

УДК 621.313.84

## ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КАТУШЕК НА ПОЛЮС И ФАЗУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА КОЛЬЦЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ

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

*Изложены результаты расчета удельной электромагнитной силы кольцевого двигателя-маховика с разными числами катушек на полюс и фазу. Рассмотрено также влияние зазора между катушками на величину удельной электромагнитной силы. При этом проводилось моделирование магнитных полей различных вариантов конструкции двигателя-маховика. На графиках представлены расчеты электромагнитной силы в зависимости от времени, по которым возможен также анализ пульсаций силы. В результате получено, что среди рассмотренных вариантов с  $q = 1/4, 3/8$  и  $1$  наилучшими удельными характеристиками обладает кольцевой двигатель-маховик с обмоткой статора с числом катушек на полюс и фазу  $q = 1$ . Наибольшее влияние зазоров между катушками на значение удельной электромагнитной силы наблюдается в этом варианте.*

**Ключевые слова:** электрическая машина, магнитная индукция, постоянный магнит, кольцевой двигатель-маховик.

Конструкция кольцевого двигателя-маховика (ДМ) с улучшенными массогабаритными характеристиками получена за счет совмещения подшипникового узла с ротором и защищена патентом [1]. Аналогичный ДМ представлен в работе [2]. Кольцевой двигатель-маховик имеет следующую конструкцию (рис. 1): ротор, набранный из магнитов *1* и ферромагнитных проставок *2* (концентраторов магнитного потока), размещается в согнутой в кольцо трубке *3*, на которой расположены катушки обмоток статора *4*.

При проектировании электрической машины важно правильно выбрать число катушек на полюс и фазу ( $q$ ), так как это во многом определит ее характеристики. В работе [3] приведены обмоточные коэффициенты, рассчитанные для разных комбинаций числа катушек и числа полюсов магнитов. Среди них особо выделены обмотки с  $q = 1/2; 1/4; 2/5; 3/8; 1$ , так как обмоточные коэффициенты для этих случаев больше, чем для обмоток с другими  $q$ .

**Целью данной работы** является определение наилучшего варианта ДМ по критерию максимальной удельной электромагнитной силы с минимальными пульсациями. При этом варьируется число катушек на полюс и фазу. Важным вопросом, также решаемым в статье, является анализ влияния зазора между катушками на удельную силу. Таким образом, в работе будет проводиться оптимизация обмотки статора кольцевого двигателя-маховика по критерию максимизации электромагнитной силы при фиксированных плотности тока статора и диаметре ротора.

Для оценки влияния обмоточного коэффициента на электромагнитную силу и ее пульсацию рассматривались три варианта обмотки: с  $q = 1/4; 3/8; 1$ . Каждому значению  $q$  соответствует свое значение числа катушек в «элементарной машине» – машине с минимально возможным числом катушек и соот-

ветствующим количеством магнитов, обеспечивающих заданное значение  $q$ . Это значит, машины с одинаковым полюсным делением и разным  $q$  имеют разную длину. Поэтому ДМ одного и того же диаметра для разных  $q$  будет состоять из разного числа элементарных машин. Для двигателя-маховика диаметром 516 мм при полюсном делении 14,17 мм обмотка статора по варианту с  $q = 1$  будет содержать 348 катушек, по варианту с  $q = 3/8$  – 126 катушек, по варианту с  $q = 1/4$  – 87 катушек.

Увеличение числа катушек усложняет технологический процесс сборки. Если возникнет необходимость введения фазной изоляции или для размещения кромок каркаса катушек, в случае применения каркасных катушек, понадобится вводить зазор между катушками, что может приводить к уменьшению коэффициента заполнения медью пространства вокруг ротора, а значит и к ухудшению характеристик машины.

Для  $q = 1/4, q = 3/8$  и  $q = 1$  на основе метода конечных элементов [4] были созданы расчетные осесимметричные модели (рис. 2). На внешней границе в моделях заданы граничные условия типа Дирихле: векторное произведение нормали к поверхности на векторный магнитный потенциал равно 0, на оси симметрии нулевое значение векторного магнитного потенциала.

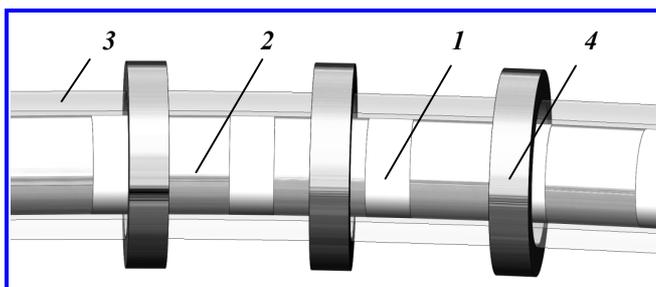
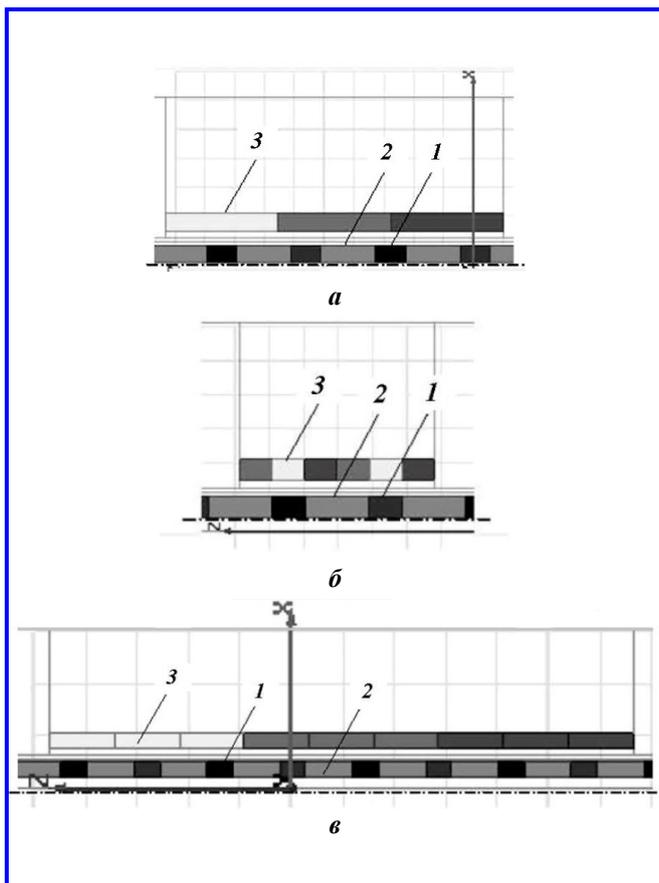


Рис. 1. Конструкция кольцевого двигателя-маховика



**Рис. 2.** Расчетные осесимметричные модели двигателя-маховика для разных чисел катушек на полюс и фазу:  $q = 1/4$  (а);  $q = 1$  (б);  $q = 3/8$  (в); 1 – магниты; 2 – ферромагнитные вставки; 3 – катушки обмотки статора

Плотность тока, диаметр ротора, ширина магнита и ширина ферромагнитной вставки, форма вставок, внутренний и внешний диаметры катушек, скорость перемещения ротора для рассматриваемых моделей заданы одинаковыми, величины указаны в табл. 1.

Отличие моделей заключается в числе катушек на полюс и фазу, а также в ширине катушек. Ширина выбиралась из соображений полного заполнения медью пространства вокруг ротора, то есть принято допущение, что коэффициент заполнения медью равен единице. Для каждой модели были проведены расчеты магнитного поля.

Графики зависимости электромагнитной силы, действующей на катушки одной элементарной машины, от времени для каждого расчетного случая приведены на рис. 3. Силы на графиках имеют отрицательное значение, так как в расчетной модели за положительное направление принято направление движения ротора, на катушки же действует сила противоположного направления.

Для того чтобы сравнить двигатели одного диаметра, но состоящие из разного числа элементарных машин, необходимо перейти к удельной величине: в данном случае удельному значению силы по осевой длине машины  $F_{уд} = F_{эм}/L_δ$ . Полученные расчетные значения приведены в табл. 2.

Для одного и того же ДМ при разных вариантах обмотки можно получать различную удельную силу при одинаковой плотности тока в проводах обмотки статора. Наибольшим значением удельной силы обладает ДМ с числом катушек на полюс и фазу  $q = 1$ . При этом значение удельной силы для варианта с  $q = 1$  в 2,3 раза больше, чем для варианта с  $q = 1/4$ . Пульсации удельной силы во всех вариантах составляют менее 1%. Поэтому при проектировании ДМ кольцевого типа стоило бы отдать предпочтение варианту обмотки с  $q = 1$ .

Таблица 1

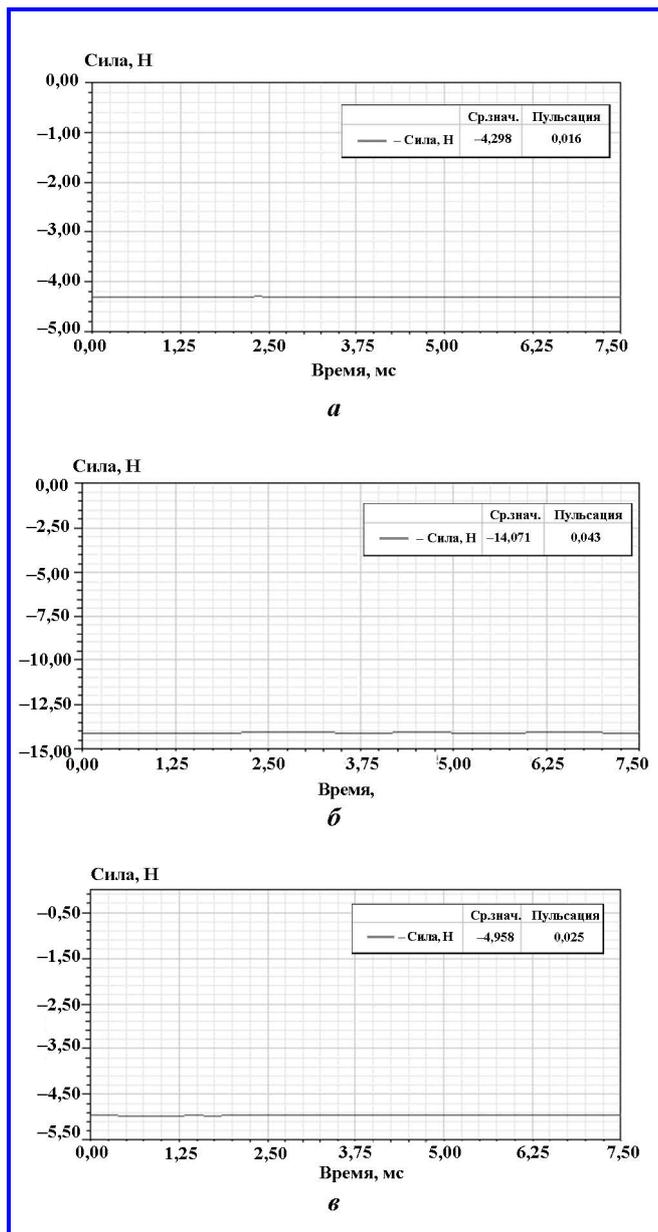
**Фиксированные величины для расчетных моделей**

Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Скорость ротора, м/с	Число витков в катушке	Величина воздушного зазора, мм	Диаметр ротора, мм	Ширина магнита, мм	Ширина вставки, мм
15	8	35	2,5	10	5	9,17

Таблица 2

**Полученные расчетные величины**

Наименование величины	Число катушек на полюс и фазу $q$		
	1/4	3/8	1
Обмоточный коэффициент $k_{об}$	0,866	0,945	1
Осевая длина 1 элементарной машины $L_δ$ , мм	56,672	113,344	28,336
Электромагнитная сила от 1 элементарной машины, $F$ , Н	4,298	14,071	4,958
Пульсация силы $\Delta F$ , Н	0,016	0,043	0,025
Пульсация силы в процентах от силы, %	0,372	0,306	0,504
Удельная электромагнитная сила $F_{уд}$ , Н/м	75,84	124,144	<b>174,972</b>
Число катушек в двигателе-маховике	87	126	348



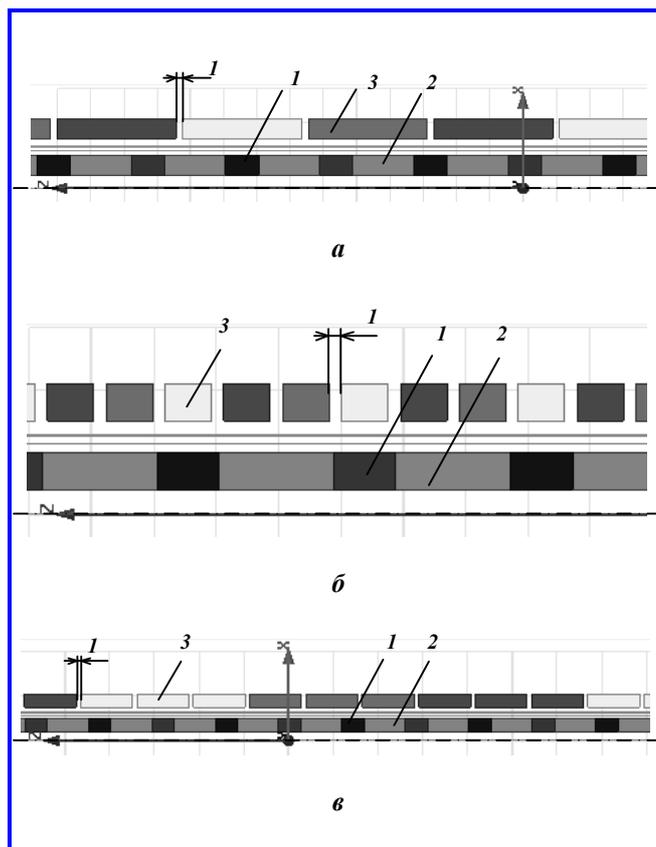
**Рис. 3.** Графики зависимости электромагнитной силы, действующей на катушки элементарной машины, для моделей с разными числами катушек на полюс и фазу:  $q = 1/4$  (а);  $q = 3/8$  (б);  $q = 1$  (в)

В реальности представляется трудной задачей расположить катушки вплотную друг к другу, из-за наличия изоляции катушек, необходимой для повышения электрической прочности (надежности) обмотки, понадобится введение зазора между катушками. Причем, чем большее число катушек необходимо разместить, тем меньший получится коэффициент заполнения медью пространства вокруг ротора, так как количество зазоров равно количеству катушек. Значит, при посто-

янной плотности тока с введением зазоров между катушками величина удельной силы ДМ должна уменьшиться. Чтобы оценить влияние зазоров между катушками на электромагнитную силу, были созданы расчетные модели, аналогичные рассмотренным с  $q = 1$ ,  $q = 3/8$ ,  $q = 1/4$ . Все параметры моделей идентичны рассмотренным выше за исключением того, что между катушками введен зазор 1 мм. Расчетные модели представлены на рис. 4.

Графики зависимости электромагнитной силы, действующей на катушки одной элементарной машины, от времени для каждого расчетного случая приведены на рис. 5. Силы на графиках, как и в предыдущих случаях, имеют отрицательное значение, потому что в расчетных моделях за положительное направление принято направление движения ротора, на катушки же действует сила противоположного направления.

Полученные расчетные значения приведены в табл. 3.



**Рис. 4.** Расчетные модели двигателя-маховика для разных чисел катушек на полюс и фазу с зазором 1 мм между катушками для  $q = 1/4$  (а);  $q = 1$  (б);  $q = 3/8$  (в):  
 1 – магниты; 2 – ферромагнитные вставки;  
 3 – катушки обмотки статора

Таблица 3

## Полученные расчетные величины для моделей с зазором между катушками

Наименование величины	Число катушек на полюс и фазу $q$		
	1/4	3/8	1
Обмоточный коэффициент $k_{об}$	0,866	0,945	1
Осевая длина 1 элементарной машины $L_{\delta}$ , мм	56,672	113,344	28,336
Электромагнитная сила от 1 элементарной машины $F$ , Н	4,547	13,71	3,981
Пульсация силы $\Delta F$ , Н	0,013	0,031	0,021
Пульсация силы в процентах от силы, %	0,286	0,228	0,528
Удельная электромагнитная сила $F_{уд}$ , Н/м	80,234	120,959	<b>140,493</b>
Разница удельных сил двигателя-маховика с зазором и без в процентах относительно удельной силы двигателя-маховика без зазоров, %	5,79	-2,57	-19,71

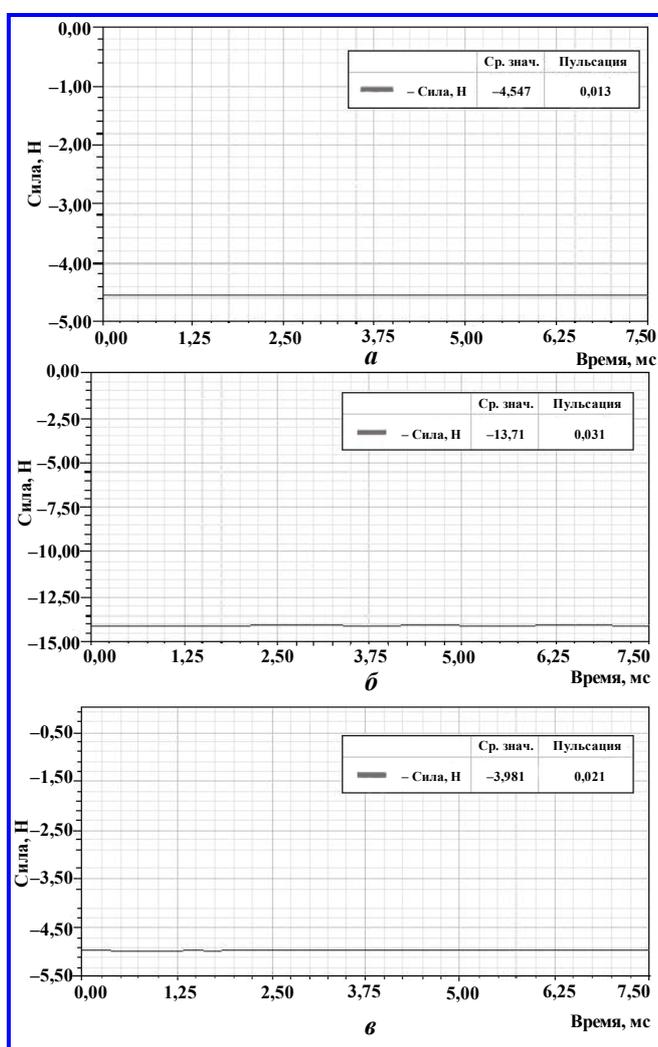


Рис. 5. Графики зависимости электромагнитной силы, действующей на катушки элементарной машины, для моделей с разными числами катушек на полюс и фазу и с зазором 1 мм между катушками:  $q = 1/4$  (а);  $q = 3/8$  (б);  $q = 1$  (в)

Наибольшее влияние зазоров между катушками на значение удельной силы наблюдается в модели с  $q = 1$  (практически 20%), это объясняется наибольшей суммарной протяженностью зазоров, то есть наименьшим коэффициентом заполнения медью пространства вокруг ротора. Но даже при этом условии ДМ с обмоткой  $q = 1$  является наилучшим среди рассматриваемых вариантов по показателю удельной электромагнитной силы.

## Выводы

1. При проектировании ДМ кольцевого типа выбор числа катушек на полюс и фазу значительно влияет на величину удельной электромагнитной силы.
2. Наилучшими удельными характеристиками для маховика диаметром 516 мм с диаметром магнитов 10 мм и полюсным делением 14,17 мм обладает ДМ кольцевого типа с обмоткой статора с числом катушек на полюс и фазу  $q = 1$ .
3. Наибольшее влияние зазоров между катушками на значение удельной электромагнитной силы наблюдается в варианте с  $q = 1$  (практически 20%). Это объясняется наибольшей суммарной протяженностью зазоров, то есть наименьшим коэффициентом заполнения медью пространства вокруг ротора.

## Литература

1. Патент на изобретение № 2650178 Российская Федерация, МПК Н02К 21/14(2006.01), Н02К 7/02(2006.01), Н02К 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. Линейный двигатель-маховик с магнитной смазкой / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова [и др.] // Электротехника. – Москва, 2018. – № 10 – С. 72 – 75.
3. Distribution, coil-span and winding factors for PM machines with concentrated windings / S. E. Skaar, Ø. Krovel, R. Nilssen. –

Текст : электронный // NTNU : [сайт]. – 2006. – P. 346-1 – 346-6. – URL: <http://www.elkraft.ntnu.no/eno/Papers2006/icem-skaar-krovel-nilssen06.pdf>.

4. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM : учебное пособие / О. Б. Буль. – Москва : Академия, 2005. – 336 с.

Поступила в редакцию 16.12.2020

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

**Андрей Борисович Захаренко**, начальник отдела, доктор технических наук, доцент,  
т. (495) 366-26-44, e-mail: [otdel18@mcc.vniiem.ru](mailto:otdel18@mcc.vniiem.ru).

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

## IMPACT OF NUMBER OF COILS PER POLE PER PHASE ON CHARACTERISTICS OF A RING-SHAPED REACTION WHEEL

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

*The results of calculation of specific electromagnetic force of a ring-shaped reaction wheel with various numbers of coils per pole per phase are provided in the article. The impact of a gap between coils on the magnitude of specific electromagnetic force is also considered in the article. In addition to that, the simulation of magnetic fields for various options of reaction wheel design was performed. The calculations of electromagnetic force as a function of time are presented in the graphs which can be also used for the analysis of force pulsations. As a result, it was discovered that among the considered options with  $q = 1/4, 3/8$  and  $1$ , the best specific characteristics were shown by the reaction wheel having a stator winding with the number of coils per pole per phase equal to  $1$  ( $q = 1$ ). The greatest impact of gaps between coils on the magnitude of specific electromagnetic force was observed in this option.*

**Key words:** electrical machine, magnetic induction, permanent magnet, ring-shaped reaction wheel.

### 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. Iu. Pugach, N. A. Belokurova, N. A. Krasova. – Bull. No. 11. –13 p.
2. Linear reaction wheel with magnetic lubrication / V. Ia. Gecha, A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova [et al.] // Electrical engineering. – Moscow, 2018. – No. 10 – Pp. 72 – 75.
3. Distribution, coil-span and winding factors for PM machines with concentrated windings / S. E. Skaar, Ø. Krovel, R. Nilssen. – Text : electronic // NTNU : [website]. – 2006. – P. 346-1 – 346-6. – URL: <http://www.elkraft.ntnu.no/eno/Papers2006/icem-skaar-krovel-nilssen06.pdf>.
4. Boule O. B. Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. Magnetic circuits, fields and FEMM program : textbook / O. B. Boule. – Moscow : Academy, 2005. –336 p.

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

**Andrei Borisovich Zakharenko**, Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
tel.: +7 (495) 366-26-44, e-mail: [otdel18@mcc.vniiem.ru](mailto:otdel18@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](mailto:lab183@mcc.vniiem.ru).  
(JC «VNIEM Corporation»).