

УДК 621.313.2

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ В ЗУБЦОВЫХ ЗОНАХ ВЕНТИЛЬНО- ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Продовжено дослідження особливостей роботи вентильно-індукторного двигуна і його індуктивних параметрів, шляхом розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів. Виконано аналіз розподілу магнітних потоків в зубцових зонах вентильно-індукторного двигуна залежно від кута повороту ротора

Продолжено исследование особенностей работы вентильно-индукторного двигателя и его индуктивных параметров, путём расчета магнитного поля методом конечных элементов. Выполнен анализ распределения магнитных потоков в зубцовых зонах вентильно-индукторного двигателя в зависимости от угла поворота ротора

Research of features of work of ventil'no-induktornogo engine and his inductive parameters is continued, putm calculation of the magnetic field by the method of eventual elements. The analysis of distributing of magnetic streams is executed in the zubcovykh areas of ventil'no-induktornogo engine depending on the corner of turn of rotor

Н. А. Осташевский
Кандидат технических наук, профессор*

В. И. Иваненко

Кандидат технических наук, профессор*

В. П. Шайда

Кандидат технических наук, доцент*
Контактный тел.: 097-45-43-415
E-mail: vito@kpi.kharkov.ua

Е. Ю. Юрьева

Кандидат технических наук, доцент*
*Кафедра «Электрические машины»
Национальный технический университет "Харьковский
политехнический институт"
ул. Фрунзе, 21; г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел.: (0572) 707-65-77

1. Введение

В настоящее время достаточно широкое распространение, в качестве привода, получили переключаемые реактивные двигатели (англ. switched reluctance motor, SRM), которые в отечественной литературе называются вентильно-индукторными двигателями (ВИД) [1].

Столь широкое распространение ВИД обусловлено простотой их конструкции, которая определяет относительно невысокую стоимость изготовления, а также простоту и дешевизну их эксплуатации.

ВИД является сложной электромеханотронной системой, которая представляет собой относительно новый тип электрической машины, поэтому его продвижение на рынке происходит достаточно медленно. Однако уже сейчас многие электротехнические фирмы мира рассматривают вопрос организации серийного

производства ВИД, а наиболее передовые уже наладили их выпуск.

За последние десять лет доля применения ВИД в регулируемом электроприводе возросла в восемь раз и достигла 8%, и по всей видимости, их доля будет расти и дальше.

Научные работы по ВИД проводятся в разных странах мира в течение более чем двадцати последних лет. В результате были достигнуты большие успехи по расчету магнитного поля, характеристик, разработке способов управления. Однако до сих пор нет полного понимания процессов, происходящих в ВИД, не существует точной математической модели, не разработаны эффективные методы проектирования. Причиной этого, является ряд особенностей ВИД: относительно высокое насыщение магнитной цепи; резко несинусоидальный характер изменения тока, потока и напряжения; многообразие режимов регулирования частоты вращения.

Поэтому дальнейшее исследование ВИД, с целью создания методик проектирования и компьютерных моделей, позволяющих на уровне мгновенных значений электромагнитных величин с высокой точностью определять функциональные параметры электропривода с ВИД является актуальной задачей.

В статье продолжены исследования, которые начаты в работе [2].

2. Методика проведения исследований ВИД

Расчет индуктивных параметров ВИД производился с помощью численного метода конечных элементов [3]. Для исследуемого ВИД с номинальными данными: $P_N = 15$ кВт, $U_N = 300$ В, $n_N = 1500$ об/мин, число зубцов статора – 8, число зубцов ротора – 6, статор шихтованный, унифицированный с широкорегулируемыми двигателями серии 4П (ОАО «Электромашина» г. Харьков) был выполнен расчет магнитного поля при различных взаимных положениях зубцов статора и ротора и различных магнитных состояниях, характеризующихся величиной тока фазы двигателя.

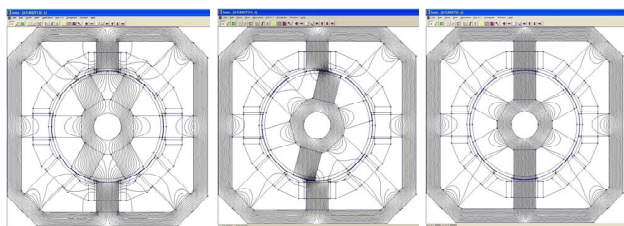
В частности, угол поворота ротора θ изменялся от нуля (ось зубца статора совпадает с осью межзубцового промежутка ротора) до 30° (оси зубцов статора и ротора совпадают) с шагом 2° , при этом для каждого взаимного положения зубцов статора и ротора, расчет магнитного поля проводился для 12 значений плотности тока J в расчетной области занятой фазной обмоткой ($J = 1 \div 12$ А/мм²). Плотность тока при номинальном значении тока фазы составляет $J = 5,98$ А/мм². Характеристикой магнитного состояния является коэффициент магнитного насыщения

$$K_\mu = \frac{F_\phi}{F_\delta}, \quad (1)$$

где F_ϕ и F_δ – МДС фазной обмотки и воздушного зазора соответственно.

При принятом диапазоне измерения плотности тока J , получены значения $K_\mu = 1,164 \div 3,287$. Значения K_μ относятся к согласованному положению осей зубцов статора и ротора, т. е. $\theta = 30^\circ$.

Таким образом, магнитное поле ВИД было рассчитано для 192 вариантов сочетания угла θ и J . В качестве примера на рис. 1 (а, б, в) приведены конфигурации магнитной системы и распределение магнитного поля в поперечном сечении при $\theta = (0^\circ; 14^\circ; 30^\circ)$, и $J = 6$ А/мм².



а) угол $\theta = 0^\circ$, б) угол $\theta = 14^\circ$, в) угол $\theta = 30^\circ$
 Рис. 1. Распределение магнитного поля в поперечном сечении ВИД при $J = 6$ А/мм²

2. Анализ результатов исследований ВИД

По результатам расчета определялись магнитные потоки в вершине зубца статора, воздушном зазоре, вершине и корне зубца ротора. Полученные результаты позволили провести анализ распределения магнитных потоков в зубцовых зонах статора и ротора и в воздушном зазоре, в зависимости от взаимного положения зубцов и степени насыщения магнитной цепи, определяемой величиной тока фазной обмотки. Магнитный поток в воздушном зазоре при всех углах поворота ротора определялся по результатам расчета индукции на средней линии воздушного зазора в пределах от левого края зубца статора до правого края набегающего зубца ротора (вращение ротора – против часовой стрелки). При полном рассогласовании $\theta = 0^\circ$, поток зубца статора симметрично распределяется между двумя соседними зубцами ротора, поток в воздушном зазоре в этом случае:

$$\Phi_\delta = \Phi_{zp} + \Phi_{np}^{\cdot} + \Phi_{np}^{\cdot\cdot}, \quad (2)$$

где Φ_{zp} – поток в вершине набегающего зубца ротора;

Φ_{np}^{\cdot} – поток в пазу, замыкающийся на левую грань набегающего зубца ротора;

$\Phi_{np}^{\cdot\cdot}$ – поток в пазу, замыкающийся на правую грань сбегающего зубца ротора.

Магнитный поток в корне набегающего зубца ротора

$$\Phi_{zpk} = \Phi_{zp} + \Phi_{np}^{\cdot},$$

т. е. отличается от потока в воздушном зазоре на величину Φ_{np}^{\cdot} .

Значения отношения $(\Phi_\delta / \Phi_{zpk})$ при различных угловых положениях ротора и токах фазной обмотки приведены в таблице 1.

Таблица 1

θ	0°	4°	8°	12°	16°	20°	24°	28°	30°
$I_{\phi N}$	1,579	1,271	1,093	1,032	1,010	1,000	0,995	0,986	0,961
$2I_{\phi N}$	1,577	1,272	1,111	1,047	1,017	1,005	1,003	0,997	0,982

По мере увеличения угла поворота ротора происходит перераспределение магнитного потока Φ_δ между его составляющими. При этом Φ_{zp} возрастает, а Φ_{np}^{\cdot} и $\Phi_{np}^{\cdot\cdot}$ уменьшаются, причем поток в пазу на грань сбегающего зубца ротора $\Phi_{np}^{\cdot\cdot}$ уменьшается в большей степени, чем поток в пазу на грань набегающего зубца ротора Φ_{np}^{\cdot} .

При угле поворота ротора $\theta \approx 16^\circ$, поток в пазу на грань сбегающего зубца ротора уменьшается практически до нуля, поэтому поток в воздушном зазоре

$$\Phi_\delta = \Phi_{zp} + \Phi_{np}^{\cdot},$$

и отношение потоков $(\Phi_\delta / \Phi_{zpk})$ становится примерно равным 1.

При дальнейшем увеличении угла поворота ротора ($\theta > 16^\circ$), отношение потоков $(\Phi_\delta / \Phi_{zpk})$ становится меньше 1, достигая при полном согласовании зубцов статора и ротора ($\theta = 30^\circ$) величины 0,96. Изменение величины отношения потоков при $16^\circ < \theta < 30^\circ$ объясняется наличием незначительного

«распушения» магнитного потока в воздушном зазоре, причем поток «распушения» с левой грани зубца статора не входит в область определения магнитного потока воздушного зазора.

При токе фазной обмотки $I_\phi = 2I_{\phi N}$, магнитное состояние магнитной цепи двигателя существенно меняется, коэффициент магнитного насыщения возрастает с $K_\mu = 1,88$ при $I_\phi = I_{\phi N}$ до $K_\mu = 3,287$ ($\theta = 30^\circ$), соответственно меняется и характер распределения магнитных потоков, а именно: возрастает удельный вес потоков в пазу на грани сбегающего и набегающего зубцов ротора Φ_{np} , Φ'_{np} , поток на грань сбегающего зубца ротора уменьшается до нуля при больших углах поворота ротора, в связи с чем отношение потоков $(\Phi_\delta / \Phi_{zpk})$ остается больше 1 вплоть до $\theta = 24^\circ$.

Таким образом, изменение угла поворота ротора оказывает существенное влияние на распределение магнитного потока между соседними зубцами ротора и между зубцом и пазом ротора.

Характеристикой, описывающей влияния угла поворота ротора на распределения магнитного потока между пазом и зубцом ротора, может служить отношение потоков в вершине и корне набегающего зубца ротора. В направлении от вершины к корню зубца магнитный поток возрастает, поэтому отношение $(\Phi_{zp} / \Phi_{zpk}) < 1$ при всех положениях ротора, кроме согласованного, когда $\theta = 30^\circ$ и поток в пазу практически отсутствует.

Величина отношения (Φ_{zp} / Φ_{zpk}) зависит также и от величины фазного тока, т.е. от степени насыщения, т. к. при $I_\phi = I_{\phi N}$ удельный вес потока в пазу будет меньше, чем при $I_\phi = 2I_{\phi N}$, поэтому и отношение потоков при $I_\phi = 2I_{\phi N}$ будет меньше. Значения (Φ_{zp} / Φ_{zpk}) при различных угловых положениях ротора и токах фазной обмотки приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\theta \backslash I_\phi$	30°	22°	14°	10°
$I_{\phi N}$	0,998	0,964	0,906	0,844
$2I_{\phi N}$	0,997	0,943	0,846	0,778

Отмечено, что при углах поворота ротора $\theta \leq 6^\circ$ отношение потоков не зависит от величины тока фазы, что объясняется ненасыщенностью магнитной системы двигателя при полном рассогласовании и близких к нему положениях ротора.

Распределение магнитных потоков в зубцовой зоне статора можно характеризовать отношением магнитного потока в вершине зубца статора Φ_{zc} к магнитному потоку в воздушном зазоре Φ_δ . Значения $(\Phi_{zc} / \Phi_\delta)$ при различных угловых положениях ротора и токах фазной обмотки приведены в табл. 3.

Таблица 3

$\theta \backslash I_\phi$	0°	14°	30°
$I_{\phi N}$	1,076	1,004	1,048
$2I_{\phi N}$	1,079	1,006	1,051

3. Выводы

Анализ распределения магнитного поля для всех сочетаний θ и J позволил сделать следующие выводы (см. рис. 1 а, б, в):

1) поток зубца статора Φ_z имеет следующие составляющие:

$$\Phi_z = \Phi'_\sigma + \Phi''_\sigma + \Phi'''_\sigma + \Phi'_{np} + \Phi''_{np} + \Phi_{zpn} + \Phi_{zpc}, \tag{3}$$

где Φ'_σ – поток рассеяния на соседние (неактивные) зубцы статора;

Φ''_σ – поток рассеяния на станину;

Φ'''_σ – поток рассеяния через соседние (неактивные) зубцы статора и ротора;

Φ'_{np} – поток в пазу ротора на левую грань набегающего зубца ротора;

Φ''_{np} – поток в пазу ротора на правую грань сбегающего зубца ротора;

Φ_{zpn} , Φ_{zpc} – потоки в набегающем и сбегающем зубцах ротора.

2) при полном рассогласовании и близких к нему положениях ротора поток Φ_{zc} больше потока Φ_δ за счет наличия потоков рассеяния с вершины зубца статора, причем эти потоки с левой грани зубца статора не входят в область определения потока Φ_δ . Величина тока фазной обмотки не влияет на соотношение потоков, т. к. магнитная индукция в зубцах не превышает 0,5 Тл;

3) при угловых положениях ротора $6^\circ \leq \theta \leq 26^\circ$ удельный вес потоков рассеяния зубца статора снижается и отношение потоков Φ_{zc} и Φ_δ практически равно 1;

4) при полном согласовании и близких к нему положениях ротора возрастает насыщение магнитной системы, индукция в зубце статора – 1,53 Тл при $I_\phi = I_{\phi N}$ и 1,83 Тл при $I_\phi = 2I_{\phi N}$, соответственно возрастают и потоки рассеяния, причем в большей мере составляющая Φ'''_σ , и отношение потоков Φ_{zc} и Φ_δ вновь становится больше 1, причем с увеличением насыщения это отношение возрастает;

5) при переходе от согласованного положения зубцов статора и ротора к полному рассогласованию магнитный поток зубца статора уменьшается в 8,31 раза при $I_\phi = I_{\phi N}$, и в 4,76 раз при $I_\phi = 2I_{\phi N}$.

Таким образом, изменение угла поворота ротора и степени насыщения магнитной цепи приводит к существенному перераспределению магнитных потоков в зубцовых зонах статора и ротора, а следовательно, и к изменению индуктивных параметров.

Литература

1. Антропов А. Т. Автоматизированный электропривод: тенденции развития / А. Т. Антропов // Itech – журнал интеллектуальных технологий. – 2008. - № 10. – С. 6 – 10.
2. Расчет индуктивных параметров вентильно-индукторного двигателя / М.О. Осташевский, В.М. Иваненко, В.П. Шайда, О. Ю.Юр'ева // Вісник НТУ «ХПИ» Збірник наук. праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків, НТУ «ХПИ» – 2008. – № 40. – С. 106 – 110.
3. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0 User's Manual, January 26, 2004 – Режим доступа: <http://femm.berlios.de>, 2003.