УДК 621.313

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УНИПОЛЯРНОЙ МИКРОМАШИНЫ

В.Я. Геча, А.Б. Захаренко, А.К. Надкин

Рассмотрены вопросы исследования униполярных электрических машин (УЭМ). Проведён краткий обзор исследований по данной тематике, а также анализ ряда конструкций униполярных электрических машин. Рассмотрены достоинства и недостатки применения постоянных магнитов в системах возбуждения УЭМ. Особое внимание уделено униполярным микромашинам магнитоэлектрического типа. Предложены и проанализированы конструкции УЭМ. Для предложенных конструкций проведены электромагнитные расчёты, выполненные с помощью метода конечных элементов, и приведены их основные результаты. Кроме этого, приводятся необходимые соотношения для определения электромагнитных моментов и результаты, полученные с их использованием применительно к рассматриваемым конструкциям. Показано, что микроУЭМ с возбуждением от постоянных магнитов имеют ряд преимуществ перед микроУЭМ с электромагнитным возбуждением. Из полученных результатов следует, что дисковые магнитоэлектрические машины позволяют эффективнее использовать активные материалы по сравнению с цилиндрическими машинами.

***Ключевые слова**: униполярная электрическая машина, постоянный магнит, магнитное поле.*

Униполярной электрической машиной (УЭМ) называется электрическая машина, в которой направление ЭДС, наведённой в проводниках якоря и тока остаются неизменными относительно этих проводников [1].

В мощных УЭМ применяют сверхпроводящие обмотки возбуждения, которые способны создать большую магнитную индукцию и значительно улучшить удельные показатели машины. В СССР были разработаны и изготовлены сверхпроводящие УЭМ с щёточным токосъёмом – дисковый униполярный электрический генератор (УЭГ): мощность P=55 кВт при напряжении U= 260 В; цилиндрический униполярный электрический двигатель (УЭД): мощность P=119 кВт; частота вращения n=1420 об/мин. В Англии фирмой IRD в 1966 г. был изготовлен сверхпроводящий УЭД с дисковым ротором мощностью 37 кВт при частоте вращения 200 об/мин. Двигатель применялся для привода насоса турбоблока 500 МВт на электростанции. Токосъём на медно-графитовых щетках. При использовании более современных сверхпроводников и щёток можно достичь мощности 6000 кВт. В США разрабатывались УЭД мощностью 2200 кВт со сверхпроводящими обмотками для привода судовых гребных винтов. Данные двигателя: напряжение U=100 В, частота вращения n=1200 об/мин, длина l=2 м, диаметр D=1 м, масса m=3500 кг. В Японии фирмой «Toshiba» в 1974 г. разработан, изготовлен и испытан УЭГ мощностью 3000 кВт, напряжением U=150 В, размеры 250×400×280 см, токосъём щёточный. Во Франции была разработана УЭМ на 60 кВт с пятью дисками, погруженными в жидкий металл. Опыт показал, что в связи с большими потерями на трения, такая конструкция пригодна лишь для тихоходных машин [2].

Целью данной работы является исследование особенностей применения постоянных магнитов для формирования поля возбуждения в УЭМ. УЭМ с постоянными магнитами имеют меньшие массу и габариты по сравнению с УЭМ с катушками возбуждения, однако они лишены возможности регулирования со стороны цепи возбуждения, а стоимость постоянных магнитов выше стоимости катушек возбуждения. В микромашинах необходимости в больших массивных постоянных магнитах нет, как и нет острой необходимости в регулировании поля возбуждения, а массогабаритные показатели имеют ключевое значение. В связи с этим применение постоянных магнитов в микроУЭМ является наиболее рациональным решением. Как известно, УЭМ могут иметь цилиндрическое и дисковое исполнение, рассмотрим эти конструкции подробнее.

На рис. 1 приведена конструкция цилиндрической УЭМ с возбуждением от постоянных магнитов. Внутри статора *1* расположены постоянные кольцевые магниты *2*, намагниченные аксиально. Постоянный ток подводится к ротору *3* от внешнего источника с помощью катящихся токоподводов *4*. Поверхность ротора под полюсом покрывается слоем меди *5*, таким образом наибольшая часть тока протекает в меди, а не в стали. Так как магнитная проницаемость меди значительно хуже чем у стали и близка к проницаемости воздуха, то линии векторов магнитной индукции входят в медный слой практически под прямым углом. Как известно из закона Ампера, электромагнитная сила dF, действующая на элемент объёма dV проводника

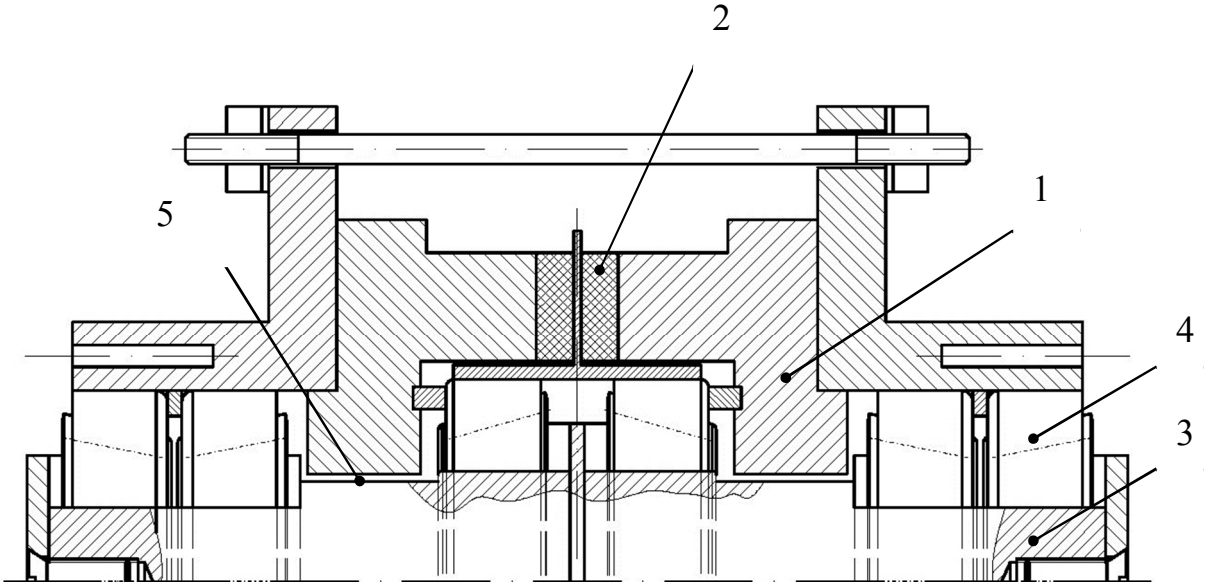


Рис. 1. Конструкция цилиндрической униполярной микромашины

находящегося в магнитном поле с индукцией B определяется из следующего выражения:

$$dF = [j \times B]dV,$$

где j – плотность тока в проводнике.

Эта сила приведёт к возникновению электромагнитного вращающего момента M:

$$M = \int_{R_1}^{R_2} rdF,$$

где R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы проводящего слоя ротора.

Элементарный объём dV:

$$dV = 2\pi rdrl,$$

где l – длина полюса.

Таким образом момент под одним полюсом:

$$M = \int_{R_1}^{R_2} rdF = \int_{R_1}^{R_2} rjBdV = 2\pi ljB\int_{R_1}^{R_2} r^2 dr = = 2\pi ljB\frac{R_2^3 - R_1^3}{3}. \quad (1)$$

Величину магнитной индукции B в медном слое определим из электромагнитного расчёта, с помощью методики [3] (рис. 2). На рис. 2 приведено решение осесимметричной задачи магнитостатики, выполненное с помощью метода конечных элементов в программной среде FEMM. На внешних границах заданы граничные условия Дирихле, значение векторного магнитного потенциала (ВМП) A=0 Вб/м. Внешний диаметр машины 0,096 м, длина 0,16 м, длина полюса 0,02 м, толщина медного проводящего слоя ротора 0,001 м. Количество конечных элементов около 34,5 тыс. Расчёт показал, что индукция в медном слое составляет 0,5 Тл. Однако она может быть повышена за счёт изменения геометрии машины и увеличения толщины магнитов, задача оптимизации не входит в данную работу.

Подставляя данные значения в (1), получим:

$$M = \int_{R_1}^{R_2} rdF = \int_{R_1}^{R_2} rjBdV = 2\pi ljB\int_{R_1}^{R_2} r^2 dr = = 2\pi ljB\frac{R_2^3 - R_1^3}{3}.$$

При возможной плотности тока j=10 А/мм^2, полный момент двухполюсной машины составит 0,292 Н·м.

Конструкция магнитоэлектрической УЭМ дискового типа представлена на рис. 3. Кольцевые постоянные магниты *1*, намагниченные в осевом

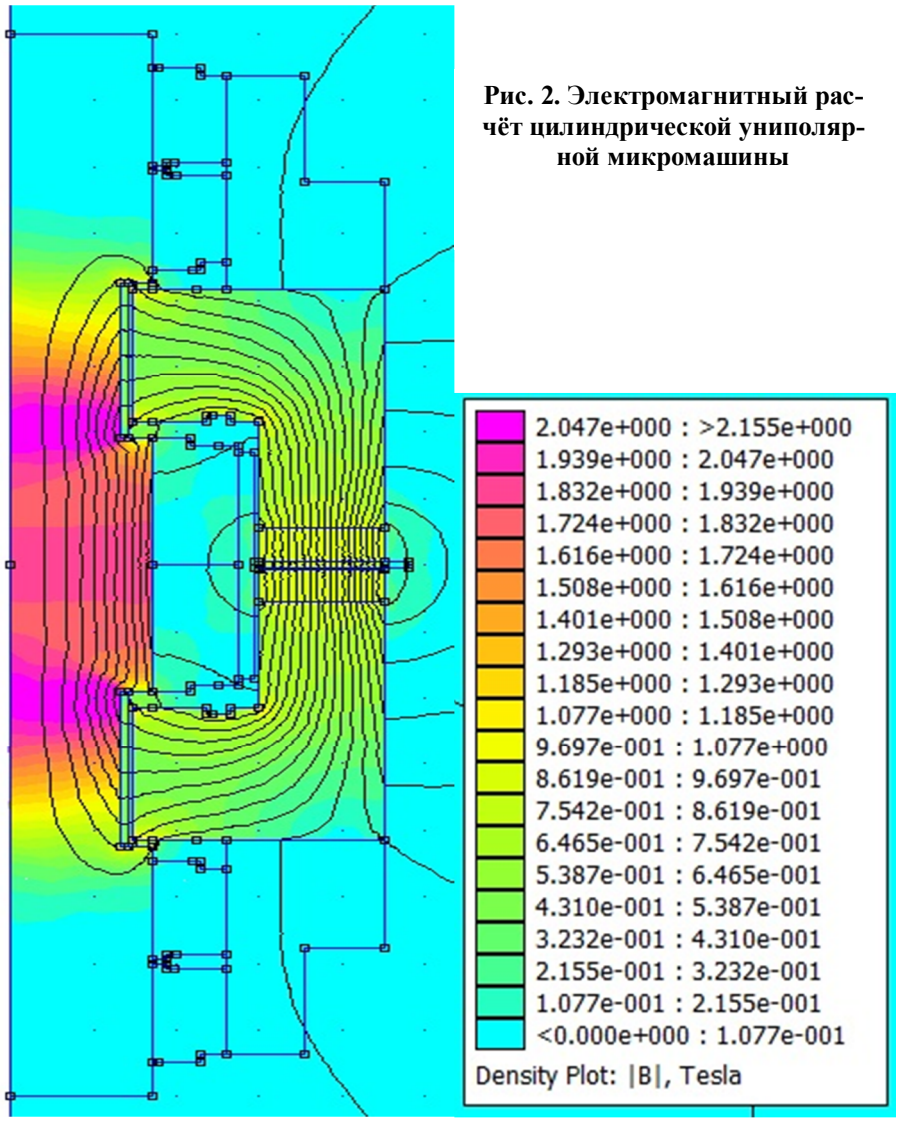


Рис. 2. Электромагнитный расчёт цилиндрической униполярной микромашины

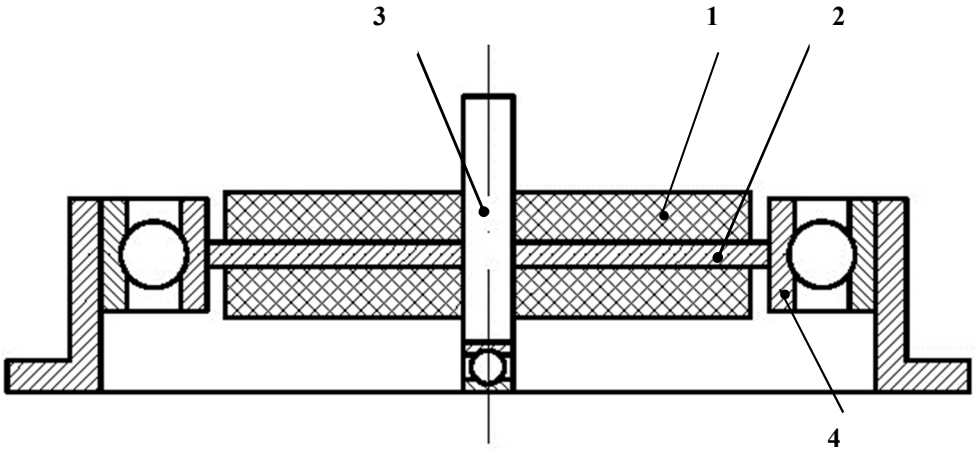


Рис. 3. Конструкция дисковой униполярной микромашины

направлении, создают постоянный магнитный поток, пронизывающий алюминиевый диск *2*. В центре диска закреплён вал *3*. Постоянный ток подводится от внешнего источника к краям и к центру диска с помощью катящихся токоподводов *4*, таким образом, что ток растекается от центра диска к краям (или в обратном направлении). Магниты, диск и вал неподвижны относительно друг друга и при протекании по диску тока вращаются вокруг оси. Как и в предыдущем примере, вращение вызывает электромагнитная сила *F*, возникающая при взаимодействии радиально направленного тока и осевого магнитного потока. Неочевидный на первый взгляд принцип «неподвижности» магнитного поля подробно описан в работах Грукса [4], Кенарда [5], Тейта [6], Мюллера [7, 8] и др.

Выражение для электромагнитного момента выводится аналогично моменту для цилиндрической машины:

$$M = \int_{R_1}^{R_2} r dF = \int_{R_1}^{R_2} rjBdV = 2\pi lB \int_{R_1}^{R_2} j(r) r^2 dr,$$

где

$$j(r) = \frac{I}{2\pi rl};$$

$$j_{\max} = \frac{I}{2\pi R_1 l};$$

$$I = 2\pi R_1 l j_{\max};$$

$$j(r) = \frac{2\pi R_1 l j_{\max}}{2\pi rl} = j_{\max} \frac{R_1}{r};$$

$$M = 2\pi lB \int_{R_1}^{R_2} j(r) r^2 dr =$$

$$= 2\pi lB \int_{R_1}^{R_2} j_{\max} \frac{R_1}{r} r^2 dr =$$

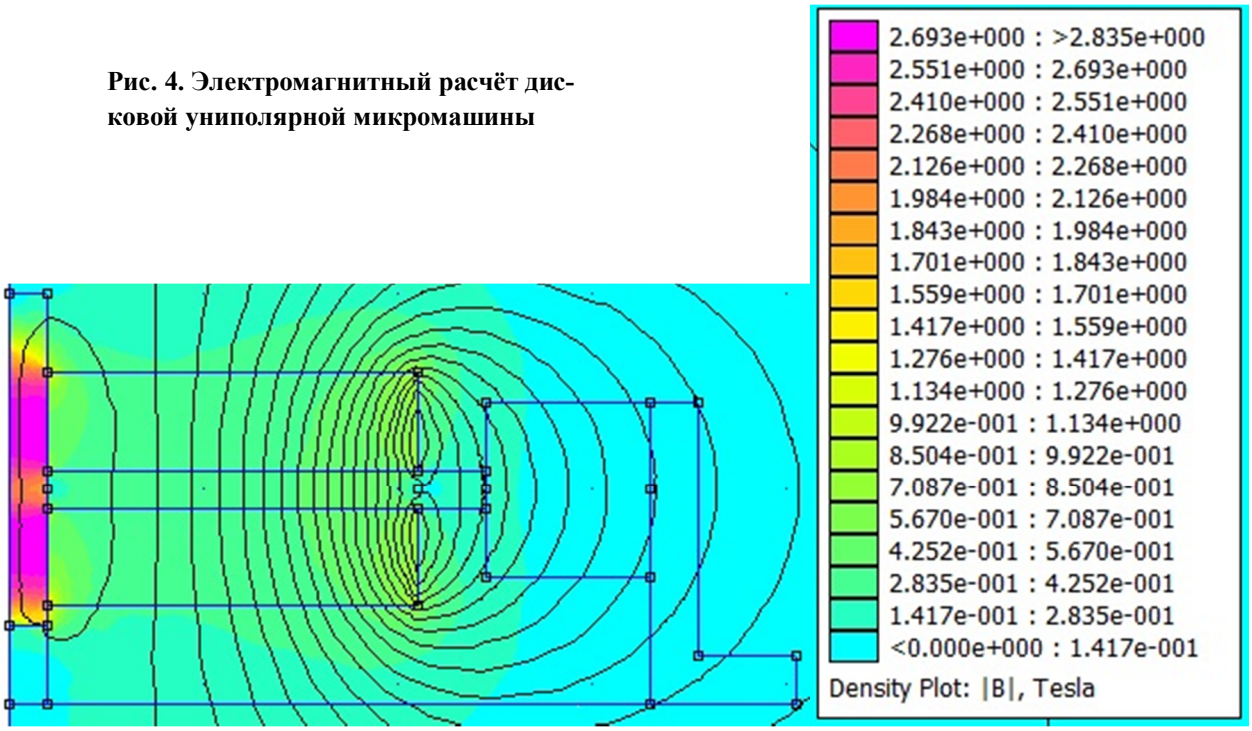
$$= 2\pi lB j_{\max} R_1 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2};$$

$$M = \pi R_1 lB j_{\max} (R_2^2 - R_1^2),$$

где l – высота диска.

Электромагнитный расчёт дисковой УЭМ представлен на рис. 4.

Рис. 4. Электромагнитный расчёт дисковой униполярной микромашины



Подобно предыдущему примеру решалась осесимметричная задача магнитостатики с помощью метода конечных элементов в программной среде FEMM. На внешних границах заданы граничные условия Дирихле, значение ВМП A=0 Вб/м. Высота магнитов 0,005 м, высота диска 0,002 м, внешний диаметр диска 0,05 м, внутренний 0,004 м. Количество конечных элементов около 12,7 тыс. Расчёт показал, что индукция в медном слое составляет 0,4 Тл. Она может быть повышена, но задача оптимизации не входит в данную работу.

При допустимой плотности тока 10 А/мм^2 момент составит 0,031 Н·м. Ток в диске 250 А.

Выводы

1. В ходе анализа особенностей работы УЭМ было установлено, что микроУЭМ с возбуждением от постоянных магнитов имеют ряд преимуществ перед микроУЭМ с электромагнитным возбуждением.
2. Предложены конструкции униполярных магнитоэлектрических микромашин, для которых получены выражения электромагнитных моментов.
3. Из полученных результатов следует, что дисковые магнитоэлектрические машины позволяют эффективнее использовать активные материалы по сравнению с цилиндрическими машинами.

Литература

1. Бертинов А. И., Алиевский Б. Л. Униполярные электрические машины с жидкометаллическим токосъёмом. – М. – Л.: Энергия, 1966.
2. Глебов И. А., Лаверик Ч. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. – Л.: Наука, 1980.
3. Буль О. Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.
4. Grooks M. J., Litvin D. B., Matthews P. W., Macaulay R. and Shaw J. One-piece Faraday generator: A paradoxical experiment from 1851 // Am J. Phys.– Vol. 46, 729.
5. Kennard E. On Unipolar Induction: Another Experiment and its Significance as Evidence for the Existence of the Aether // Phil. Mag. – Vol. 33, 179.
6. Tate J. Unipolar Induction, Bull. Nat. // Res. Council. – Vol. 4, 74.
7. Muller F. J. Seat of unipolar induction // Progress in Space-Time Physica / ed. J. P. Wesley, Benjamin Wesley Pub., 1987. – Pp. 156 – 169.
8. Muller F. J. The amazing problem of electromagnetic unipolar induction. The Thorny Way of Truth II / ed. S. Marinov, East-West Int. Pub. 3rd Ed., 1986. – Pp. 47 – 67, 297 – 300.

Поступила в редакцию 10.06.2015

Владимир Яковлевич Геча,
заместитель генерального директора, д-р техн. наук,
т. (495) 365-26-69.
Андрей Борисович Захаренко,
начальник отдела, д-р техн. наук,
т. (495) 366-26-44.
Александр Каренович Надкин, *мл. научн.сотрудник,*
т. (495) 366-54-24.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DESIGN of UNIPOLAR MAGNETO-ELECTRIC MICROMACHINE

V.Ia. Gecha, A.B. Zakharenko, A.K. Nadkin

The article deals with problems of unipolar electric machines (UEM) research. A short review is given of research works on this subject, as well as a design analysis of some unipolar electric machines is made. Advantages and disadvantages of constant magnets for UEM excitation systems are considered. A special consideration is given to unipolar magneto-electric micro-machines. Several versions of UEM design are offered for consideration and analyzed. For described design versions, electro-magnetic calculations performed using finite-element method and main results obtained are considered. Additionally ratios required for determination of electromagnetic torques are given and results obtained on the basis of these ratios for considered design versions are presented. It is shown that permanent-magnet exited micro-UEM have a variety of advantages over electromagnet exited micro-UEM. Obtained results allow to make a conclusion, that, compared with cylinder machines, disk magneto-electric machines enable more effective use of materials.
Key words: *unipolar electric machine, permanent magnet, magnet field.*

List of References

1. Bertinov A. I., Aliyevsky B. L. Unipolar electric machines with liquid-metal current collectors. – Moscow, Leningrad: Energy [Energiya] Publ., 1966.
2. Glebov I. A., Laverik Ch. Electrophysical problems associated with application of super conductivity. – Leningrad: Nauka publishing house, 1980.
3. Bul O. B. Methods for calculation of electrical apparatus magnet system. Magnetic circuits, magnetic fields and FEMM program. – Moscow: "Akademia" publishing center, 2005.
4. Grooks M. J., Litvin D. B., Matthews P. W., Macaulay R. and Shaw J. One-piece Faraday generator: A paradoxical experiment from 1851 // Am J. Phys.– Vol. 46, 729.
5. Kennard E. On Unipolar Induction: Another Experiment and its Significance as Evidence for the Existence of the Aether // Phil. Mag. – Vol. 33, 179.
6. Tate J. Unipolar Induction, Bull. Nat. // Res. Council. – Vol. 4, 74.
7. Muller F. J. Seat of unipolar induction // Progress in Space-Time Physica / ed. J. P. Wesley, Benjamin Wesley Pub., 1987, pp. 156 – 169.
8. Muller F. J. The amazing problem of electromagnetic unipolar induction. The Thorny Way of Truth II, ed. S. Marinov, East-West Int. Pub. 3rd Ed., 1986. – Pp. 47 – 67, 297 – 300.

***Vladimir Iakovlevitch Gecha**, Deputy Director General,*
Doctor of Engineering Science,
tel.: (495)365 26 69.
***Andrey Borisovich Zakharenko**, Head of Devision,*
Doctor of Engineering Science,
tel.: (495)366 26 44.
***Alexander Karenovich Nadkin**, Junior Research Scientist,*
tel.: (495)366 54 24.
('VNIIEM Corporation' JC).