

УДК 621.313.84

## ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ МАГНИТА, ШИРИНЫ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ВСТАВКИ И ВЕЛИЧИНЫ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА КОЛЬЦЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Н. А. Белокурова, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин

*Проанализированы результаты влияния ширины магнита, ширины ферромагнитной вставки и величины воздушного зазора на величину удельной электромагнитной силы кольцевого двигателя-маховика. Расчеты проводились на параметрической модели, созданной на основе метода конечных элементов. При этом использовался математический аппарат полного факторного эксперимента. Получено, что наиболее влияющей на рост удельной силы из рассмотренных факторов в пределах уровней варьирования является величина воздушного зазора, ее влияние в два раза больше, чем влияние ширины магнитов, и в четыре раза больше, чем влияние ширины вставок. Для подтверждения адекватности созданной математической модели и результатов полного факторного эксперимента создан макет ротора двигателя-маховика и проведены его испытания.*

**Ключевые слова:** электрическая машина, кольцевой двигатель-маховик, постоянный магнит, удельная сила.

Конструкция кольцевого двигателя-маховика (ДМ) с улучшенными массогабаритными характеристиками получена за счет совмещения подшипникового узла с ротором и защищена патентом [1]. Для исследования влияния ширины магнита, ферромагнитной вставки и величины воздушного зазора воспользуемся методом планирования эксперимента, а именно проведем полный факторный эксперимент (ПФЭ) [2] на двух уровнях.

В качестве факторов могут быть выбраны: ширина магнита  $b_m$ , мм; ширина вставки  $b_{вс}$ , мм и величина воздушного зазора  $\delta$ , мм.

В качестве функции отклика будем рассматривать удельную электромагнитную силу по длине машины  $F_{уд}$ . Использование удельной величины необходимо для устранения влияния длины рассматриваемой элементарной машины (участка кольцевого двигателя-маховика) на величину силы, так как при изменении ширин магнита и вставок будут изменяться величина полюсного деления  $\tau$  и длина элементарной машины.

Тогда функция отклика будет иметь вид:

$$F_{уд} = f(b_m, b_{вс}, \delta). \quad (1)$$

Принятые уровни факторов, а также их обозначения приведены в табл. 1.

Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса используем модель первого порядка:

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Матрица планирования ПФЭ  $2^3$  с учетом взаимодействия факторов представлена в табл. 2.

Эксперименты проводились путем компьютерного моделирования участка двигателя-маховика с последующим полевым расчетом методом конечных элементов в программе Ansys [3]. Для проведения эксперимента была создана параметрическая осесимметричная модель, где в качестве входных параметров использовались исследуемые факторы, а также электрическая частота, скорость движения ротора, число витков в катушке и плотность тока. Пример расчетной модели приведен на рис. 1. Для всех опытов проведены полевые расчеты, результаты приведены в табл. 3.

Таблица 1

**Принятые уровни факторов полного факторного эксперимента, кодирование факторов**

Факторы	Кодовое обозначение	$b_m$ , мм	$b_{вс}$ , мм	$\delta$ , мм
		$X_1$	$X_2$	$X_3$
Нижний уровень	-1	4	3	0,5
Верхний уровень	+1	8	9	3
Основной уровень	0	6	6	1,75
Интервал варьирования	$dx_i$	2	3	1,25

Таблица 2

**Матрица планирования полного факторного эксперимента с учетом взаимодействия факторов**

№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$y$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	$y_1$
2	+	-	+	+	-	-	+	-	$y_2$
3	+	+	-	+	-	+	-	-	$y_3$
4	+	-	-	+	+	-	-	+	$y_4$
5	+	+	+	-	+	-	-	-	$y_5$
6	+	-	+	-	-	+	-	+	$y_6$
7	+	+	-	-	-	-	+	+	$y_7$
8	+	-	-	-	+	+	+	-	$y_8$

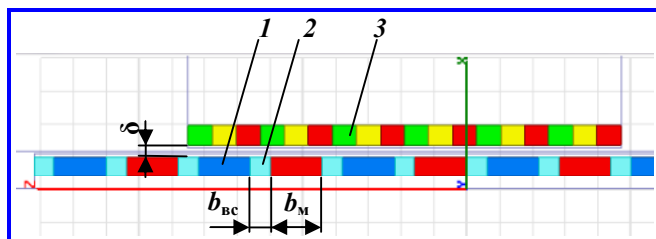


Рис. 1. Осесимметричная модель двигателя-маховика с шириной магнита  $b_m = 8$  мм, шириной вставки  $b_{vc} = 3$  мм и воздушным зазором  $\delta = 1,75$  мм: 1 – магниты; 2 – ферромагнитная вставка; 3 – катушка обмотки статора

Таблица 3  
Результаты полевых расчетов для моделей опытов полного факторного эксперимента

Номер опыта	Сила одной элементарной машины $F$ , Н	Длина одной элементарной машины $l$ , мм	Удельная сила по длине машины (Ansys) $F_{уд}$ , Н/м	Расчетная удельная сила (по формуле 3) $\hat{y}$ , Н/м
1	6,183	34	181,853	181,87
2	3,494	26	134,385	134,39
3	4,07	22	185,000	184,99
4	1,476	14	105,429	105,43
5	8,83	34	259,706	259,71
6	5,696	26	219,077	219,07
7	7,375	22	335,227	335,23
8	3,973	14	283,786	283,79

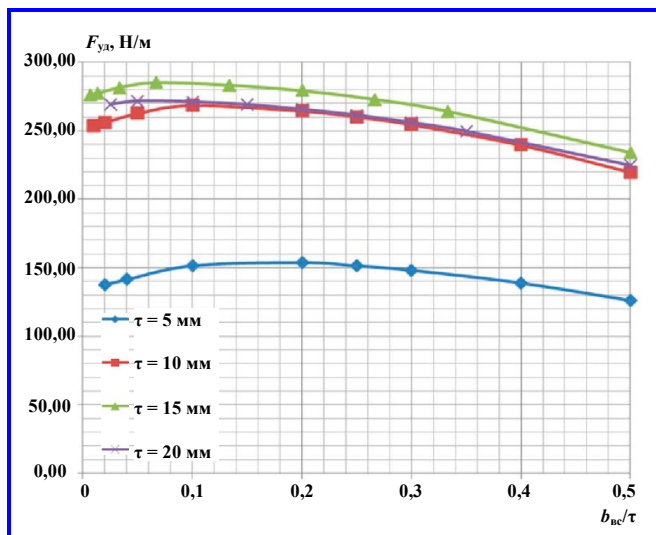


Рис. 2. График зависимости удельной электромагнитной силы от соотношения ширины вставки и полюсного деления

Далее по формулам, приведенным в [2], вычисляем коэффициенты уравнения (2), и уравнение принимает вид:

$$\hat{y} = 213,06 + 27,39X_1 - 14,3X_2 - 61,39X_3 - 5,36X_1X_2 + 4,37X_1X_3 + 20,76X_2X_3 - 2,66X_1X_2X_3. \quad (3)$$

Подставив значения факторов в уравнение (3), получаем значение функции отклика для каждого опыта, результаты приведены в табл. 3. Расхождение значений удельной силы, полученных в результате математического эксперимента (с использованием Ansys) и вычисленных по уравнению (3), не превышает 0,1%. Раскодированное уравнение (3) выглядит так:

$$F_{уд} = 312,14 + 12,27b_m - 12,82b_{vc} - 105,58\delta - 0,27b_m b_{vc} + 3,88b_m \delta + 7,66b_{vc} \delta - 0,35b_m b_{vc} \delta. \quad (4)$$

На основании полученных результатов и анализа уравнения (3) для рассматриваемой области значений факторов можно сделать следующие выводы:

- с увеличением ширины магнита удельная сила возрастает;
- с уменьшением ширины ферромагнитной вставки удельная сила возрастает;
- с уменьшением величины воздушного зазора удельная сила возрастает;
- наиболее влияющей на рост удельной силы из рассматриваемых факторов является величина воздушного зазора, ее влияние в два раза больше, чем влияние ширины магнитов, и в четыре раза больше, чем влияние ширины вставок;
- наряду с линейными эффектами значимым оказался также эффект взаимодействия  $X_2X_3$  – величины зазора и ширины вставки.

При проектировании двигателя-маховика кольцевой конструкции для улучшения характеристик маховика необходимо стремиться к уменьшению воздушного зазора, ограничением служат конструктивные и технологические возможности.

Для того чтобы определить оптимальное соотношение ширины вставки и полюсного деления при выбранном диаметре магнитов  $d_m$  и варианте обмотки  $q = 1$ , проведем еще одно исследование.

В рамках одного полюсного деления будет изменяться соотношение ширины магнита и вставки. Для этого в ту же параметрическую модель введены значения ширины вставок и магнитов согласно табл. 4. Величина воздушного зазора во всех последующих расчетах этого исследования равна 1,5 мм, плотность тока 15 А/мм<sup>2</sup>. Для всех случаев проведены расчеты, результаты представлены на графиках рис. 2 и в табл. 4.

Таблица 4

**Значения ширин вставок и магнитов для расчетных моделей,  
результаты расчетов**

$b_{вс}/\tau$	Ширина магнита $b_m$ , мм	Ширина вставки $b_{вс}$ , мм	Сила $F$ , Н	Длина машины $l$ , мм	Удельная сила $F_{уд}$ , Н/м
0,01	9,9	0,1	5,070	20	254
0,02	9,8	0,2	5,119		256
0,05	9,5	0,5	5,255		268
0,1	9	1	5,373		269
0,2	8	2	5,291		264
0,25	7,5	2,5	5,205		260
0,3	7	3	5,092		255
0,4	6	4	4,792		240
0,5	5	5	4,395		220
0,02	4,9	0,1	1,377		10
0,04	4,8	0,2	1,415	142	
0,1	4,5	0,5	1,517	152	
0,2	4	1	1,540	154	
0,25	3,75	1,25	1,516	152	
0,3	3,5	1,5	1,483	148	
0,4	3	2	1,39	139	
0,5	2,5	2,5	1,262	126	
0,007	14,9	0,1	8,285	30	276
0,013	14,8	0,2	8,322		277
0,033	14,5	0,5	8,45		282
0,067	14	1	8,557		286
0,133	13	2	8,502		283
0,2	12	3	8,382		279
0,27	11	4	8,190		273
0,33	10	5	7,929		264
0,5	7,5	7,5	7,028		234
0,025	19,5	0,5	10,770		40
0,05	19	1	10,864	272	
0,1	18	2	10,844	271	
0,15	17	3	10,760	269	
0,2	16	4	10,623	266	
0,25	15	5	10,451	261	
0,3	14	6	10,234	256	
0,35	13	7	9,978	249	
0,5	10	10	8,984	225	

В результате можно сделать вывод о том, что при выбранном диаметре магнитов 10 мм и обмотке с числом катушек на полюс и фазу  $q = 1$ , максимальные значения удельной электромагнитной силы достигаются при значениях полюсного деления от 14 до 16 мм, при этом ширина вставки должна составлять не более четверти полюсного деления.

Для подтверждения полученных выводов о ширинах магнитов и вставок был создан макет.

В расчетных моделях ротор движется во времени, и токи в обмотках статора изменяются во времени. Для каждого шага ротора проводится полевой расчет, и, таким образом, получаются графики зависимостей расчетных величин от времени. При помощи макета моделируется только один расчетный момент времени, так как реализация макетов с вращающимся ротором для разных значений полюсных делений имеет значительную ресурсозатратность.

Для удобства выберем такой момент времени, когда значение тока в катушках одной из фаз равно нулю, тогда в катушках двух других фаз текут токи, равные по модулю и противоположные по направлению. Тогда для случая  $q = 1$  шесть катушек одной элементарной машины расчетной модели можно заменить двумя катушками в макете, длина каждой катушки макета равна удвоенной длине катушки расчетной модели.

Конструкция ротора макета приведена на рис. 3. На полиамидную шпильку 1 надеваются магниты 2 и вставки 3 и стягиваются через полиамидные шайбы 4 при помощи гаек 5. Ширина магнитов и вставок составляет 1 мм, поэтому можно достаточно просто собрать ротор с любой комбинацией ширин магнитов и вставок, собирая их пакетами из элементов по 1 мм. На шпильке закреплена проволока, за которую в дальнейшем ротор будет вытягиваться динамометром. Для снижения трения ротора о трубку ротор обработан фторопластовой смазкой.

На рис. 4 представлена фотография макета. Статор представляет собой поликарбонатную трубку 1, с выточенными на внешней стороне пазами, в которые уложено количество витков  $w$  катушки 3. Катушки подключены к источнику постоянного тока Б5-71/1 4.

Ротор 2 за прикрепленную к нему петлю из проволоки при помощи весов 5 вытягивается из трубки, при этом катушки 3 создают электромагнитное поле, удерживающее ротор. В эксперименте фиксируется усилие, необходимое для сдвига ротора из одного положения в следующее.

Результаты измерений приведены в табл. 5. График зависимости удельной электромагнитной силы от соотношения ширины вставки к величине полюсного деления для полюсных делений 10 и 15 мм приведен на рис. 5.

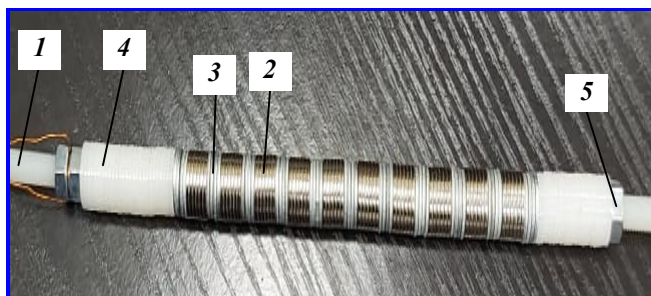


Рис. 3. Конструкция ротора макета

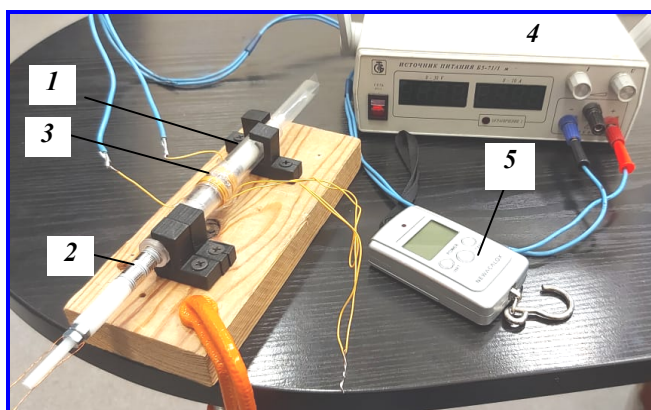


Рис. 4. Фотография макета для измерения электромагнитной силы при разных ширинах магнитов и вставок: 1 – поликарбонатная трубка; 2 – ротор; 3 – катушки статора; 4 – источник постоянного тока Б5-71/1; 5 – электронные весы

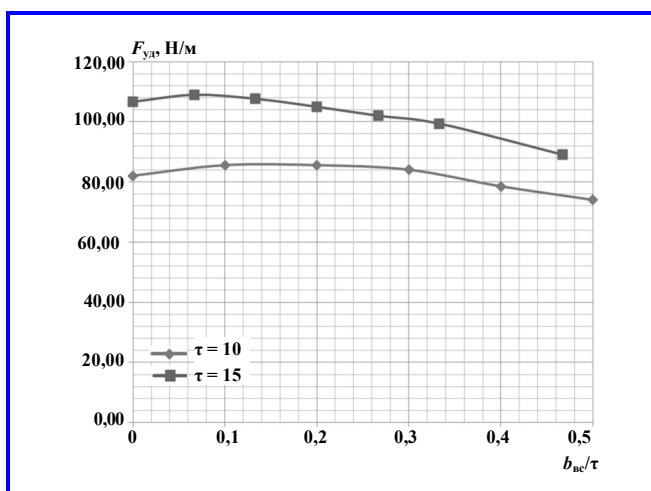


Рис. 5. График зависимости удельной электромагнитной силы от соотношения ширины вставки к величине полюсного деления для полюсных делений 10 и 15 мм

Таблица 5

Измеренные значения сил

$\tau = 10 \text{ мм}$							
$I, \text{ А}$	7,52						
$w, \text{ шт.}$	18						
$b_{\text{вс}}, \text{ мм}$	0	1	2	3	4	5	
$F_1, \text{ Н}$	1,60	1,70	1,65	1,70	1,60	1,50	
$F_2, \text{ Н}$	1,70	1,75	1,80	1,75	1,50	1,45	
$F_3, \text{ Н}$	1,70	1,75	1,75	1,65	1,55	1,55	
$F_4, \text{ Н}$	1,60	1,75	1,75	1,70	1,55	1,40	
$F_5, \text{ Н}$	1,60	1,60	1,60	1,60	1,65	1,50	
$F_{\text{ср}}, \text{ Н}$	1,64	1,71	1,71	1,68	1,57	1,48	
$F_{\text{уд}}, \text{ Н/м}$	82,0	85,5	85,5	84,0	78,5	74,0	
$\tau = 15 \text{ мм}$							
$I, \text{ А}$	7,51						
$w, \text{ шт.}$	32						
$b_{\text{вс}}, \text{ мм}$	0	1	2	3	4	5	7
$F_1, \text{ Н}$	3,20	3,30	3,15	3,10	3,05	3,05	2,65
$F_2, \text{ Н}$	3,20	3,25	3,35	3,10	3,00	2,95	2,70
$F_3, \text{ Н}$	3,10	3,20	3,25	3,20	3,15	2,95	2,65
$F_4, \text{ Н}$	3,30	3,25	3,20	3,20	3,05	3,05	2,65
$F_5, \text{ Н}$	3,20	3,20	3,20	3,15	3,05	2,90	2,70
$F_{\text{ср}}, \text{ Н}$	3,20	3,27	3,23	3,15	3,06	2,98	2,67
$F_{\text{уд}}, \text{ Н/м}$	106,7	109,0	107,7	105,0	102,0	99,3	89,0

Для проверки сходимости эксперимента с расчетными значениями силы, получаемыми в той же параметрической расчетной модели, в качестве исходных данных были введены геометрия магнитной системы изготовленных макетов, плотность тока с учетом коэффициента заполнения и количество витков в катушках. Полученные расчетные значения сил приведены в табл. 6 и на рис. 6.

Эксперимент подтвердил адекватность расчетов, погрешность не превышает 5% в каждом из рассмотренных случаев. Погрешность может быть обусловлена тем, что в макете ротора магниты и вставки набираются из отдельных элементов, шайб и магнитов, толщиной 1 мм. Шайбы и магниты имеют цинковое покрытие, это не учитывается в модели. Даже при плотном примыкании элементов друг к другу между ними возможны микрозоры, не учитываемые в модели. Также вклад в погрешность вносят неточности расположения и геометрии катушек.

В результате эксперимента подтвердились выводы, полученные расчетным путем: для маховиков с диаметром магнита 10 мм и числом катушек на полюс и фазу  $q = 1$ . Полюсное деление при диаметре ротора 10 мм для достижения максимальной удельной силы должно составлять от 14 до 16 мм. Ширина ферромагнитной вставки должна выбираться в 4 и более раз тоньше, чем ширина магнита.

Таблица 6

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для случая  $b_{\text{вс}} = 1$

	$F_{\text{экспер}}, \text{ Н}$	$F_{\text{расчет}}, \text{ Н}$	Погрешность, %
$\tau = 10 \text{ мм}$	1,71	1,79	4,5
$\tau = 15 \text{ мм}$	3,27	3,34	2,1

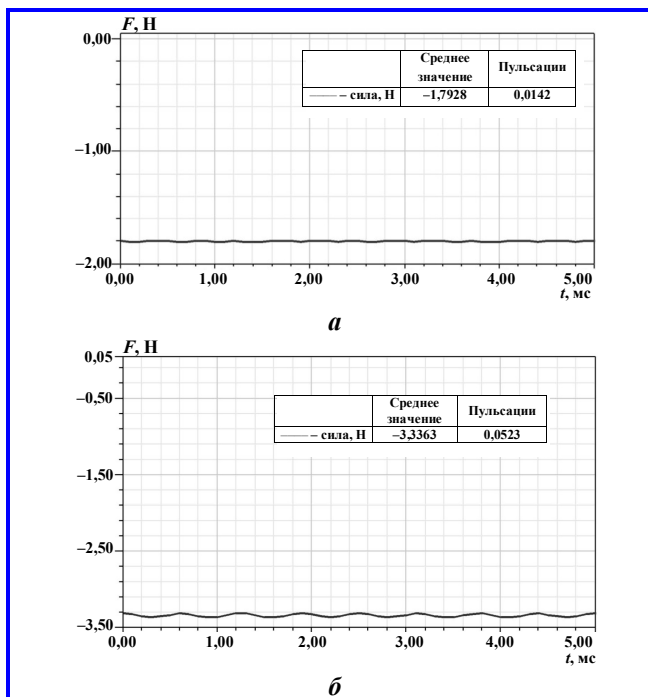


Рис. 6. График зависимости электромагнитной силы от времени для  $\tau = 10 \text{ мм}$  (а) и  $\tau = 15 \text{ мм}$  (б)

### Выводы

1. На основе математической модели расчета электромагнитной силы методом конечных элементов создана параметрическая модель, где в качестве входных параметров использовались ширина магнита, ширина ферромагнитной вставки, величина воздушного зазора, а также электрическая частота, скорость движения ротора, плотность тока в катушке.

2. В результате расчетов получено, что в исследуемой области варьирования факторов удельная сила возрастает с увеличением ширины магнита, с уменьшением ширины ферромагнитной вставки, с уменьшением величины воздушного зазора. Наиболее значимым фактором является величина воздушного зазора, ее влияние в два раза больше, чем влияние ширины магнитов, и в четыре раза больше, чем влияние ширины вставок.

3. Для подтверждения проведенных расчетов создан макет. В ходе эксперимента подтверждены адекватность математической модели, а также

выводы, полученные расчетным путем для маховиков с диаметром магнита 10 мм. Максимальные значения удельной электромагнитной силы достигаются при значениях полюсного деления от 14 до 16 мм при этом ширина вставки должна составлять не более четверти величины полюсного деления.

### Литература

1. Патент на изобретение № 2650178 Российская Федерация, МПК H02K 21/14 (2006.01), H02K 7/02 (2006.01), H02K 1/27 (2006.01). Двигатель-маховик : № 2017131262 : заявл. 06.09.2017 : опубл. 11.04.2018 / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, И. Ю. Пугач, Н. А. Белокурова, Н. А. Красова. – Бюл. № 11. – 13 с.
2. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с., ил.
3. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

Поступила в редакцию 20.01.2021

*Нина Андреевна Белокурова, инженер-конструктор 1-й категории,  
т. (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.*

*Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела, доктор технических наук, доцент,  
т. (495) 366-26-44, e-mail: otde118@mcc.vniiem.ru.*

*Александр Каренович Надкин, научный сотрудник, кандидат технических наук,  
т. (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## IMPACT OF MAGNET WIDTH, FERROMAGNETIC INSERT WIDTH AND AIR GAP SIZE ON CHARACTERISTICS OF A RING-SHAPED REACTION WHEEL

**N. A. Belokurova, A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin**

*The results of the impact of magnet width, ferromagnetic insert width and air gap size on the magnitude of specific electromagnetic force of a ring-shaped reaction wheel were analyzed. The calculations were performed using a parametric model based on the finite element model. Herewith, the mathematical tools of the complete factorial experiment were used. According to the obtained results, the air gap size has the greatest impact on the increase of the specific electromagnetic force among all considered factors; the impact of the air gap size is twice as great as that of the magnet width and four times greater than that of the insert width. To confirm the adequacy of the created mathematical model and results of the complete factorial experiment, a mock-up of the reaction wheel rotor was built and tested.*

**Key words:** electric machine, ring-shaped reaction wheel, permanent magnet, specific force.

### References

1. Patent for invention No. 2650178 Russian Federation, IPC H02K 21/14(2006.01), H02K 7/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Reaction wheel : No. 2017131262 : appl. 06.09.2017 : publ. 11.04.2018 / V. Ia. Gecha, A. B. Zakharenko, I. Yu. Pugach, N. A. Belokurova, N. A. Krasova. – Bul. No. 11. – 13 p.
2. Adler Yu. P. Planning an experiment when searching for optimal conditions / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovskii. – Moscow : Nauka (Science), 1976. – 279 p., with figures.

3. Kaplun A. B. ANSYS in engineer's hand : practice guide / A. B. Kaplun, E. M. Morozov, M. A. Olfereva. – Moscow : Editorial URSS, 2003. – 272 p.

*Nina Andreevna Belokurova, 1st Category Design Engineer,  
tel.: +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.*

*Andrei Borisovich Zakharenko, Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
tel.: +7 (495) 366-26-44, e-mail: otde118@mcc.vniiem.ru.*

*Aleksandr Karenovich Nadkin, Researcher, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),  
tel.: +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.  
(JC «VNIEM Corporation»).*