

ОПТИМИЗИРАНЕ РАЗМЕРИТЕ НА РОТОРА НА СИНХРОННА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Цветомир Стоянов, Радослав Спасов, Пламен Ризов

Резюме: В доклада са дадени и анализирани резултатите от изследване на размерите на постоянните магнити в ротора на синхронна машина с V-образно разположени постоянни магнити, използвана при хибридни автомобили. Анализът е направен на база на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина. Проведени са изследвания за постигане на размагнитване на машината.

Изследванията са извършени чрез моделиране на магнитното поле в среда на програмния продукт FEMM и разработени програмни модули за изчисляване на хармоничният състав на магнитната индукция.

Ключови думи: синхронни двигатели с постоянни магнити, метод на крайни елементи, хармоничен състав

OPTIMIZATION OF THE ROTOR'S SIZES OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE

Tsvetomir Stoyanov, Radoslav Spasov, Plamen Rizov

Abstract: The results from a study of the magnet's sizes in V-shaped permanent magnet synchronous machines, used in hybrid cars, are presented and analyzed in the paper. The analysis based on the main harmonic of the magnetic flux density in the air gap. Also has been made a demagnetization researches.

The analysis is performed by finite element magnetic field modeling and program modules for of magnetic flux density and total harmonic distortion coefficient calculation.

Key words: Finite element method, permanent magnet synchronous machine, harmonic distortion coefficient

1. Въведение

Синхронните машини с V – образно разположени вкопани постоянни магнити (СМПМ) в ротора са често използвани в електрозадвижванията на хибридни автомобили. Това се дължи на следните им предимства: висока ефективност,

голям скоростен диапазон и високо съотношение размери/мощност [3, 5]. Особено важно е оптималното определяне на размерите на постоянните магнити. От една страна те определят характеристиките на СМПМ, а от друга страна, високата им и често променяща се цена, води до определяне на цената на проектираната машина. Поради изискването към задвижващия електродвигател да работи в широк скоростен диапазон, [1, 2] е необходимо намаляване на основния магнитен поток чрез размагнитване на машината.

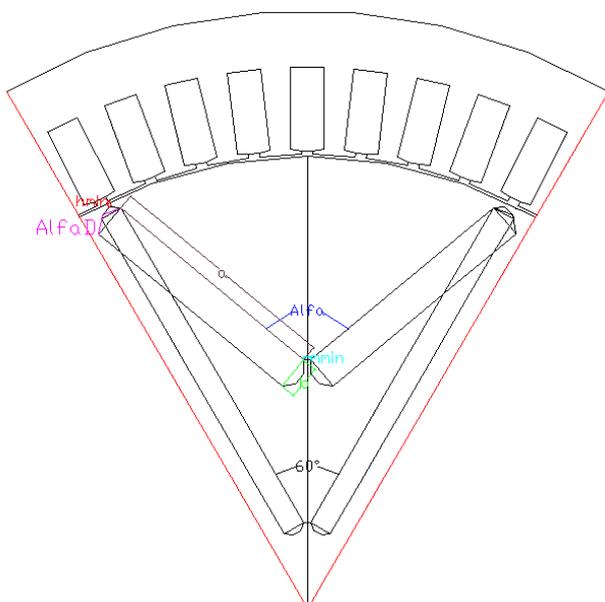
Целта на настоящия доклад е посредством моделиране на магнитното поле в синхронни машини с V-образно разположени постоянни магнити и хармоничен състав на кривата на магнитната индукция във въздушната междина да се определи:

- при константен обем на постоянните магнити да се определят оптималните им размери;
- хармоничния състав на кривата на магнитната индукция във въздушната междина, при всяко съотношение на размерите на магнита;
- обработка на получените резултати за бъдещото им използване, при съставяне на скоростната характеристика на СМПМ.

2. Проведени изследвания за постигане на максимална амплитуда на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина

След определянето на обема на магнитите и приемането му за константа, трябва да се определи геометричното разположение на магнитите в рамките на един полюс. Това става като при създаването на геометрията ъглите Alfa и Alfa_D се променят в зададени диапазони и се спазват някои ограничения, като минималните размери дадени на фиг. 1 [3, 4, 6].

$\text{Alfa}=60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ -ъгъл между магнитите, $\text{Alfa}_D=50^{\circ}\sim 120^{\circ}$ -ъгъл на дъгата на магнитното мостче, $m_{\min}=1$ mm-минимално разстояние между магнитите, $h_{\min}=0.8\text{--}1.75$ mm-минимално разстояние между дъгата на магнитното мостче и окръжността на ротора.



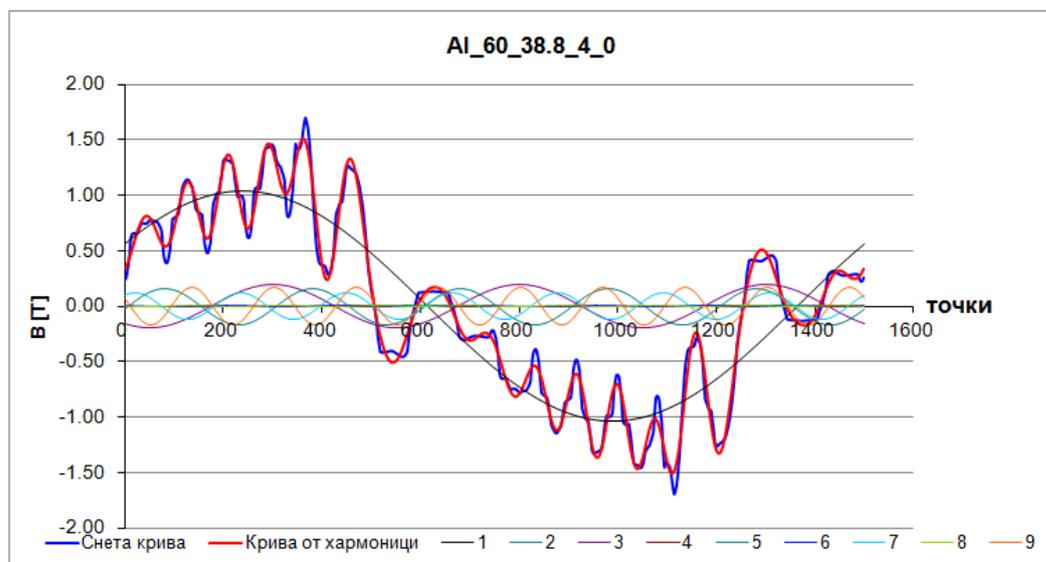
Фиг. 1. Геометрично разположение на магнитите в рамките на един полюс.

При вече определен обем на магнитите, са направени следните изследвания за машини с $P_2=10, 30, 60$ [kW] и $2p=6, 10$. Изследвани са всички възможни размери на магнитите при определена стъпка на ъгъл Alfa. Снета е кривата на магнитната индукция за 1500 точки от дъга, построена във въздушната междина за един чифт полюси / фиг. 2/. Еквивалентната токова плътност в канала е определена спрямо цялото му сечение и е $10\text{A}/\text{mm}^2$.



Фиг. 2. Дъга във въздушната междина за снемане на магнитната индукция.

На изчислените стойности на магнитната индукция е направен хармоничен анализ показан на фиг. 3.



Фиг. 3. Хармоничен анализ на магнитната индукция.

Данните за амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция са представени в табличен вид, заедно с размерите на магнита на таблица 1 за машина с мощност $P_2=10$ [kW], таблица 2 за машина с мощност $P_2=30$ [kW], и

таблица 3 за машина с мощност $P_2=60$ [kW]. Данните с удебелен шрифт представляват геометрията, при която е постигната магнитна индукция с максимална големина.

$P_2=10$ [kW] $2p=6$					$P_2=10$ [kW] $2p=10$				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B	Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B
[gp.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]	[gp.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	67.2	2.3	0.50	1.02556	60	37.0	3.0	0.50	1.07184
62	65.2	2.4	0.52	-	62	35.9	3.1	0.52	-
64	63.4	2.5	0.53	1.03082	64	34.9	3.2	0.53	-
66	61.7	2.5	0.55	-	66	34.0	3.2	0.55	1.06627
68	60.1	2.6	0.57	-	68	33.1	3.3	0.57	-
70	58.6	2.7	0.58	-	70	32.2	3.4	0.58	-
72	57.2	2.7	0.60	1.03866	72	31.5	3.5	0.60	1.06994
74	55.8	2.8	0.62	-	74	30.7	3.6	0.62	-
76	54.6	2.9	0.63	-	76	30.0	3.7	0.63	-
78	53.4	2.9	0.65	-	78	29.4	3.7	0.65	1.06119
80	52.3	3.0	0.67	1.04196	80	28.8	3.8	0.67	-
82	51.2	3.0	0.68	-	82	28.2	3.9	0.68	-
84	50.2	3.1	0.70	-	84	27.6	4.0	0.70	1.04796
86	49.3	3.2	0.72	-	86	27.1	4.1	0.72	-
88	48.4	3.2	0.73	1.0436	88	26.6	4.1	0.73	-
90	47.5	3.3	0.75	-	90	26.2	4.2	0.75	1.0217
92	46.7	3.3	0.77	-	92	25.7	4.3	0.77	-
94	45.9	3.4	0.78	-	94	25.3	4.4	0.78	-
96	45.2	3.5	0.80	1.0447	96	24.9	4.4	0.80	1.06055
98	44.5	3.5	0.82	-	98	24.5	4.5	0.82	-
100	43.9	3.6	0.83	-	100	24.1	4.6	0.83	-
102	43.2	3.6	0.85	-	102	23.8	4.6	0.85	1.02219
104	42.6	3.7	0.87	1.04424	104	23.5	4.7	0.87	-
106	42.1	3.7	0.88	-	106	23.2	4.8	0.88	-
108	41.5	3.8	0.90	-	108	22.9	4.8	0.90	1.0178
110	41.0	3.8	0.92	-	110	22.6	4.9	0.92	-
112	40.5	3.8	0.93	1.04295	112	22.3	4.9	0.93	-
114	40.1	3.9	0.95	-	114	22.0	5.0	0.95	1.01116
116	39.6	3.9	0.97	-	116	21.8	5.0	0.97	-
118	39.2	4.0	0.98	-	118	21.6	5.1	0.98	-
120	38.8	4.0	1.00	1.04153	120	21.4	5.2	1.00	0.9865

Табл. 1. Амплитуда на първи хармоник на магнитната индукция при $P_2=10$ [kW]

P ₂ =30 [kW] 2p=6				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B
[rp.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	91.8	3.0	0.50	0.9491
62	89.1	3.1	0.52	-
64	86.6	3.2	0.53	0.94983
66	84.3	3.3	0.55	-
68	82.1	3.4	0.57	-
70	80.0	3.5	0.58	-
72	78.1	3.6	0.60	0.95174
74	76.3	3.6	0.62	-
76	74.5	3.7	0.63	-
78	72.9	3.8	0.65	-
80	71.4	3.9	0.67	0.95349
82	70.0	4.0	0.68	-
84	68.6	4.0	0.70	-
86	67.3	4.1	0.72	-
88	66.1	4.2	0.73	0.95815
90	64.9	4.3	0.75	-
92	63.8	4.3	0.77	-
94	62.8	4.4	0.78	-
96	61.8	4.5	0.80	0.95559
98	60.8	4.6	0.82	-
100	59.9	4.6	0.83	-
102	59.1	4.7	0.85	-
104	58.2	4.8	0.87	0.9566
106	57.5	4.8	0.88	-
108	56.7	4.9	0.90	-
110	56.0	5.0	0.92	-
112	55.4	5.0	0.93	0.95842
114	54.7	5.1	0.95	-
116	54.1	5.1	0.97	-
118	53.5	5.2	0.98	-
120	53.0	5.2	1.00	0.9565

P ₂ =30 [kW] 2p=10				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B
[rp.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	47.1	4.4	0.50	1.11895
62	45.7	4.5	0.52	-
64	44.5	4.6	0.53	1.12225
66	43.3	4.7	0.55	-
68	42.1	4.9	0.57	-
70	41.1	5.0	0.58	-
72	40.1	5.1	0.60	1.12017
74	39.2	5.2	0.62	-
76	38.3	5.4	0.63	-
78	37.4	5.5	0.65	-
80	36.7	5.6	0.67	1.116
82	35.9	5.7	0.68	-
84	35.2	5.8	0.70	-
86	34.5	5.9	0.72	-
88	33.9	6.0	0.73	1.11217
90	33.3	6.2	0.75	-
92	32.8	6.3	0.77	-
94	32.2	6.4	0.78	-
96	31.7	6.5	0.80	1.10443
98	31.2	6.6	0.82	-
100	30.8	6.7	0.83	-
102	30.3	6.8	0.85	-
104	29.9	6.9	0.87	1.10093
106	29.5	7.0	0.88	-
108	29.1	7.0	0.90	-
110	28.8	7.1	0.92	-
112	28.4	7.2	0.93	1.09716
114	28.1	7.3	0.95	-
116	27.8	7.4	0.97	-
118	27.5	7.5	0.98	-
120	27.2	7.5	1.00	1.07414

Табл. 2. Амплитуда на първи хармоник на магнитната индукция при P₂=30 [kW]

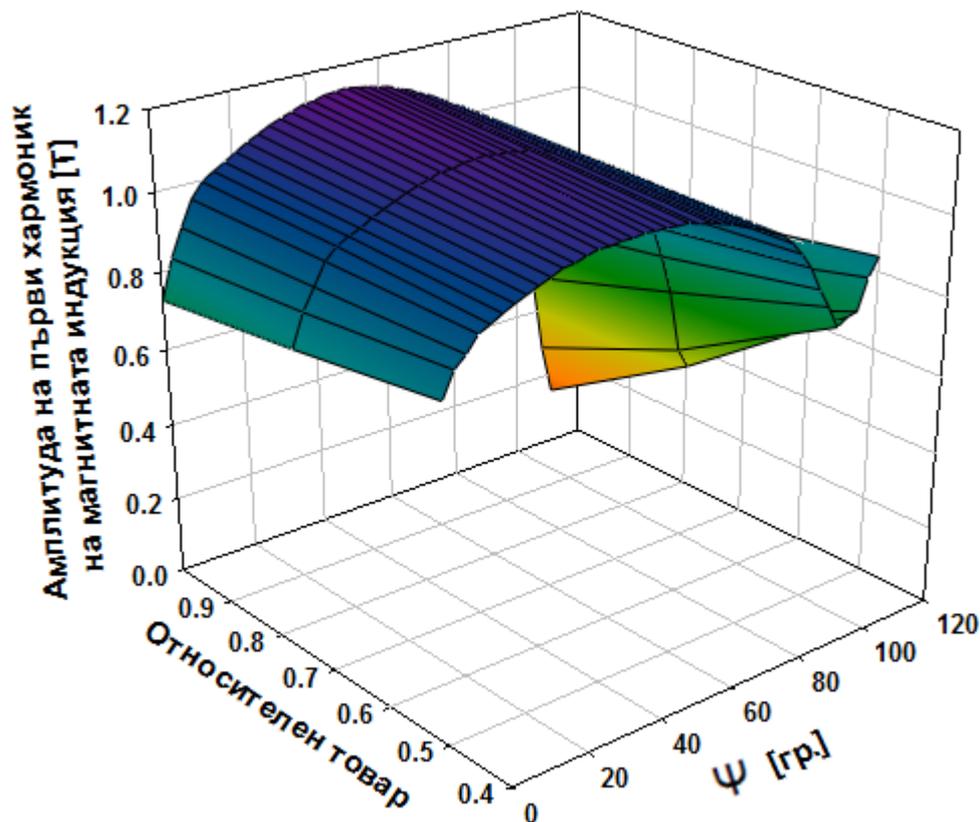
P ₂ =60 [KW] 2p=6				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B
[р.]	[mm]	[mm]	[-]	[Т]
60	106.4	6.5	0.50	1.01183
62	103.3	6.7	0.52	1.01369
64	100.4	6.8	0.53	1.01452
66	97.7	7.0	0.55	1.0158
68	95.1	7.2	0.57	-
70	92.7	7.4	0.58	1.01812
72	90.5	7.6	0.60	-
74	88.4	7.8	0.62	1.01953
76	86.4	8.0	0.63	-
78	84.5	8.1	0.65	1.02122
80	82.8	8.3	0.67	-
82	81.1	8.5	0.68	1.02364
84	79.5	8.6	0.70	-
86	78.0	8.8	0.72	1.02623
88	76.6	9.0	0.73	-
90	75.2	9.1	0.75	1.02399
92	73.9	9.3	0.77	-
94	72.7	9.4	0.78	-
96	71.6	9.6	0.80	-
98	70.5	9.7	0.82	-
100	69.4	9.9	0.83	1.01595
102	68.4	10.0	0.85	-
104	67.5	10.2	0.87	-
106	66.6	10.3	0.88	-
108	65.8	10.4	0.90	-
110	64.9	10.6	0.92	-
112	64.2	10.7	0.93	-
114	63.4	10.8	0.95	-
116	62.7	11.0	0.97	-
118	62.1	11.1	0.98	-
120	61.4	11.2	1.00	-

P ₂ =60 [KW] 2p=10				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B
[р.]	[mm]	[mm]	[-]	[Т]
60	85.3	9.5	0.50	1.07289
62	82.8	9.8	0.52	-
64	80.5	10.1	0.53	1.07509
66	78.3	10.3	0.55	-
68	76.3	10.6	0.57	-
70	74.4	10.9	0.58	-
72	72.6	11.2	0.60	1.0777
74	70.9	11.4	0.62	-
76	69.3	11.7	0.63	-
78	67.8	11.9	0.65	-
80	66.4	12.2	0.67	1.07542
82	65.0	12.5	0.68	-
84	63.8	12.7	0.70	-
86	62.6	12.9	0.72	-
88	61.4	13.2	0.73	1.07088
90	60.3	13.4	0.75	-
92	59.3	13.7	0.77	-
94	58.3	13.9	0.78	-
96	57.4	14.1	0.80	1.06945
98	56.5	14.3	0.82	-
100	55.7	14.5	0.83	-
102	54.9	14.8	0.85	-
104	54.1	15.0	0.87	1.06559
106	53.4	15.2	0.88	-
108	52.7	15.4	0.90	-
110	52.1	15.6	0.92	-
112	51.5	15.7	0.93	1.06236
114	50.9	15.9	0.95	-
116	50.3	16.1	0.97	-
118	49.8	16.3	0.98	-
120	49.3	16.4	1.00	1.05974

Табл. 3. Амплитуда на първи хармоник на магнитната индукция при P₂=60 [kW]

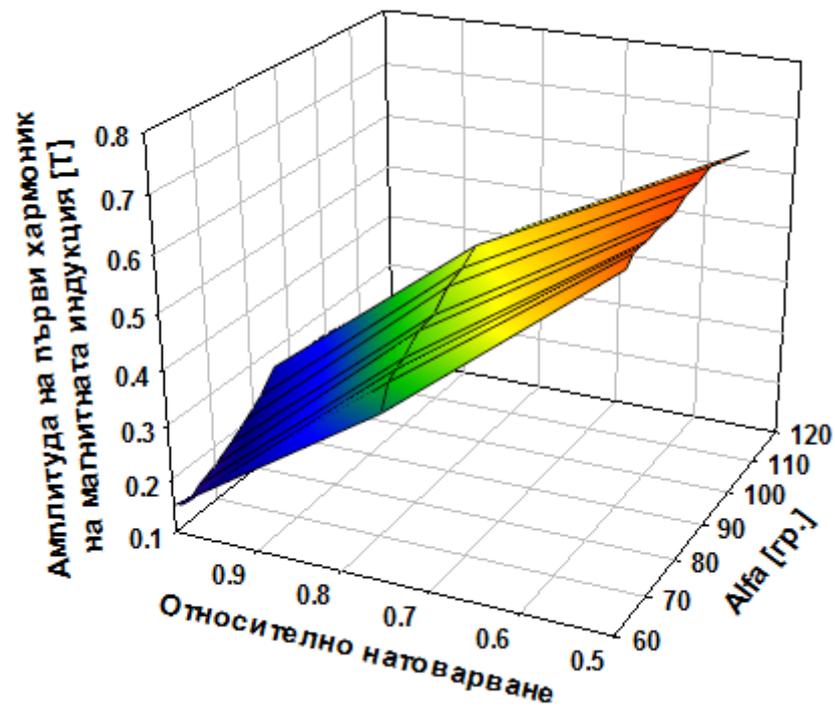
3. Проведени изследвания за постигане на максимално размагнитване на машината

Поради изискването към задвижващия електродвигател да работи в широк скоростен диапазон е необходимо намаляване на основния магнитен поток чрез размагнитване на машината. Това се постига чрез управление на инвертора, който да осигури размагнитваща съставка на статорния ток. Изследвана е размагнитващата съставка отговаряща на 50%, 75% и 100% от номиналния ток. За определяне на зоната на максимално размагнитване на машината при $P_2=60$ [kW], $2p=6$ и $2p=10$ ротора последователно се завърта с 41 стъпки в рамките на един чифт полюси. Еквивалентната токова плътност в канала е 50%, 75% и 100% от номиналната. За отчетените стойности на магнитната индукция при всяко положение на ротора е направен хармоничен анализ показан на фигура 3. Кривата на изменение на амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина при изменението на ъгъл Ψ (между тока и е.д.н.) и натоварването е показана фигура 4.

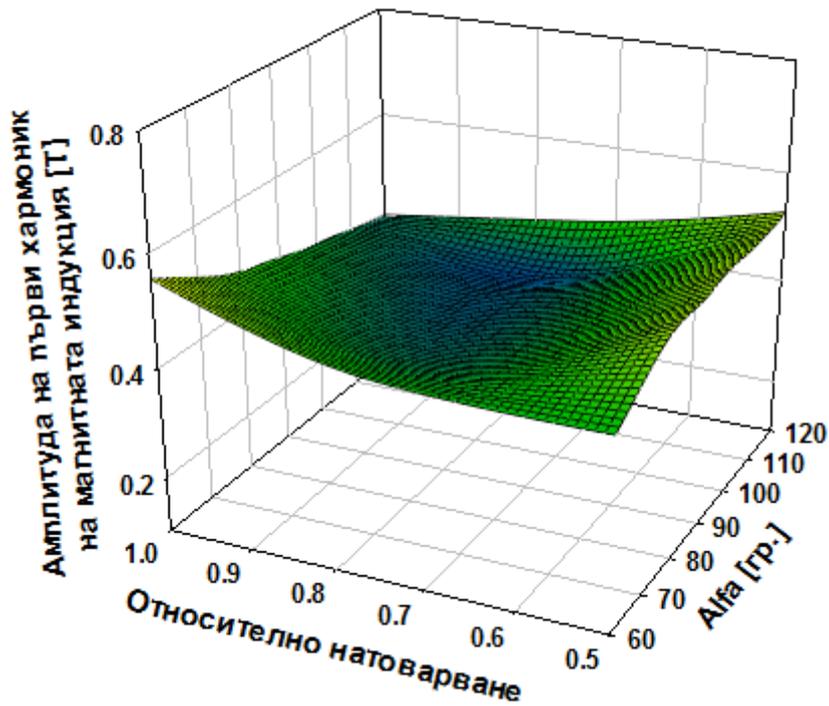


Фиг.4. Амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина във функция от натоварването и ъгъл Ψ .

След това за всички стойности за ъгъл α от фиг. 6 са създадени варианти с трите стойности на токовата плътност. След хармоничен анализ на кривата на магнитната индукция се определи стойността на първи хармоник във функция от натоварването и ъгъл α . Тази зависимост е показана на фиг. 5 за $2p=6$ и на фиг. 6 за $2p=10$.



Фиг.5. Амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във функция от натоварването и ъгъл Alfa при $2p=6$.



Фиг.6. Амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във функция от натоварването и ъгъл Alfa при $2p=10$.

4. Анализ и изводи

1. При проведените изследвания за оптимизиране на конструкцията на магнитната система на ротора, при които първият хармоник на магнитната индукция във въздушната междина е максимален, се оказа, че амплитудата няма изразен максимум и е почти еднаква в целия диапазон на изменение на ъгъл Alfa. Получените данни показват, че първоначално изчислените размери на магнита при проектирането се отклоняват незначително от тези, при които има максимална индукция.
2. При изследване на възможностите за размагнитване на машината, има изразена оптимална зона, при която размагнитването е максимално. Тази зона съществува при двете конструкции на машината и при различни натоварвания. Степента на размагнитване зависи от натоварването и е по-силно изразена при машина с $2p=6$.
3. Имайки предвид първите два извода следва, че избора на ъгъл Alfa е достатъчно да се проведе за постигане на максимално размагнитване.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бербиренков, И. , В. Лохнин, Винтильные тяговые двигатели в электроприводе, МАМИ, 2011.
- [2] Chen, L. , J. Wang, P. Lombard, P. Lazari, V. Leconte, High efficiency motor design for electrical vehicles, University of Sheffield, 2012.
- [3] Hahlbeck, S. , D. Gerling, Design considerations for rotors with embedded V-Shape permanent magnets, proceedings of the 2008 International conference on electrical machines, 2008.
- [4] Jung, D., Y. Kim, U. Lee, H. Lee, Optimum design of the electric vehicle traction motor using the hairpin winding, Hyundai mobis Co.
- [5] Tariq, A. , C. Baron, E. Strangas, Iron and magnet losses and torque calculation of interior permanent magnet synchronous machines using magnetic equivalent circuit, IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 12, december 2010.
- [6] Zadeh, S. , R. Ghasemi, Design optimization of permanent magnet synchronous motors for high torque capability and low magnet volume, 2004.

Автори: инж. **Цветомир Методиев Стоянов** докторант от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail cmethodiev@tu-sofia.bg; **Радослав Лазаров Спасов** доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail: rls@tu-sofia.bg; **Пламен Миланов Ризов**, доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail: pmri@tu-sofia.bg