

скорость вращения ротора, соответствующая его холостому ходу, дало возможность записать полученное выражение для электромагнитного момента в компактной форме за счет применения системы относительных единиц, удобной для последующего анализа, с сохранением физического смысла входящих в него коэффициентов.

3. Установлено, что основной и единственной причиной нелинейности механических характеристик вентильного двигателя при сделанных ранее допущениях служит синхронное индуктив-

ное сопротивление обмотки статора по продольной оси, увеличение которого сопровождается возрастанием нелинейности.

4. Скорость вращения ВД можно регулировать изменением действующего значения напряжения на зажимах обмотки статора или изменением частоты этого напряжения.

5. По своим регулировочным свойствам ВД подобен двигателю постоянного тока параллельного возбуждения, но имеет более высокую надежность из-за отсутствия щеточно-коллекторного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов М. А., Гарчук А. А. Магнитная индукция в воздушном зазоре вентильного двигателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 8. С. 68–74.

2. Ваганов М. А. Электромагнитные силы и моменты в электромеханике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 94 с.

A. S. Borovik, M. A. Vaganov, I. A. Pimenova
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ELECTROMAGNETIC TORQUE OF THE BLDC MOTOR

When determining the stator winding current account of the salient pole design of the rotor, and the resistance of the winding of the stator. The expression for the electromagnetic torque has been compiled with due account of photocopy of mutual induction of the permanent magnets of the rotor with phase windings of the stator.

Permanent magnets, power consumption, the active resistance of the stator winding, the phase current of the stator winding, flux of mutual induction, electromagnetic torque

УДК 621.313

М. А. Ваганов, Г. Д. Баранов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Асинхронный торцевой двигатель с модифицированной геометрией зубцовой зоны статора

Модифицированная зубцовая зона статора дает возможность упростить выбор магнитных индукций на участках магнитной системы при условии ограниченных значений плотности тока в проводниках обмотки статора. При этом дополнительно оказывается, что оптимизируются не только индукции на участках магнитной системы, но и продольно-поперечная геометрия самого двигателя.

Электромагнитный момент, оптимальная длина пакета стали, магнитная индукция в воздушном зазоре, наружный диаметр пакета стали, модифицированная геометрия, магнитная индукция в зубцах статора, максимум магнитного потока

По аналогии с обычными асинхронными двигателями традиционного цилиндрического исполнения [1] в [2] была разработана модель торцевого

асинхронного двигателя, основу которой составляет итоговое выражение $M_{эм} = k_F F_M * L^5 F_{сн}$. В это выражение входит ряд сомножителей, среди ко-

торых определяющим является функциональный множитель F_{M*} . Он содержит в себе всю информацию, необходимую для описания продольно-поперечной геометрии двигателя, обеспечивающей преобразование энергии в нем с наибольшей эффективностью, т. е. с наилучшим использованием активных материалов относительно электромагнитного момента двигателя. Или, иными словами, когда активная сталь магнитной системы и проводниковые материалы обмоток статора и ротора имеют минимальные потери при прочих равных условиях в сравнении с другими вариантами расчета рассматриваемого двигателя.

Как уже было отмечено ранее, в [2] представлена математическая модель, описывающая связь продольной и поперечной геометрии асинхронного торцевого двигателя с его электромеханическими параметрами. Эту модель можно представить в виде системы выражений:

$$M_{эм} = k_F F_{M*} L^5 F_{Sн}; \quad (1)$$

$$k_F = \frac{\pi f_1 k_{об1} \sqrt{\gamma_1 \gamma_2} k_{r1} k_{r2}}{4 \sqrt{k_{\theta 1} k_{\theta 2}}} c_1^2; \quad (2)$$

$$F_{M*} = \frac{(D_{1н*} + D_{1*}) (D_{1н*}^2 - D_{1*}^2) B_{\delta}^2 \sqrt{k_{п1} k_{п2}}}{\sqrt{k_{1*} k_{2*}}} \frac{1}{p}; \quad (3)$$

$$F = \frac{\sqrt{r_1/r_2'}}{2 c_1^2 k_m (k_m - \sqrt{k_m^2 - 1})}; \quad (4)$$

$$k_{п1} = \frac{\pi}{2} (D_{1н*} + D_{1*}) \left(1 - \frac{B_{\delta}}{B_{c1} k_{c1}} \right) \times \left[l_{1*} - \frac{(D_{1н*} + D_{1*})}{4p} \frac{B_{\delta}}{B_{c1} k_{c1}} \right]; \quad (5)$$

$$k_{п2} = \frac{\pi}{2} (D_{1н*} + D_{1*}) \left(1 - \frac{B_{\delta}}{B_{c2} k_{c2}} \right) \times \left[1 - l_{1*} - \delta_* - \frac{(D_{1н*} + D_{1*})}{4p} \frac{B_{\delta}}{B_{c2} k_{c2}} \right]. \quad (6)$$

Здесь коэффициент k_F включает в себя ряд величин, числовые значения которых заранее известны, и по этой причине можно считать известным и числовое значение самого коэффициента k_F . Значение выражения (4), описывающего функцию F , зависит главным образом от кратности максимального момента k_m , определяющего перегрузочную способность двигателя, и от отношения активных сопротивлений обмоток статора и ротора, которое определяется в ходе оптимизации поперечной геометрии двигателя.

Наибольшую значимость с позиции оптимизации поперечной геометрии имеют выражения (5) и (6), описывающие через коэффициенты $k_{п1}$ и $k_{п2}$ зубцовые зоны статора и ротора и определяющие значимость стали магнитной системы и материала обмоток в процессе преобразования энергии. Повышение числовых значений коэффициентов $k_{п1}$ и $k_{п2}$ сопровождается увеличением функционального множителя F_{M*} и уменьшением числового значения одного из главных размеров L двигателя.

При анализе (3) было установлено наличие максимума функционального множителя F_{M*} одновременно по трем переменным, а именно: относительно магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ} , по относительной длине пакета стали статора l_{1*} и по относительному значению внутреннего диаметра пакета стали статора D_{1*} . Дальнейшие исследования показали, что практическая реализация максимума по значению внутреннего диаметра пакета стали статора D_{1*} технологически не реализуема по двум причинам: во-первых, из-за недостатка места для размещения лобовых частей обмотки статора по внутренней цилиндрической поверхности статора и, во-вторых, не остается свободного пространства в этой зоне для вала двигателя. Эти два обстоятельства вызвали необходимость изменения геометрии зубцовой зоны статора.

В связи с этим представилось целесообразным по внутренней цилиндрической поверхности пакета стали статора ширину зубца статора принять равной нулю (рис. 1). Полученная в результате этого новая поперечная геометрия зубцовой зоны двигателя для удобства была названа модифицированной.

Для такой модифицированной зубцовой зоны статора ширина прямоугольного паза статора может быть определена из ΔABO (рис. 1), где $OA = OB = D_{1*}$, а $\alpha_1 = 2\pi/Z_1$:

$$b_{п1} = \frac{D_{1*}}{2} \sqrt{2 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi}{Z_1} \right) \right]}. \quad (7)$$

Выражение для ширины паза пакета стали статора $b_{п1}$ получено в результате анализа магнитной системы [2]

$$b_{п1} = \frac{\pi}{2Z_1} (D_{1н*} + D_{1*}) \left(1 - \frac{B_{\delta}}{B_{c1} k_{c1}} \right). \quad (8)$$

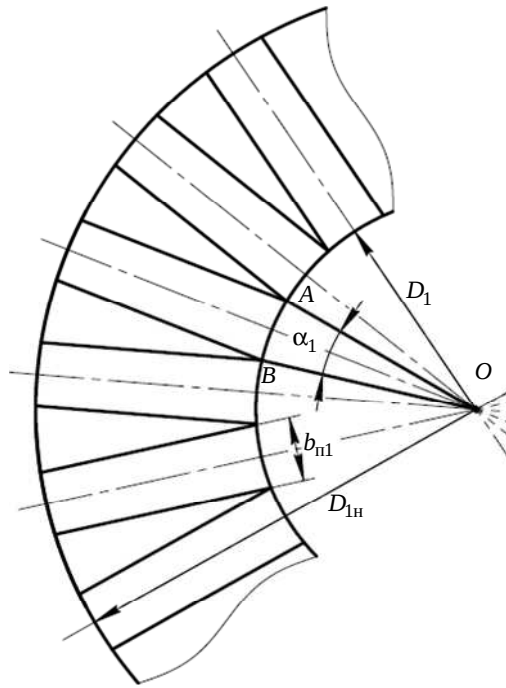


Рис. 1

Приравняв (7) и (8), получим выражение для внутреннего диаметра пакета статора с модифицированной зубцовой зоной:

$$D_{1*} = \frac{\frac{\pi}{2Z_1} D_{1H*} \left(1 - \frac{B_\delta}{B_{31} k_{c1}}\right)}{\frac{1}{2} \sqrt{2 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{Z_1}\right)\right]} - \frac{\pi}{2Z_1} \left(1 - \frac{B_\delta}{B_{31} k_{c1}}\right)}. \quad (9)$$

В результате математическую модель, описывающую асинхронный торцевой двигатель с модифицированной зубцовой зоной, можно представить как систему уравнений (1)–(6), (9).

Данная математическая модель дает возможность выполнить определение оптимальных основных размеров асинхронного торцевого двигателя относительно величины электромагнитного момента по выражению

$$L = 5 \sqrt{\frac{M_{эм}}{k_F F_{M*} F_{S_H}}}.$$

При анализе поперечной геометрии цилиндрических асинхронных двигателей в качестве внешней варьируемой переменной была принята относительная длина пакета стали статора числовое значение которой, при базовом анализе поперечной геометрии принималось равным 0.5 [1].

Аналогичное явление имеет место и при анализе асинхронных торцевых двигателей, в которых роль внешней переменной играет в базовом

варианте наружный диаметр D_{1H} пакета стали статора и ротора.

Следует иметь в виду, что асинхронный торцевой двигатель подобен диску, в котором наружный диаметр D_{1H} значительно больше общей длины L . И тогда, не теряя общности построений модели, можно принять относительное значение наружного диаметра $D_{1H*} = D_{1H}/L$ равным, например, 3. При этом условием оказывается фиксированным объем активных материалов асинхронного торцевого двигателя $V = \pi D_{1H*}^2 L^3$, в пределах которого и будет производиться анализ продольно-поперечной геометрии.

Описанная математическая модель также позволяет определить магнитные индукции на участках магнитной системы двигателя. В качестве одного из критериев выбора оптимальных значений этих индукций можно принять амплитуду магнитного потока Φ_δ в воздушном зазоре. Для этого необходимо определить связь выражения для магнитного потока с уравнениями модели:

$$\begin{aligned} \Phi_\delta &= \frac{2}{\pi} \tau_1 l_1 B_{\delta m} = \frac{2}{\pi} \frac{\pi(D_{1H} + D_1)}{4p} \times \\ &\times \frac{D_{1H} - D_1}{2} B_{\delta m} = \frac{D_{1H}^2 - D_1^2}{4p} B_{\delta m}. \end{aligned} \quad (10)$$

Переменные $D_1 = D_{1*}L$ и $D_{1H} = D_{1H*}L$ определяются как произведение их относительных значений на аксиальную длину двигателя L . Относительное значение наружного диаметра D_{1H*} в сформированной модели постоянно. Значение относительного внутреннего диаметра D_{1*} определяется по (9) и представляет функцию от индукции в зубцах статора B_{31} и оптимальной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta m}$.

В свою очередь, аксиальная общая активная длина двигателя L определяется максимумом функционального сомножителя F_{M*} , который зависит, в частности, от индукций на участках магнитной цепи B_{31} , B_{32} , B_{c1} , B_{c2} . Оптимальная индукция в воздушном зазоре $B_{\delta m}$ также определяется относительно максимума F_{M*} . Аналитическое представление этих зависимостей достаточно громоздко и лишено наглядности, поэтому в дальнейшем все необходимые расчеты выполнялись с использованием соответствующих

стандартных пакетов, позволяющих в конечном итоге получить необходимые графические зависимости и конкретные числовые значения представляющих интерес физических величин.

Магнитный поток в воздушном зазоре Φ_δ можно рассмотреть как функцию от индукций на участках магнитной цепи B_{31} , B_{32} , B_{c1} , B_{c2} .

Из-за отсутствия аналитической зависимости, описывающей (11) как функцию перечисленных переменных B_{31} , B_{32} , B_{c1} , B_{c2} , его анализ производится дискретно по заданному алгоритму. Для получения каждого последующего значения Φ_δ необходимо изменять значение основной варьируемой переменной при фиксированных значениях остальных переменных. Далее находится максимум сомножителя F_{M*} и определяются относительно него величины L и $B_{\delta m}$. После этого рассчитываются значения D_1 и D_{1H} . На основании полученных значений по (11) определяется числовое значение магнитного потока Φ_δ .

Описанный алгоритм позволяет при заданном входном параметре определить магнитный поток, соответствующий оптимальной продольной и поперечной геометрии магнитной системы.

В результате проведенных расчетов с использованием алгоритма (11) было установлено, что значение магнитного потока в воздушном зазоре как функции от индукций на участках магнитной цепи B_{32} , B_{c1} , B_{c2} имеет максимум по всем этим трем независимым переменным. Экстремум относительно индукции в зубцах статора B_{31} отсутствует по той причине, что значение этой индукции в соответствии с выражением (9) определяет внутренний диаметр статора и ротора. Из-за этого факта независимые между собой индукции B_{32} , B_{c1} , B_{c2} зависят от индукции B_{31} , которая при анализе (11) служит базовым параметром.

На основании алгоритма, рассмотренного ранее, расчет магнитного потока в воздушном зазоре Φ_δ был оформлен в качестве программы, позволяющей рассчитать значение магнитного потока при заданных значениях индукций на стальных участках магнитной цепи B_{z1} , B_{z2} , B_{c1} , B_{c2} .

При фиксированных значениях магнитных индукций B_{31} , B_{32} , B_{c1} магнитный поток рассчиты-

вался при различных значениях B_{c2} . Аналогично производились расчеты для B_{32} , B_{c1} . Далее изменялось значение индукции в зубцах статора, выступающего в роли базового параметра, и вычисления повторялись (кривые 1–3 соответствуют $B_{31} = 1.6; 1.7; 1.8$ Тл). Итоговые результаты представлены в виде кривых на рис. 2–4.

$\Phi_\delta \cdot 10^3, \text{ Вб}$

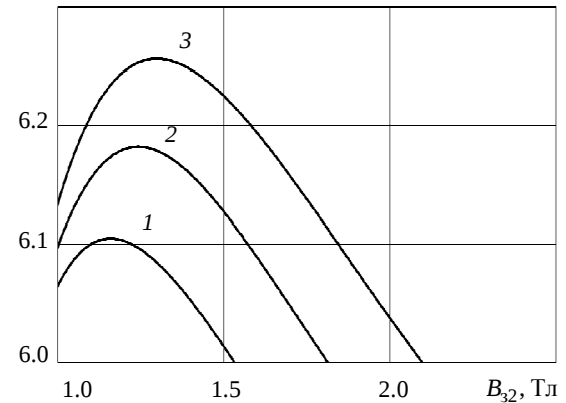


Рис. 2

$\Phi_\delta \cdot 10^3, \text{ Вб}$

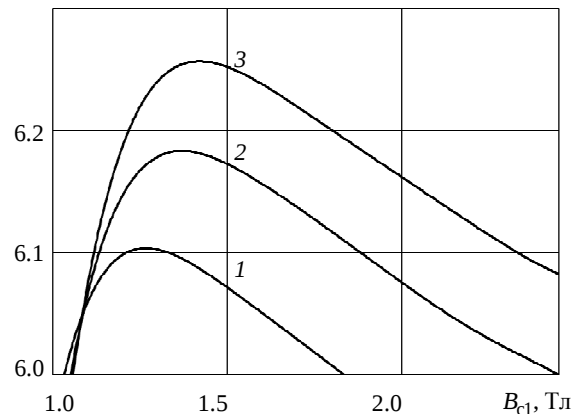


Рис. 3

$\Phi_\delta \cdot 10^3, \text{ Вб}$

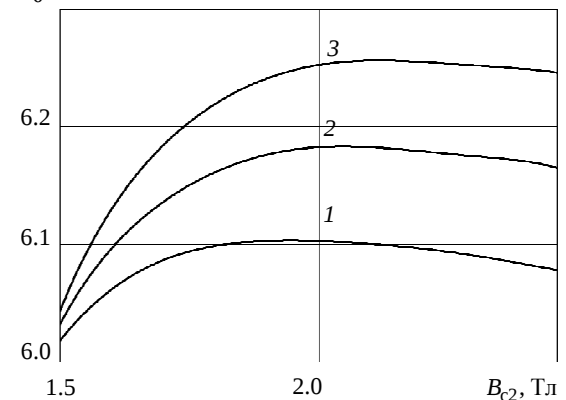


Рис. 4

Из рис. 2–4 видно, что магнитный поток в воздушном зазоре имеет максимум по трем независимым переменным B_{32} , B_{c1} , B_{c2} и значение этого максимума, а также значения соответствующих ему индукций на участках магнитной цепи зависят от индукции в зубцах статора B_{31} , с увеличением которой все интересующие величины возрастают.

Максимальному значению магнитного потока в воздушном зазоре соответствует минимальное значение числа витков при прочих равных условиях. Это может служить основанием для того, чтобы считать максимальное значение магнитного потока оптимальным.

Следует отметить, что представленные зависимости рассчитаны при условии оптимальности основных размеров, т. е. для каждой комбинации значений магнитных индукций на участках магнитной цепи рассчитаны соответствующие оптимальные основные размеры и оптимальная индукция в воздушном зазоре, после чего определялся соответствующий им магнитный поток.

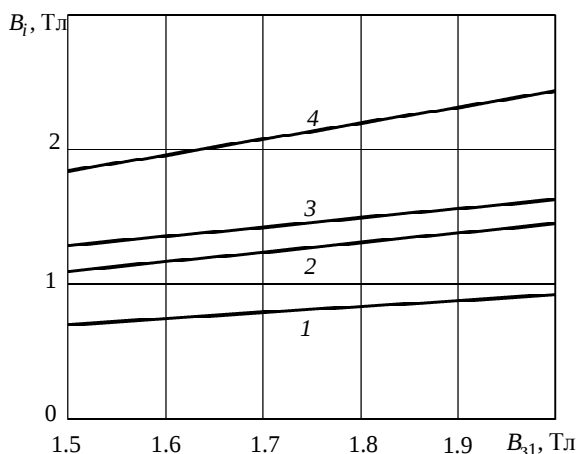


Рис. 5

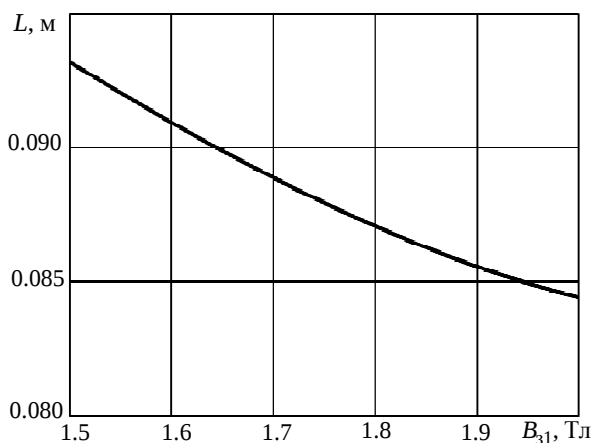


Рис. 6

Анализ влияния индукции в зубцах статора B_{31} на основные размеры двигателя и размеры его магнитной цепи показал, что с ее увеличением практически по линейному закону возрастают оптимальные значения всех остальных индукций, а именно B_{δ} , B_{32} , B_{c1} , B_{c2} (кривые 1–4 на рис. 5 соответственно).

На рис. 6 графически представлена зависимость, характеризующая влияние магнитной индукции в зубцах статора B_{31} на полную длину L асинхронного двигателя, и, в частности, оказывается, что повышение индукции B_{31} сопровождается уменьшением длины двигателя, что вполне согласуется с реальным физическим представлением о взаимной связи величин в асинхронном торцевом двигателе.

Таким образом, при заданном значении индукции в зубцах статора оказывается возможным, применяя представленную математическую модель, однозначно определить оптимальное значение магнитного потока в воздушном зазоре и значения индукции на оставшихся участках магнитной цепи, обеспечивающие наилучшее использование активного объема двигателя относительно его электромагнитного момента.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель асинхронного торцевого двигателя, обеспечивающая оптимизацию его продольно-поперечной геометрии относительно электромагнитного момента.
2. При фиксированном значении магнитной индукции в зубцах статора изменение магнитных индукций на оставшихся участках магнитной системы сопровождается изменением магнитного потока в воздушном зазоре Φ_{δ} .
3. Для фиксированного значения магнитной индукции в зубцах статора существует оптимальное значение магнитной индукции на каждом из оставшихся участков магнитной системы, при котором магнитный поток Φ_{δ} оказывается максимальным.
4. Повышение магнитной индукции в зубцах статора сопровождается практически линейным увеличением магнитных индукций на участках магнитной системы.
5. Увеличение оптимальных значений индукций на участках магнитной цепи имеет своим следствием возрастание магнитной индукции в воздушном зазоре.

6. Изменение магнитных индукций на участках магнитной системы обуславливает изменение оптимальной продольной геометрии. В частно-

сти, уменьшается оптимальная относительная длина пакета стали статора при увеличении индукций на участках магнитной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Г. Д., Ваганов М. А. Торцевой асинхронный двигатель // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 6. С. 68–74.

2. Ваганов М. А., Пименова И. А. Основы расчета электрических машин переменного тока. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 156 с.

M. A. Vaganov, G. D. Baranov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

AXIAL FLUX INDUCTION ASYNCHRONOUS ENGINE WITH THE MODIFIED GEOMETRY OF A TOOTH ZONE OF THE STATOR

The modified tooth zone of the stator gives the chance to simplify the choice of magnetic induction on sites of magnetic system on condition of limited values of density of current in stator winding conductors. At the same time in addition it turns out that are optimized not only induction on sites of magnetic system but also it is longitudinal cross geometry of the engine.

The electromagnetic moment, optimum length of a package became, magnetic induction in an air gap, the outer diameter of a package of steel, the modified geometry, magnetic induction in stator teeth, a maximum of a magnetic flux

УДК 621.313

Д. Ш. Абдуллин, И. А. Бутылин, М. А. Ваганов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние активного сопротивления обмотки статора на угловые характеристики синхронного явнополюсного двигателя

Рассматривается влияние активного сопротивления обмотки статора на свойства синхронного явнополюсного двигателя в зависимости от его мощности. Для удобства анализа вводятся в рассмотрение относительные значения синхронных индуктивных сопротивлений обмотки статора по продольной и поперечной осям, безразмерные функции, характеризующие потребляемую и электромагнитную мощность, а также электромагнитный момент синхронного двигателя.

Синхронный явнополюсный двигатель, активное сопротивление обмотки статора, составляющие функции электромагнитного момента, коэффициент возбуждения, электрические потери в обмотке статора, критический угол нагрузки

В синхронных машинах вообще и в синхронных явнополюсных машинах в частности в установившихся режимах работы при анализе и оценке их свойств активное сопротивление обмотки статора r_1 не учитывается, так как его числовое значение не превосходит одной десятой синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси, вследствие чего падение напряжения, ему

соответствующее, пренебрежимо мало в сравнении с падениями напряжения на индуктивных сопротивлениях обмотки статора, а также в энергетическом плане его роль оказывается незначительной. По этим причинам в классической теории синхронных машин вывод выражений для электромагнитной мощности и угловых характеристик выполняется без учета активного сопро-