

УДК 621.313.

Н.А. ОСТАШЕВСКИЙ, канд. техн. наук,
В.Н. ИВАНЕНКО, канд. техн. наук,
В.П. ШАЙДА, канд. техн. наук,
Е.Ю. ЮРЬЕВА, канд. техн. наук

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
(г. Харьков)

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проведено дослідження магнітного поля вентильно-індукторного двигуна за допомогою методу кінцевих елементів. Розглянуті залежності параметрів магнітного поля від величини кута повороту ротора. Приведені рекомендації по вибору величини насичення магнітної системи і навантаження двигуна.

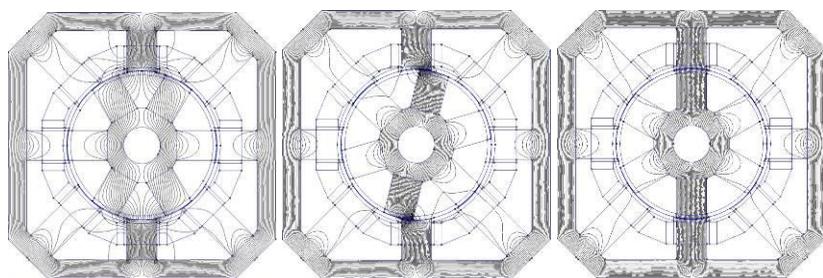
Проведено исследование магнитного поля вентильно-индукторного двигателя с помощью метода конечных элементов. Рассмотрены зависимости параметров магнитного поля от величины угла поворота ротора. Приведены рекомендации по выбору величины насыщения магнитной системы и нагрузки двигателя.

Расчет токов и моментов с помощью математической модели вентильно-индукторного двигателя, приведенной в [1], возможен при наличии зависимостей индуктивности фазы и ее производной от угла поворота ротора. Аналитические методы расчета индуктивных параметров основаны на существенных допущениях, не позволяющих получить достоверные результаты. Поэтому был использован численный метод – метод конечных элементов, в частности, программа, ориентированная на решение полевых задач в двухмерных областях [2]. Объектом исследования является вентильно-индукторный двигатель, разработанный авторами совместно с СКБ ОАО "Электромашина" (г. Харьков) со следующими номинальными данными: мощность 15 кВт, напряжение 300 В, частота вращения 1500 об/мин., число фаз статор 4. С целью унификации конструкции вентильно-индукторного двигателя с выпускаемыми двигателями постоянного тока серии 5П (ОАО "Электромашина") использована станина восьмигранная, фазные обмотки размещаются на главных и дополнительных полюсах, сечение которых выполнено одинаковым. Магнитная асимметрия, вызванная различной длиной полюсов статора, как показали дальнейшие исследования, не оказывает заметного влияния на индуктивные параметры фаз, имеющих "длинные" и "короткие" полюсы. Магнитная система изготовлена из стали 2411, воз-

душный зазор – 1 мм, число витков на одну фазу – 80. Необходимая МДС одной фазы в номинальном режиме определялась из расчета магнитной системы при согласованном положении полюсов статора и ротора, при этом магнитная индукция в воздушном зазоре составила 1,5 Тл.

Магнитное поле рассчитывалось для ряда взаимных положений зубцов ротора и статора, в частности, от полного рассогласования положений зубцов до их полного согласования. Угол поворота ротора при переходе от одного крайнего положения в другое составляет для данного двигателя 30° , шаг изменения угла поворота составил 2° . Количество узлов конечно-элементной сетки получилось 63479. С учетом обеспечения быстрого разгона двигателя при пуске с номинальной нагрузкой пусковые токи могут достигать двукратных номинальных, то есть магнитное состояние двигателя может изменяться в широком диапазоне. Поэтому на каждом шаге поворота ротора расчет магнитного поля производился для 12 значений плотности тока в расчетных областях, занятых фазными обмотками. Диапазон изменения плотности тока от 1 до 12 А/мм^2 , при этом плотность тока в номинальном режиме составляет $5,96 \text{ А/мм}^2$.

В качестве примера на рис.1 представлены результаты расчета магнитного поля для трех значений угла поворота ротора при плотности тока для номинального режима.



а – угол поворота 0° б – угол поворота 14° в – угол поворота 30°

Рис. 1. Распределение магнитного поля вентильно-индукторного двигателя

По результатам расчетов магнитного поля для всех значений угла поворота и плотности тока определялись значения магнитных потоков в зубце статора, в воздушном зазоре, в зубце ротора (вершина и корень зубца). Значения магнитных потоков в зубцах статора и ротора определялись на расстоянии 5 мм от поверхности зубцов, обращенных к воздушному зазору. Магнитный поток в воздушном зазоре определялся на средней линии зазора. Кроме того, определялись осредненные значения магнитной индукции в указанных сечениях. Потокосцепление фазы определялось по магнитному потоку в воздушном зазоре. По значению потокосцепления

определялись значения индуктивности фазы. В качестве примера приведены значения величин в табл. 1 и 2 для углов поворота 0° и 30° . Соответствующие зависимости потокосцепления фазы от тока фазы Ψ_f и индуктивности фазы от тока фазы L_f приведены на рис. 2 и 3. В табл. 2 дополнительно приведены значения МДС фазной обмотки и воздушного зазора и значения коэффициента насыщения.

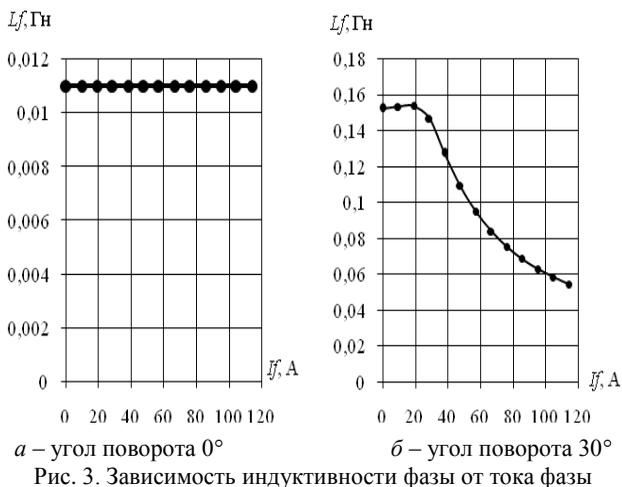
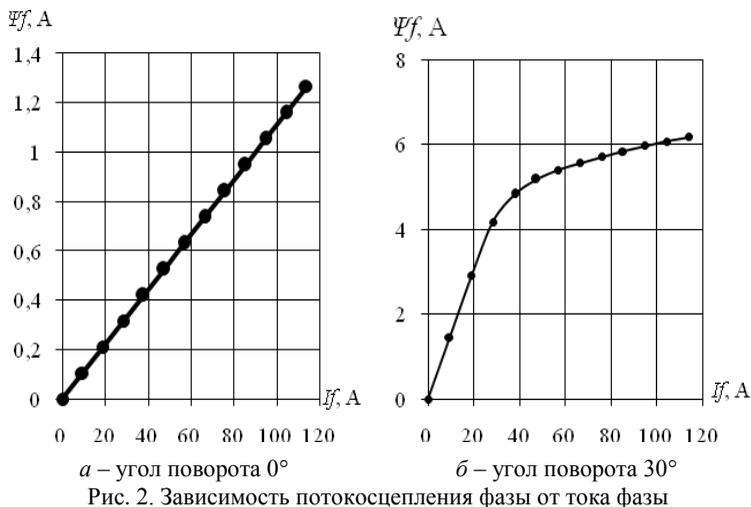


Таблица 1 – Расчет магнитного поля при угле поворота 0°

Величина	Плотность тока, А/мм ²					
	2	4	6	8	10	12
Поток в зубце статора, Вб	0,0028	0,0057	0,0085	0,0114	0,0142	0,0170
Поток в зазоре, Вб	0,0026	0,0053	0,0079	0,0105	0,0132	0,0158
Поток в зубце ротора, Вб	0,0007	0,0014	0,0020	0,0027	0,0034	0,0041
Поток в корне зубца, Вб	0,0017	0,0033	0,0050	0,0067	0,0083	0,0100
Индукция в зубце статора, Тл	0,0641	0,1283	0,1924	0,2566	0,3209	0,3849
Индукция в зазоре, Тл	0,0257	0,0515	0,0773	0,1031	0,1290	0,1550
Индукция в зубце ротора, Тл	0,0154	0,0307	0,0462	0,0617	0,0774	0,0931
Индукция в корне зубца, Тл	0,0378	0,0756	0,1136	0,1516	0,1898	0,2281
Число витков фазы	80	80	80	80	80	80
Потокосцепление фазы, А	0,2103	0,4207	0,6313	0,8424	1,0540	1,2660
Ток фазы, А	18,98	37,96	56,94	75,92	94,9	113,88
Индуктивность фазы, Гн	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111

Таблица 2 – Расчет магнитного поля при угле поворота 30°

Величина	Плотность тока, А/мм ²					
	2	4	6	8	10	12
Поток в зубце статора, Вб	0,0382	0,0633	0,0708	0,0749	0,0783	0,0810
Поток в зазоре, Вб	0,0364	0,0603	0,0675	0,0713	0,0746	0,0771
Поток в зубце ротора, Вб	0,0379	0,0627	0,0700	0,0739	0,0771	0,0796
Поток в корне зубца, Вб	0,0384	0,0633	0,0702	0,0737	0,0765	0,0785
Индукция в зубце статора, Вб	0,8636	1,4292	1,5990	1,6916	1,7697	1,8306
Индукция в зазоре, Тл	0,8218	1,3608	1,5224	1,6098	1,6832	1,7404
Индукция в зубце ротора, Тл	0,8561	1,4152	1,5798	1,6672	1,7402	1,7967
Индукция в корне зубца, Тл	0,8726	1,4377	1,5956	1,6743	1,7377	1,7852
Число витков фазы	80	80	80	80	80	80
Потокосцепление фазы, А	2,9136	4,8249	5,3977	5,7075	5,9677	6,1706
Ток фазы, А	18,98	37,96	56,94	75,92	94,90	113,88
Индуктивность фазы, Гн	0,1535	0,1271	0,0948	0,0752	0,0629	0,0542
МДС фазы, А	1518	3037	4555	6073	7592	9110
МДС воздушного зазора, А	1308	2166	2423	2563	2680	2771
Коэффициент магнитного насыщения	1,1605	1,402	1,8799	2,3695	2,8328	3,2874

Анализ результатов расчета позволяет оценить влияние величины тока фазы (т.е. насыщения) на величину индуктивности фазы при различных

углах поворота ротора. При углах поворота 0° , 2° , 4° , соответствующих полному рассогласованию зубцов статора и ротора и близким к этому состояниям, изменение тока фазы от $0,2I_{fN}$ до $2I_{fN}$ не приводит к заметному изменению индуктивности. Начиная с угла поворота 6° , отношение индуктивностей фазы при $2I_{fN}$ и $0,2I_{fN}$ начинает уменьшаться, достигая при полном совпадении осей зубцов статора и ротора величины $0,354$, то есть индуктивность фазы уменьшается в $2,82$ раза за счет насыщения. Отметим, что при изменении тока фазы от $0,2I_{fN}$ до $2,0I_{fN}$ степень насыщения существенно уменьшается по сравнению с предыдущим (табл. 2), соответственно уменьшается и отношение индуктивностей, равное в этом случае $1,615$.

Значительно более существенно на величину индуктивности фазы влияет угол поворота ротора, но при этом степень изменения величины индуктивности также зависит от магнитного состояния. На практике оценивают изменение индуктивности фазы отклонением значений, определенных при совпадении осей зубцов статора и ротора (угол поворота 30°) и при полном рассогласовании (угол поворота 0°). В нашем случае это отношение составляет $13,9$; $8,55$; $4,92$ при токах фазы $0,2I_{fN}$; $1,0I_{fN}$; $2,0I_{fN}$ соответственно.

Таким образом, насыщение уменьшает степень изменения индуктивности фазы примерно в $2,8$ раз. Если учесть, что электромагнитный момент вентильно-индукторного двигателя пропорционален величине производной индуктивности фазы по углу поворота ротора, то следует сделать вывод о снижении эффективности электромеханического преобразования энергии в условиях значительных перегрузок двигателя, а также целесообразности уменьшения насыщения магнитной системы вентильно-индукторного двигателя в режиме номинальной нагрузки. В частности, при уменьшении плотности тока в обмотке фазы с 6 А/мм^2 до 5 А/мм^2 , коэффициент магнитного насыщения уменьшается с $1,88$ до $1,635$, при этом отношение индуктивностей фазы возрастает с $8,55$ до $9,84$, т. е. на 15% .

Список литературы: 1. *Осташевский Н.А., Иваненко В.Н., Змиевской М.М.* Динамическое математическое моделирование вентильно-индукторного двигателя. // Вестник Национального технического университета "ХПИ", Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2004. – № 22. 2. *Meeker D.* Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.

Поступила в редколлегию 19.12.07