

# Особенности преобразования энергии вентильных индукторных двигателей

АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассматривается преобразование энергии в вентильных индукторных двигателях (ВИД) на основе линеаризованных магнитных характеристик и статических индуктивностей. Показано, что только часть тока фазы задействована в формировании электромагнитного момента. Анализируются специфические особенности ВИД.

Ключевые слова: вентильный индукторный двигатель, преобразование энергии, электромагнитный момент

Вентильные индукторные двигатели (ВИД) получают широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Теоретические основы этого вида электромеханических преобразователей приобретают всё более стройную структуру. Однако некоторые её аспекты должны уточняться и систематизироваться в соответствии с новыми идеями и воззрениями современной электромеханики [1, 2].

Теория ВИД базируется на использовании кривых намагничивания (магнитных характеристик) зубцовых катушек для фиксированных угловых сдвигов зубцов статора и ротора, которые принято называть дифференциальными энергетическими диаграммами [3]:

$$Y = f(i), J = \text{const}, \quad (1)$$

где  $Y, i$  — потокосцепление и ток фазы;  $J$  — угловая координата ротора ( $J = 0$  соответствует рассогласованному положению: зубец статора находится напротив паза ротора).

В рабочем режиме точка с координатами  $Y, i$  описывает замкнутую кривую, которую называют интегральной энергетической диаграммой ВИД. Энергетические диаграммы служат для расчёта электромагнитных сил (моментов) и эффективности преобразования энергии в этой специфической электрической машине.

Указанные функции могут быть корректно реализованы, как теоретически и экспериментально показано в [1], если нелинейные зависимости (1) будут заменены лучами, проходящими из начала координат через рабочие точки интегральной энергетической диаграммы (рис. 1). Для оценки силового проявления электромагнитного поля важно представить окрестность рабочей точки участком прямой, проходящей через начало координат  $Y, i$ .

Conversion of energy in switched inductor motors is considered on the basis of linearized magnetic characteristics and static inductances. It is shown that only part of phase current participates in generation of the electromagnetic torque. The specific features of a switched inductor motor are analyzed.

Key words: switched inductor motor, energy conversion, electromagnetic torque

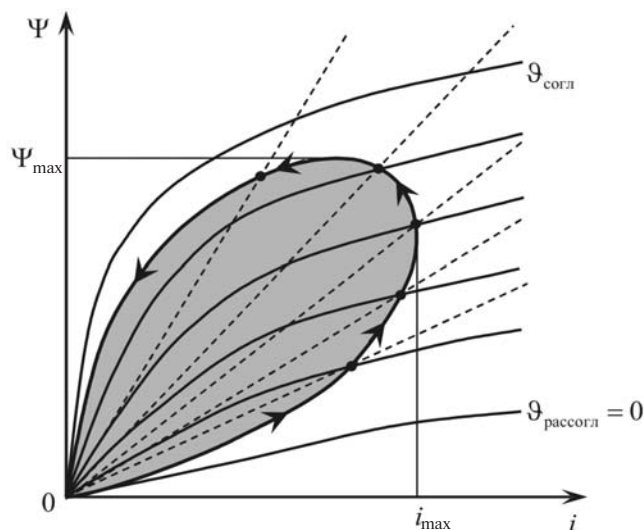


Рис. 1. Магнитные характеристики и интегральная энергетическая диаграмма ВИД

В результате такой замены энергетические диаграммы (1) примут вид

$$Y = L(J)i, J = \text{const}, \quad (2)$$

где  $L(J)$  — статическая индуктивность фазы.

Поскольку рабочая точка оказывается принадлежащей одновременно двум кривым намагничивания (нелинейной и линеаризованной), то обращение к линеаризованной зависимости (2) не изменяет магнитного состояния рабочей среды ВИД в этой точке:  $B = B(x, y, z) = \text{const}$ ;  $m = m(x, y, z) = \text{const}$ .

Однако использование линеаризованных кривых намагничивания вместо аналогичных нелинейных зависимостей при расчете электромагнитного момента энергетическим методом (определение приращений электромагнитной энергии или коэнергии соответственно для  $F = \text{const}$  или  $i = \text{const}$  при

DJ @ 0) дает возможность избежать значительной погрешности (вплоть до 200% [1, 2]).

Расчёты электромагнитного момента другими методами (натяжений, объёмной и поверхностной плотности электромагнитных сил) дают те же результаты, что и при применении энергетического метода с линеаризацией магнитных характеристик (энергетический метод А.В. Иванова-Смоленского).

**Формирование траектории рабочей точки в тактовом цикле.** Рассмотрим совокупность дифференциальных уравнений (ДУ), позволяющих рассчитать движение рабочей точки при линеаризованном представлении магнитных характеристик зубцовых катушек. В этом случае при численном решении ДУ свойства нелинейной среды отображаются не дифференциальными, а статическими индуктивностями. Для равновесия фазного напряжения в общем случае имеем

$$u = Ri + \frac{dY(i, J)}{dt} = Ri + \frac{\partial Y}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial Y}{\partial J} \frac{dJ}{dt}. \quad (3)$$

При принадлежности рабочей точки с координатами  $Y$ ,  $i$  и её окрестности соответствующей прямой справедливо

$$\frac{\partial Y}{\partial i} = \frac{\hat{Y}}{\hat{i}} = L(J), \quad (4)$$

следовательно, для линеаризованной прямой, проходящей через две заданные точки, получим уравнение

$$Y = \frac{\hat{Y}}{\hat{i}} i = L(J)i. \quad (5)$$

При вращающемся роторе ( $J = \text{var}$ ) траектория рабочей точки всегда пересекает магнитные характеристики, не скользя по ним.

При вводе в рассмотрение угловой скорости вращения ротора  $W$

$$\frac{dJ}{dt} = W \quad (6)$$

выражение (3) с учётом (4), (6) принимает вид

$$L(J) \frac{di}{dt} = u - Ri - W \frac{\partial Y}{\partial J}, \quad (7)$$

где частная производная  $\partial Y / \partial J$  есть параметр, определяемый с помощью магнитных характеристик при фиксированном токе  $\hat{i}$  на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений.

При численном полевом расчёте режима ВИД потокосцепление фазы определяется при текущих значениях тока  $\hat{i}$  и угла  $J$  из выражения

$$Y = w \int_{-t_1/2}^{t_1/2} \dot{B}_n dx, \quad (8)$$

где  $w$  — число витков фазы;  $B_n$  — нормальная составляющая магнитной индукции на окружности воздушного зазора;  $t_1$  — зубцовый шаг статора.

При найденном  $Y$  значение индуктивности  $L(J)$  в левой части уравнения (7) определяется из равенства (4). К дифференциальным уравнениям (6), (7) следует добавить уравнение движения ротора

$$J \frac{dW}{dt} = M - M_c. \quad (9)$$

**Преобразование энергии в ВИД.** Уравнение (7) равновесия напряжения фазы с учетом зависимости (5) примет вид

$$u = Ri + L(J) \frac{di}{dt} + Wi \frac{dL(J)}{dJ}. \quad (10)$$

Слагаемые  $L(J) \frac{di}{dt}$  и  $Wi \frac{dL(J)}{dJ}$  в (10) могут рассматриваться как составляющие напряжения  $u$ , уравнивающие соответственно трансформаторную ЭДС и ЭДС вращения. Умножая в (10) напряжение  $u$  на ток  $i$ , получаем выражение для мгновенной мощности, потребляемой фазой от источника питания:

$$p = ui = Ri^2 + L(J)i \frac{di}{dt} + Wi^2 \frac{dL(J)}{dJ}. \quad (11)$$

Из известной формулы для электромагнитной энергии  $W_{\text{ЭМ}} = \frac{1}{2} i^2 L(J)$  находим электромагнитную мощность, составляющую часть полной мощности (11),

$$p_{\text{ЭМ}} = \frac{dW_{\text{ЭМ}}}{dt} = L(J)i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} Wi^2 \frac{dL(J)}{dJ}. \quad (12)$$

Тогда полная мощность (11) будет представлена следующими слагаемыми:

$$p = p_{\text{ЭЛ}} + p_{\text{ЭМ}} + p_{\text{МЕХ}}, \quad (13)$$

где  $p_{\text{ЭЛ}} = Ri^2$  — электрические потери в проводниках;  $p_{\text{МЕХ}}$  — механическая мощность;

$$p_{\text{МЕХ}} = \frac{1}{2} Wi^2 \frac{dL(J)}{dJ}. \quad (14)$$

Умножая полную мощность в (13) на бесконечно малое приращение времени  $dt$ , получаем приращения соответствующих энергий:

$$pd t = dW = dW_{\text{ЭЛ}} + dW_{\text{ЭМ}} + dW_{\text{МЕХ}}, \quad (15)$$

где приращение энергии электромагнитного поля

$$dW_{\text{ЭМ}} = L(J)idi + \frac{1}{2} i^2 dL(J); \quad (16)$$

приращение механической энергии

$$dW_{\text{мех}} = \frac{1}{2} i^2 dL(J). \quad (17)$$

Формула (3) позволяет также получить более компактное выражение для потребляемой мощности

$$p = p_{\text{эл}} + i \frac{dY}{dt}, \quad (18)$$

тогда равенству (15) можно придать вид

$$dW = dW_{\text{эл}} + idY. \quad (19)$$

Сравнивая (15) и (19), найдём

$$idY = dW_{\text{эм}} + dW_{\text{мех}}. \quad (20)$$

Для электромагнитного момента ВИД с учетом зависимостей (6), (14), (17) справедливы следующие формулы:

$$M = \frac{p_{\text{мех}}}{W} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(J)}{dJ} = \frac{p_{\text{мех}} dt}{W dt} = \frac{dW_{\text{мех}}}{dJ}. \quad (21)$$

Сравнивая выражения (16) и (17), видим, что при постоянстве тока  $i$  приращения электромагнитной и механической энергии становятся одинаковыми:

$$dW_{\text{эм}} = dW_{\text{мех}}. \quad (22)$$

Поэтому электромагнитный момент можно определить и по такой формуле:

$$M = \left. \frac{dW_{\text{эм}}}{dJ} \right|_{i = \text{const}}. \quad (23)$$

Равенство (20) позволяет с помощью замкнутой траектории (рис. 1) движения рабочей точки с координатами  $\hat{Y}$ ,  $\hat{i}$  (интегральной энергетической диаграммы) определить механическую энергию, которая была затрачена на один рабочий цикл (такт) ВИД:

$$W_{\text{мех}} = \int_0^{Y_{\text{max}}} \dot{O} idY + \int_{Y_{\text{max}}}^0 \dot{O} idY. \quad (24)$$

Действительно, как известно, при интегрировании по данной замкнутой кривой с заданным направлением перемещения получаем площадь, ограниченную этой кривой (с размерностью Вт⋅с), которая будет равна безвозвратно выделенной энергии в рассматриваемом рабочем цикле. Поскольку интегральное (цикловое) изменение электромагнитной энергии равно нулю (она вначале нарастает от нуля до некоторого максимума, а потом уменьшается до нуля), то результат интегрирования (24) будет определять израсходованную энергию, которая, очевидно, будет механической.

Эту энергию можно найти и другим путём, пользуясь равенствами (16), (17), (20), из которых следует:

$$idY = L(J)idt + \frac{1}{2} i^2 dL(J) + \frac{1}{2} i^2 dL(J). \quad (25)$$

В этом выражении последнее слагаемое есть приращение механической энергии. Поскольку в рабочем цикле статическая индуктивность  $L(J)$  испытывает только положительное приращение от  $L_{\text{min}}$  до  $L_{\text{max}}$ , то

$$W_{\text{мех}} = \int_{L_{\text{min}}}^{L_{\text{max}}} \frac{1}{2} i^2 dL. \quad (26)$$

Этот интеграл равен площади, ограниченной кривой  $\frac{1}{2} i^2 = f(L)$  и осью  $L$  (рис. 2).

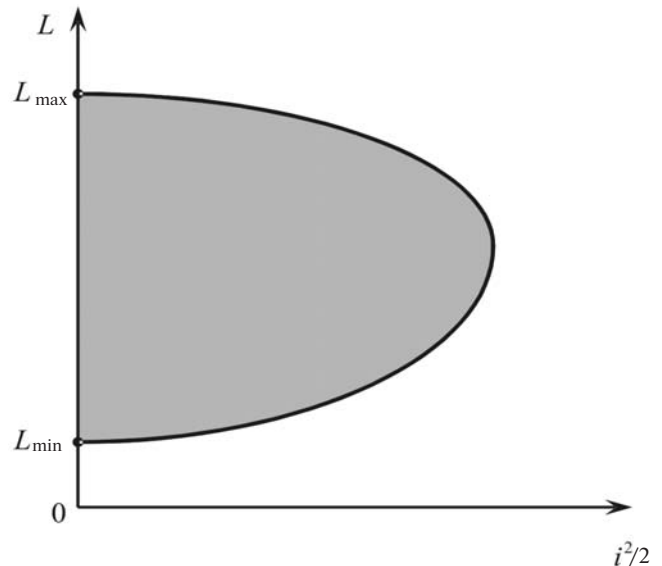


Рис. 2. Интегральная энергетическая диаграмма в координатах  $L, i^2/2$

**О влиянии насыщения магнитной цепи ВИД на его энергетическую эффективность.** Известны утверждения, что наличие локального магнитного насыщения коронок зубцов статора и ротора при их частичном перекрытии повышает энергетическую эффективность ВИД [4]. При этом предполагается, что изменение наклона магнитных характеристик с ростом тока катушек и перекрытия зубцов вызвано магнитным насыщением других участков магнитной цепи. Однако магнитная характеристика станет линейной (без наклона к оси абсцисс), если магнитный поток будет ограничиваться только воздушными промежутками между зубцами, в том числе между их боковыми стенками. Участки зубцов с локальным насыщением увеличат сопротивление магнитному потоку и придадут еще большую нелинейность магнитным характеристикам.

Рассмотрим численный расчёт<sup>1</sup> магнитного поля (МП) методом сопряжения конформных отображений [5] трехфазного ВИД мощностью  $P_H = 3$  кВт, имеющего  $n_H = 1500$  об/мин, число пазов статора  $Z_1$  и ротора  $Z_2$  соответственно 12 и 8, напряжение питания коммутатора 28 В, действующее значение номинального тока (тока фазы) 132 А, число витков зубцовой катушки  $w_k = 8$ .

Расчётная область ВИД в виде половины поперечного сечения активной области была разбита на 201 элементарный участок (ЭУ). Каждый зубец статора и ротора был представлен достаточно большим числом ЭУ, которое определялось активностью зубца. Активный зубец статора (в его катушке протекает ток) содержит 36 ЭУ, зубец ротора, перекрываемый активным зубцом статора, 13 ЭУ. Неактивные зубцы разбиты: на 10 ЭУ у статора и 8 ЭУ у ротора. Паза статора имеют 14 ЭУ, четыре из которых совпадают с прямоугольниками сечений катушек. Роторные пазы содержат 4 ЭУ. Ярма статора и ротора разбиты на кольцевые секторы (17 у статорного ярма и 9 у роторного).

Воздушный зазор представлен 4 кольцевыми секторами. Общее число расчётных точек (точек наблюдения на границах ЭУ) равно 3268.

В пределах каждого ферромагнитного ЭУ магнитная проницаемость среды принималась постоянной (её конкретное значение уточнялось в ходе расчета итерационной процедурой).

Источники МП — постоянные токи номинального значения (132 А) двух катушек, принадлежащих фазе А.

На рис. 3,а показаны нормальные составляющие магнитной индукции (кривая 1) и скалярного магнитного потенциала (СМП) (кривая 2) в расчётных точках окружности, проходящей через края зубцов ротора, обращенные к воздушному зазору. Этому положению<sup>2</sup> с угловой координатой  $J = 15^\circ$  соответствует перекрытие зубцов статора и ротора, равное 0,84 мм.

В воздушном зазоре на отмеченной выше окружности наблюдаются, как видно на рис. 3,а, всплески СМП в местах напротив активных зубцов статора и пазов ротора. В местах же перекрытия этих активных пазов с пазами ротора значения СМП невелики. Это объясняется тем, что при неизменном значении МДС катушек фазы А (источника МП) магнитный потенциал будет больше в тех точках окружности, через которые проходят силовые линии с меньшим уровнем индукции.

<sup>1</sup> Численный расчет МП методом сопряжения конформных отображений указанного ВИД выполнил к.т.н. В.В. Ефимов.

<sup>2</sup> В численном расчете угловое положение ротора фиксируется углом  $J$  между осями пазов статора и ротора; значению  $J = 0$  соответствует согласованное положение зубцов.

На рис. 3,а обратим внимание также на важный для формирования электромагнитного момента факт: в зоне начала перекрытия зубцов из-за резкого изменения СМП  $U$  имеет место максимум тангенциальной напряжённости магнитного поля

$$H_t = - \frac{dU}{dx}. \quad (27)$$

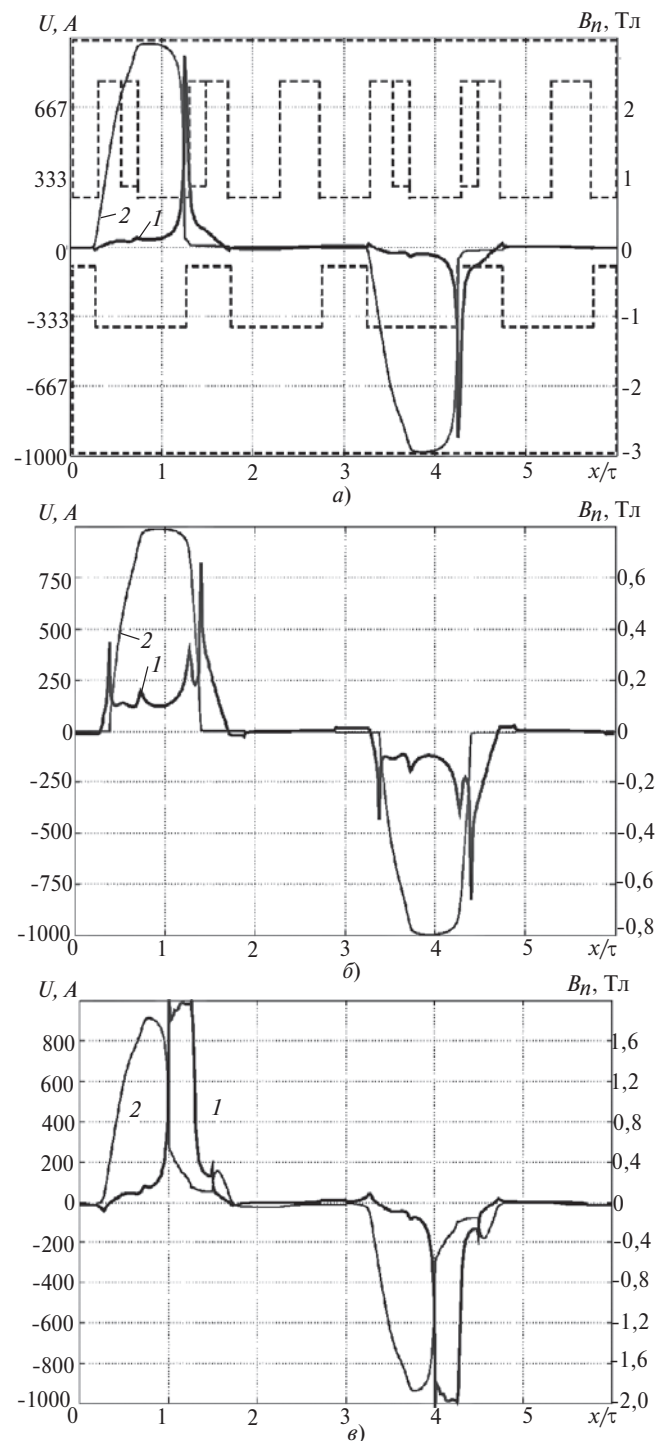


Рис. 3. Кривые нормальной составляющей магнитной индукции (1) и скалярного магнитного потенциала (2) на окружности воздушного зазора, примыкающей к зубцам ротора, для углового положения ротора: а —  $J = 15^\circ$ ; б —  $J = 19.2^\circ$ ; в —



В расчетных точках окружности, проходящей через края зубцов ротора, обращенные к воздушному зазору, можно определить нормальные и тангенциальные составляющие вектора натяжений ( $H/m^2$ ) [1]:

$$T_{nn} = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_r \mu_0}; \quad T_{nt} = B_n H_t. \quad (28)$$

На основе второй формулы (28) получено выражение мгновенного (для данного положения ротора) значения электромагнитного момента (Нм) [5]:

$$M = \frac{\rho I_d D_p^2}{2} \frac{N}{N} \sum_{j=1}^N B_{nj} H_{tj}, \quad (29)$$

где  $N$  – число точек наблюдения на дуге окружности воздушного зазора расчетной области, примыкающей к ротору.

На рис. 4 показаны кривые электромагнитного момента  $M(J)$ , рассчитанные по (29) для полного углового интервала изменения  $J$  ( $180/Z_2$ ), на котором формируется момент с положительным знаком тока только фазы  $A$  (перекрытие работы других фаз отсутствует), по катушкам которой протекает постоянный ток  $i$  номинального значения 132 А.

Кривая 1 определена для физических (естественных) значений магнитных проницаемостей  $i_m$  ( $i$  – номер участка) всех ЭУ электротехнической стали 1211 магнитопровода ВИД, соответствующих уровням магнитной напряженности этих локальных ЭУ. Значение  $i_m$  рассчитывалось на основе итерационных процедур с точностью 2%. «Горб» с  $M_{ЭМ}$ , Н·м

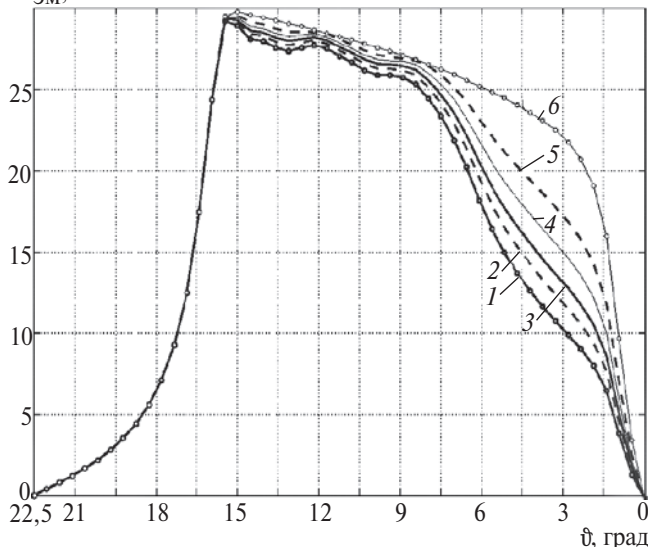


Рис. 4. Кривые электромагнитного момента ВИД с неизменным током фазы при варьировании уровня магнитного насыщения

максимумом момента у этой кривой соответствует зоне с центром у места начала перекрытия зубцов (боковые стенки зубцов находятся напротив друг друга). При этом положении ротора имеет место максимум тангенциальной напряженности МП, как на рис. 3,а, что и вызывает в соответствии с (29) для электромагнитного момента экстремум кривой 1 на рис. 4. Поэтому замечание в [3, с. 49] о «малообъяснимости» пика тангенциального усилия в этой зоне является не совсем оправданным.

Ниже приводятся относительные значения магнитных проницаемостей  $i_m$  для некоторых характерных ЭУ зубцов и ярем, соответствующие физическому уровню их магнитного насыщения (кривая 1) при угле  $J=15^\circ$ , при котором перекрытие зубцов статора и ротора равно 0,84 мм.

ЭУ зубцов статора		ЭУ ярем статора		ЭУ зубцов ротора		ЭУ ярем ротора	
$i$	$i_m$	$i$	$i_m$	$i$	$i_m$	$i$	$i_m$
67	748	188	1225	47	95	12	1225
68	264	196	1225	48	1083	16	1225
85	748	—	—	51	95	—	—
86	264	—	—	52	1082	—	—

Для наиболее насыщенных в магнитном отношении ЭУ значение  $\mu_r$  зубцов статора равно 264, зубцов ротора – 95.

Кривые 2, 3, 4 и 5 электромагнитного момента (рис. 4) получены для виртуальных (искусственных) условий локального магнитного насыщения, когда магнитные проницаемости  $i_m$  всех ферромагнитных ЭУ были увеличены соответственно на 25 (кривая 2), 50 (кривая 3), 100 (кривая 4) и 200 % (кривая 5). Кривая 6 построена при одинаковых значениях магнитных проницаемостей всех ЭУ, равных  $\mu_{max} = 1250\mu_0$  (в этом случае сердечники ВИД будут практически ненасыщенными)<sup>3</sup>. Указанные вычислительные действия можно рассматривать как гибридное выполнение магнитопровода ВИД, состоящего из совокупности фрагментов с лучшими магнитными свойствами.

Кривые 1–6 показывают, что по мере уменьшения магнитного насыщения сердечников ВИД его электромагнитный момент растёт, начиная с угла  $J_{кр}$ , близкого по значению углу совпадения кромок зубцов, где наблюдается «горб» момента, и особенно интенсивно на интервале перекрытия

<sup>3</sup> Магнитным проницаемостям отдельных ЭУ, которые в этой искусственной процедуре принимали значения, большие  $\mu_{max}$  (для электротехнической стали  $\mu_{max} = 1250\mu_0$ ), программно присваивалось значение  $\mu_{max}$ .

зубцов. Поэтому тезис о полезности магнитного насыщения ВИД, высказываемый в некоторых публикациях, например [4], является не совсем корректным. Вид этих кривых также показывает, что максимум электромагнитного момента, наблюдаемый перед началом перекрытия зубцов, слабо зависит от магнитного насыщения.

На интервале отсутствия перекрытия зубцов  $180 / Z_2 = 22,5^\circ$   $J > J_{кр}$   $\approx 15^\circ$  магнитная индукция в воздушном зазоре из-за своей относительной малости (рис. 3,б) не вызывает локального насыщения зубцов. Поэтому на этом интервале электромагнитный момент, как показывают кривые рис. 4, не зависит от насыщения. На интервале перекрытия зубцов  $J_{кр} > J > 0$  магнитная индукция в воздушном зазоре велика (рис. 3,в), поэтому электромагнитный момент существенно зависит от магнитного насыщения (рис. 4). В зоне начала перекрытия зубцов МП имеет особенно высокую интенсивность из-за небольшой ширины окна с малым эквивалентным воздушным зазором. Эта ситуация не является уникальной. Известны электрические машины, у которых числа зубцов статора и ротора близки друг другу, как и у ВИД. Такой характер имеет МП индукторных машин с сетевым питанием [6], машинных генераторов повышенной частоты [7], вентильных двигателей с «коллекторным» расположением магнитов [8].

**Принципиальные особенности ВИД.** Рядом принципиальных особенностей ВИД выделяется среди других типов электрических машин. Таких особенностей можно назвать, по крайней мере, три.

1. У ВИД отсутствует вращающееся (в обычном смысле) магнитное поле. На каждом такте оно заново возникает и к концу такта уменьшается до нуля. Физическую основу его действия составляют последовательно включаемые и отключаемые электромагниты в виде зубцовых катушек. Для математического описания его свойств можно использовать соответствующие разделы теории электрических аппаратов [9, 10].

2. У обычных электродвигателей последний член равенства (11), равный произведению тока на ЭДС вращения

$$W_i^2 \frac{dL(J)}{dJ}, \quad (30)$$

принято называть «электромагнитной мощностью». Именно она целиком через воздушный зазор передается ротору в виде механической мощности (у синхронных двигателей и двигателей постоянного тока; у асинхронных двигателей — за вычетом электрических потерь в обмотке ротора).

У ВИД только половина мощности (30), как видно из выражения (14), передается ротору в виде механической мощности. Другая половина является частью собственно электромагнитной мощности (в терминологии теории ВИД), которая на активном интервале такта (при включённых транзисторных ключах) расходуется на увеличение энергии магнитного поля (путём изменения тока и наращивания индуктивности  $L(J)$ ), а на пассивном интервале (при открытых диодных ключах) возвращается в источник питания.

Следовательно, ВИД при одинаковых с обычным двигателем значениях ЭДС, частоты вращения и тока фазы должен иметь в 2 раза меньший электромагнитный момент. Это обстоятельство является следствием необходимости на каждом такте заново создавать магнитное поле в воздушном зазоре.

Из (21) можно заключить, что ВИД для создания электромагнитного момента, одинакового с другими двигателями, должен иметь в  $\sqrt{2}$  раз больший фазный ток.

Следует также отметить, что только часть ( $1/\sqrt{2} \approx 0,71$ ) тока фазы непосредственно задействована в создании электромагнитного момента, другую его часть, связанную с накоплением энергии магнитного поля, можно по аналогии с асинхронным двигателем назвать намагничивающим током.

Рассмотренное свойство влечет за собой увеличение установленной мощности коммутатора ВИД.

Увеличенный уровень тока ВИД по сравнению с обычными двигателями впервые теоретически и экспериментально исследован в [11].

3. Уравнения ВИД обычно записывают в естественных (фазных) координатах, но возможно их представление и в других системах координат, используемых в теории электрических машин [12]. В искусственных системах координат  $(a, b, 0; d, q, 0)$  ВИД присутствуют составляющие нулевой последовательности двух видов. Токи этих нулевых последовательностей участвуют в формировании электромагнитного момента, что не имеет места в обычных электродвигателях.

**Выводы.** 1. Для адекватного описания преобразования энергии и расчета электромагнитного момента ВИД необходимо использовать линеаризованные магнитные характеристики и связанные с ними статические индуктивности.

2. Насыщение магнитной цепи ВИД снижает его энергетические показатели.

3. При одинаковых с другими двигателями значениях ЭДС, частоты вращения и тока фазы ВИД имеет в 2 раза меньший электромагнитный момент. Для обеспечения равенства моментов его фазный ток должен быть увеличен в  $\sqrt{2}$  раз.

4. Только часть фазного тока ВИД непосредственно задействована в создании электромагнитного момента. Другую его часть следует назвать намагничивающим током.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989.
2. **Абрамкин Ю.В.** Теория и расчёт помедиторных и электродвижущих сил и преобразование энергии в электромагнитном поле. — М.: Изд-во МЭИ, 1997.
3. **Кузнецов В.А., Кузьмичёв В.А.** Вентильно-индукторные двигатели. — М.: Изд-во МЭИ, 2003.
4. **Miller T.J.E.** Switched reluctance motors and their control. — Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
5. **Афанасьев А.А.** Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011.
6. **Юферов Ф.М.** Электрические машины автоматических устройств. — М.: Высшая школа, 1988.
7. **Алексеева М.М.** Машинные генераторы повышенной частоты. — Л.: Энергия, 1967.
8. **Шевченко А.Ф., Комаров А.В., Новокрещенов О.И., Мизевич В.В.** Безредукторный электромеханический усилитель руле-

вого управления легковых автомобилей. — Электротехника, 2007, № 9.

9. **Буль Б.К. и др.** Основы теории электрических аппаратов. — М.: Высшая школа, 1970.

10. **Глухенький Т.Г.** Разработка и исследование бездатчиковых систем управления вентильно-индукторными электродвигателями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Чебоксары, 2004.

11. **Донской Н.В.** Вентильно-индукторный двигатель в сравнении с другими типами двигателей. — Материалы V Всероссийской научной конф. «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем». — Чебоксары, 2003.

12. **Афанасьев А.А.** Линейные преобразования переменных в теории вентильно-индукторного двигателя. — Электричество, 2004, № 4.

[26.04.12]

*Автор: Афанасьев Александр Александрович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. Докторскую диссертацию «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты (теория и приложения)» защитил в МЭИ в 1991 г. Заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах Чувашского государственного университета.*

**Если Вы работаете в области энергетики или электротехники, позаботьтесь о том, чтобы Ваше предприятие, лаборатория, кафедра не опоздали с подпиской на**

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

старейший отечественный теоретический и научно-практический журнал Российской Академии наук и Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников;

выходит ежемесячно, предназначен для высококвалифицированных специалистов в области энергетики и электротехники;

публикует теоретические и научно-практические работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров, освещает работу российских и международных конференций, рецензирует учебники и монографии по тематике журнала, помещает материалы по истории электротехники, статьи о выдающихся отечественных и зарубежных ученых;

журнал поступает во многие промышленно развитые страны мира.

*Подписка в России и странах СНГ  
осуществляется в отделениях связи  
и подписных агентствах*

*Зарубежные читатели могут подписаться на «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»  
во всех крупных международных подписных агентствах*