации по развиваемому электромагнитному моменту

Сравнение двух типов коммутации проведём для одинаковых размеров активных частей и одинаковых электромагнитных нагрузок.

Найдём отношение электромагнитных моментов (180 – 180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации при этих условиях:

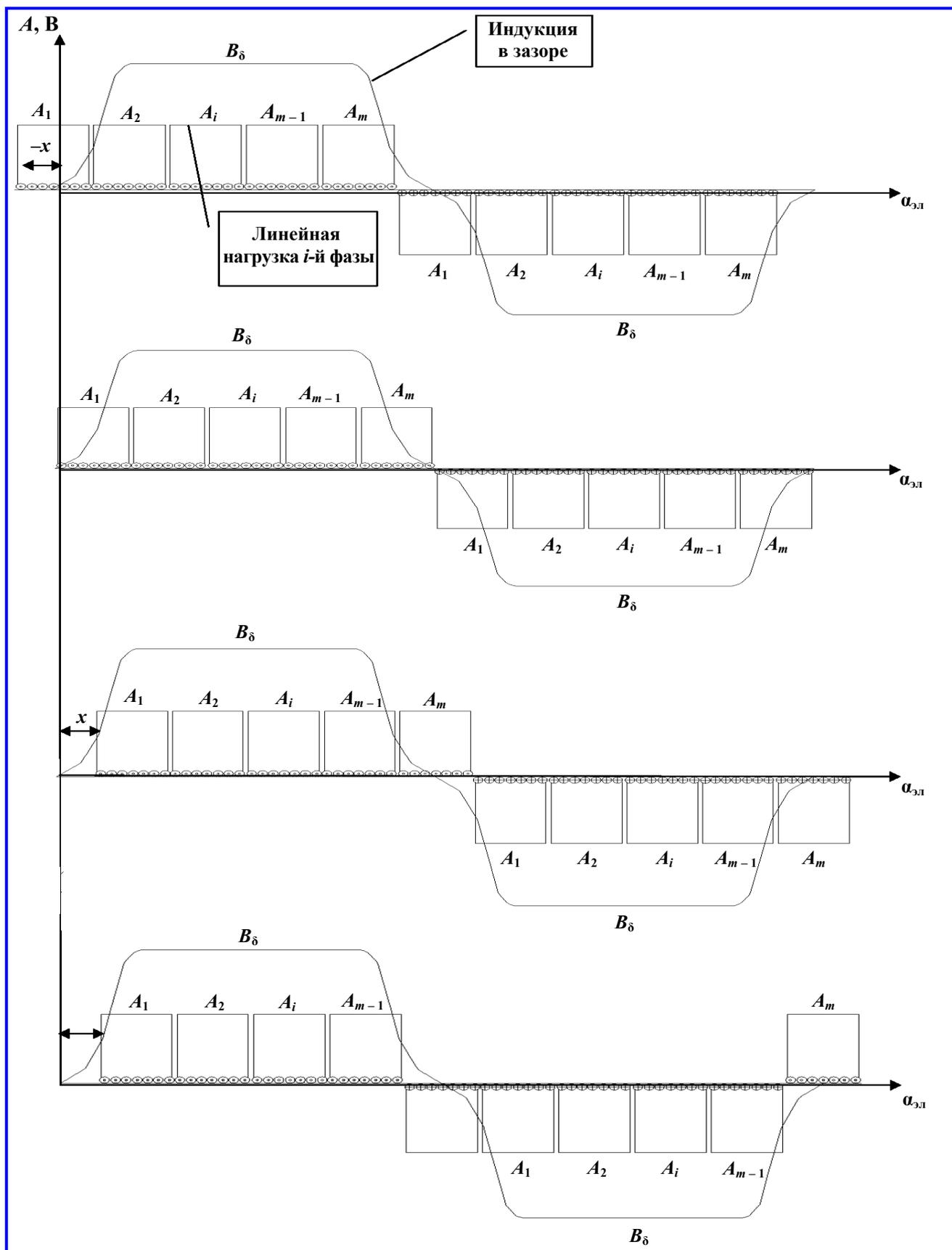


Рис. 6. Диаграмма переключения секций при двухполупериодной 180-градусной коммутации в положениях: *a* – подключения первой фазы; *б* – максимального момента; *в* – переключения фазы с номером *m*; *г* – изменения тока в фазе *m*

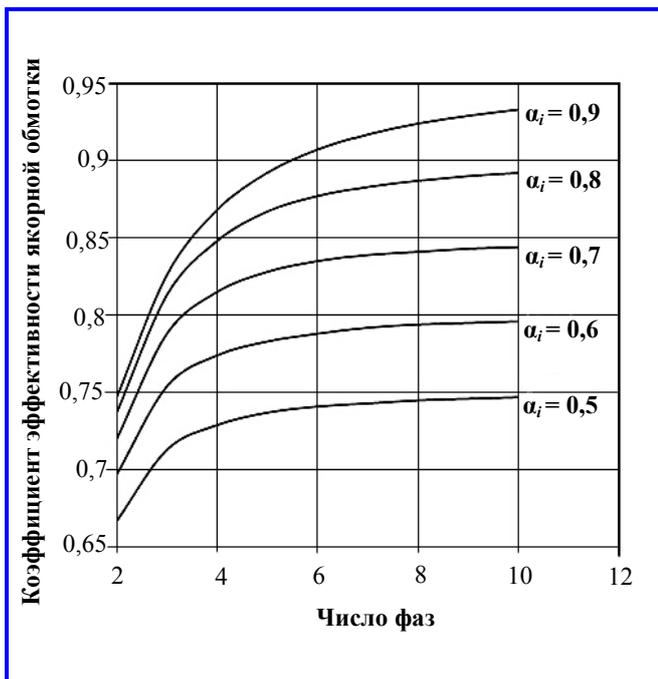


Рис. 7. Зависимость коэффициента эффективности якорной обмотки от числа фаз при разных значениях коэффициента полюсной дуги для 180-градусной коммутации

$$\frac{M_{\text{ср}180}}{M_{\text{ср}(180-180/m)}} = \frac{\frac{\pi}{2} B_{\delta} A_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\text{к}} K_{\text{эф}180}}{\frac{\pi}{2} B_{\delta} A_{\text{ср}} D_{\text{ср}}^2 L_{\text{к}} K_{\text{эф}(180-180/m)}} = \frac{K_{\text{эф}180}}{K_{\text{эф}(180-180/m)}}. \quad (21)$$

Качественный анализ показывает, что 180-градусная коммутация более предпочтительна, так как для любого коэффициента полюсной дуги и числа фаз имеет большее значение коэффициента эффективности якорной обмотки по сравнению со (180 – 180/m)-градусной коммутацией (см. рис. 5 и 7).

Для количественной оценки этого преимущества найдём отношение электромагнитных моментов для наиболее типичного коэффициента полюсной дуги ВМАП равного 0,8. Зависимость этого отношения от числа фаз представлена на рис. 8.

Представленная кривая показывает, что наибольшее преимущество 180-градусная коммутация имеет при небольшом количестве фаз. Так для трёхфазной обмотки отношение электромагнитных моментов составляет 0,8, т. е. для трёх фаз 180-градусная коммутация на 20% эффективней с точки зрения создания электромагнитного момента. При увеличении числа фаз это преимущество теря-

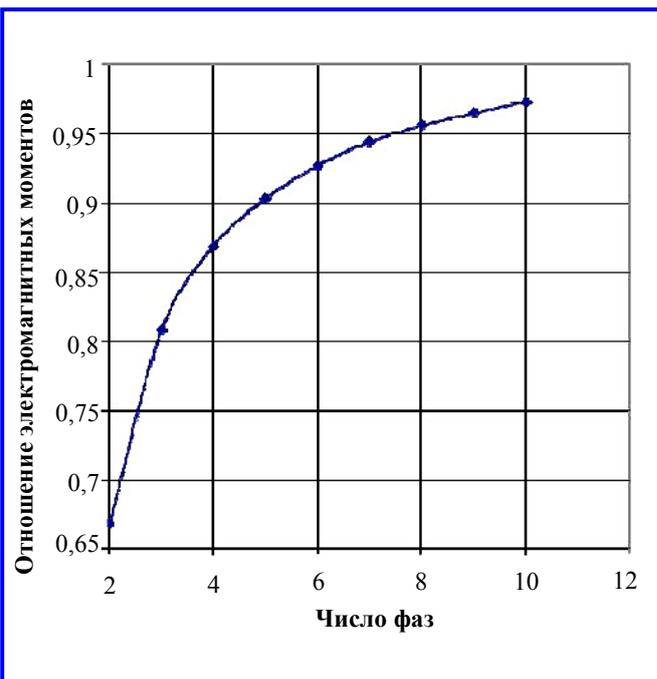


Рис. 8. Отношение электромагнитного момента для (180 – 180/m)-градусной коммутации к электромагнитному моменту для 180-градусной коммутации при коэффициенте полюсной дуги 0,8

ется. Так для десятифазной обмотки это отношение составляет 0,97, т. е. преимущество 180-градусной коммутации по развиваемому электромагнитному моменту составляет только 3%. Аналогичные выводы можно сделать и для других значений полюсной дуги.

Следует отметить, что представленный анализ показывает преимущество типов коммутации только с точки зрения развития электромагнитного момента и не учитывает технические сложности реализации электронного оборудования.

Окончательный вариант выбора типа коммутации остаётся за разработчиком привода, который должен учесть технические проблемы и материальные затраты.

Выводы

1. С точки зрения увеличения электромагнитного момента целесообразно увеличивать число фаз для всех типов коммутации.
2. 180-градусная коммутация имеет преимущество во всем диапазоне изменения коэффициента полюсной дуги и числа фаз. При малом числе фаз это преимущество более явное. С увеличением числа фаз это преимущество уменьшается.

Литература

1. Вольдек А. И. Электрические машины : учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. –

3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с. : ил.

2. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М., 1964. – 872 с. : ил.

Поступила в редакцию 25.11.2011

Сергей Анатольевич Ганджа, канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханики и электромеханических систем Южно-Уральского государственного университета, т. (908) 812-58-19, e-mail: gandja_sa@mail.ru.