

УДК 621.313

КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННОГО ДВУХРОТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОГО МОМЕНТА

А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова

Для космического аппарата актуальным является компенсация реактивного возмущающего момента, действующего на космический аппарат со стороны вращающихся устройств, например, направленной антенны. Для оперативной передачи целевой информации у космического аппарата режимы стереосъемки и передачи информации зачастую проходят одновременно. Для компенсации реактивного момента при нацеливании антенны в работе предлагается использовать двухроторный приводной электродвигатель. Предложено два варианта компоновки электродвигателя: с одним внешним, одним внутренним роторами и с двумя внешними роторами. Для обоих вариантов проведены расчеты электромагнитных моментов для каждого из роторов, создан макет электродвигателя и получено экспериментальное подтверждение возможности компенсации реактивного момента с использованием двухроторного синхронного электродвигателя.

Ключевые слова: космический аппарат, реактивный момент, двухроторный электродвигатель.

Нацеливание антенны на наземную радиостанцию производится поворотом зеркала и вызывает реактивный паразитный возмущающий момент, действующий на космический аппарат. Для оперативной передачи целевой информации у космического аппарата режимы стереосъемки и передачи информации зачастую проходят одновременно (в режиме непосредственной передачи информации). Паразитный момент создает помехи системе ориентации и стабилизации космического аппарата, что приводит к снижению качества изображения, поэтому реактивный момент должен быть скомпенсирован.

Задачами настоящей статьи являются:

- выбор типа и конструкции приводного электродвигателя с одним статором и двумя роторами для возможности размещения компенсационной нагрузки на втором роторе;
- расчет момента инерции нагрузки для компенсации реактивного момента.

Синхронные машины с постоянными магнитами обладают наилучшим соотношением «вращающий момент/масса» и наиболее предпочтительны для применения на космических аппаратах и, в частности, для привода антенно-фидерных систем. Синхронные машины с дискретно-распределенными обмотками могут работать в режимах непрерывного вращения и в шаговом режиме. Вопрос оптимального выбора соотношения чисел зубцов статора и полюсов ротора является важным для любого типа электрической машины. Для электромашин с дискретно-распределенной обмоткой правильный выбор этих соотношений определяет значение электромагнитного момента, энергетические и массогабаритные показатели машины. В работе [1] были рассчитаны обмоточные коэффициенты для первой гармоники

электродвижущей силы (ЭДС) для ряда соотношений чисел зубцов статора z и пар полюсов ротора p .

Для любого числа зубцов z имеется две гармоники магнитодвижущей силы (МДС), имеющие наибольшую амплитуду с различными, хотя и близкими друг к другу, числами периодов. Следовательно, каждому числу z соответствуют две гармоники МДС с одинаковыми амплитудами и два числа полюсов ротора (p_1 и p_2) с одинаковыми обмоточными коэффициентами для ЭДС. Таким образом, возможна разработка электромашин с одним статором и двумя роторами, вращающимися в разные стороны (аналогичная электромашинка приведена в [2]).

Одним из наибольших обмоточных коэффициентов синхронного электродвигателя обладает вариант с $q = 3/8$ ($z = 9$, $p_1 = 4$, $p_2 = 5$ или кратно увеличенными z , p_1 и p_2).

При проектировании были рассмотрены два варианта компоновки электродвигателя: с одним наружным и одним внутренним ротором; с двумя внешними роторами.

Конструкция двухроторного двигателя с наружным и внутренним роторами, а также сечение магнитопровода представлены на рис. 1. Корпус 1 имеет два независимых подшипниковых узла 2, 3 с закрепленными на них внешним 4 и внутренним 5 роторами. На роторах размещаются постоянные магниты 6 чередующейся полярности. Также на корпусе двигателя расположен статор, представляющий из себя расположенные по кругу шихтованные зубцы статора 7 с медными обмотками 8, вставленные в алюминиевые обоймы 9 и стянутые через шпильки 10.

Проведен расчет магнитной системы и подсчитана величина электромагнитного момента в программном комплексе Femm. Результаты расчета представлены в таблице.

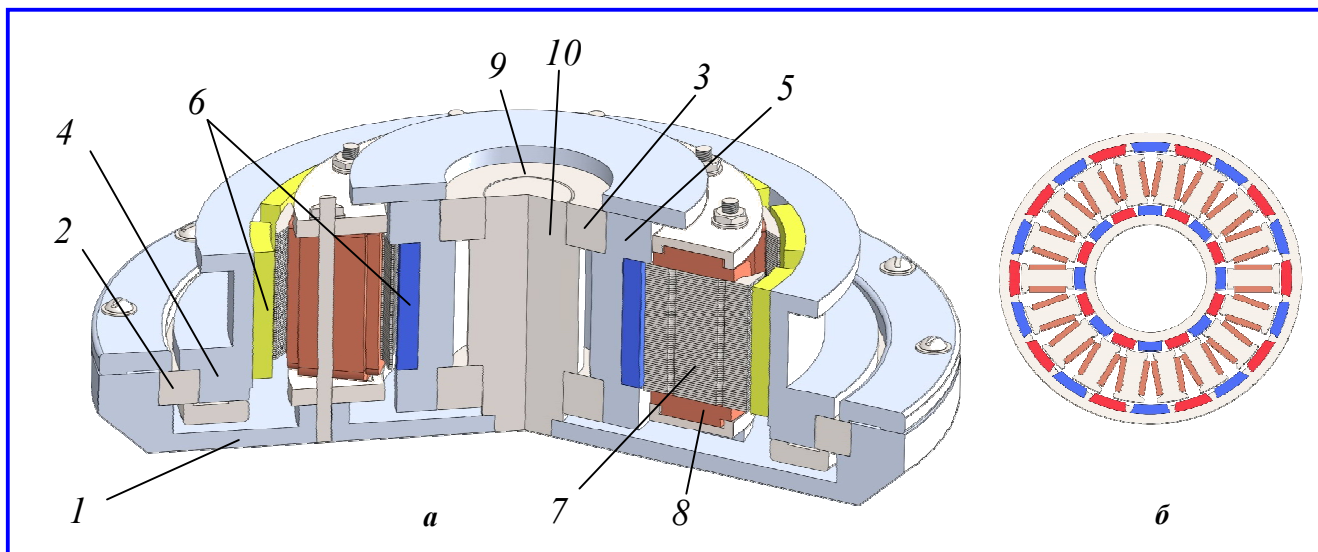


Рис. 1. Синхронный электродвигатель с одним наружным и одним внутренним ротором (а) и магнитная система (б). Вариант компоновки 1

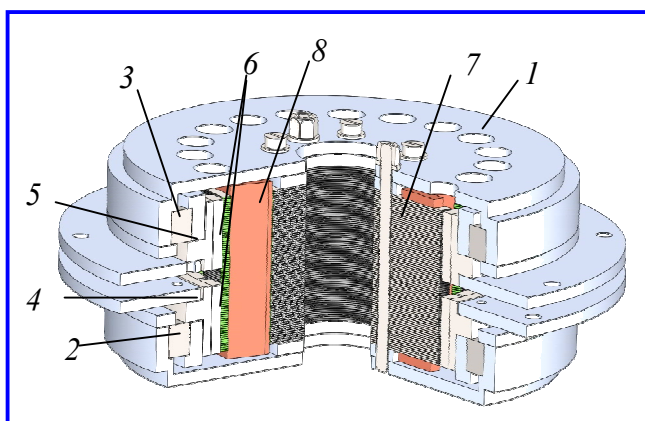


Рис. 2. Синхронный электродвигатель с двумя наружными роторами. Вариант компоновки 2

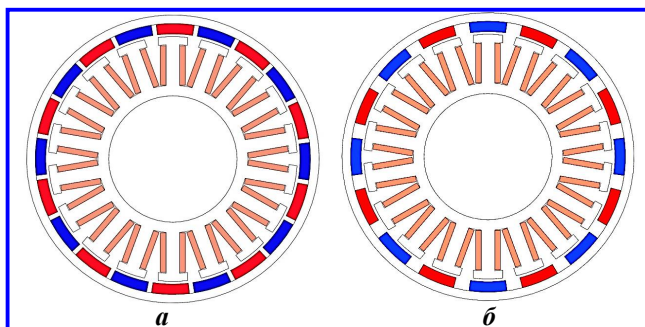


Рис. 3. Магнитные системы верхнего (а) и нижнего (б) роторов

Второй рассмотренный вариант компоновки двигателя: оба ротора внешние. Конструкция такой машины представлена на рис. 2. Двигатель имеет в своем составе корпус 1 с двумя независимыми подшипниковыми узлами 2, 3. В качестве подшипников выбраны подшипники с перекрестными роликами, их преимуществом является возможность использовать один подшипник без пары, что значительно уменьшает габариты и массу изделия. На подшипниках закреплены независимые роторы 4, 5 с размещенными на них постоянными магнитами чередующейся полярности 6. На корпусе стационарно закреплен шихтованный статор 7 с медной обмоткой 8.

Магнитные системы верхнего и нижнего ротора представлены на рис. 3. Проведены расчеты электромагнитных моментов для верхнего и нижнего ротора отдельно в программном комплексе Femm. Результаты расчета представлены в таблице.

Для компоновки 1 наблюдается значительное отличие моментов на роторах. Это обуславливается различием в диаметрах роторов.

Момент на роторе в синхронной машине зависит от механической нагрузки на роторе и не может превышать критического. В двухроторной системе при этом механические нагрузки на роторы можно задавать различные. В таком случае компенсация

Таблица

Сравнение компоновок двигателя

| | Вариант компоновки 1 | Вариант компоновки 2 |
|-------------------------|----------------------|----------------------|
| Момент на роторе 1, Н·м | 1,9 | 1,75 |
| Момент на роторе 2, Н·м | 0,95 | 1,55 |
| Момент на статоре, Н·м | 0,95 | 0,2 |
| Масса двигателя, кг | 3,9 | 4,5 |
| Удельный момент, Н·м/кг | 0,73 | 0,73 |

момента от вращения полезной нагрузки может быть выполнена при любой из компоновок двигателя путем подбора инерционной нагрузки на втором роторе. Но очевидно, что в компоновке по варианту 1 при большой разнице значений возможных максимальных моментов и при приложении нагрузок на роторы с близкими значениями моментов инерции, один из роторов будет работать с механическим моментом значительно меньшим, чем мог бы. Выгоднее для компенсации момента использовать вариант компоновки 2, так как максимальные значения моментов каждого ротора имеют более близкие значения, а значит можно проектировать такой двигатель, в котором оба ротора будут вращаться при равномерной нагрузке.

Для подтверждения возможности подбора компенсационной механической нагрузки создан макет двухроторной машины по варианту компоновки 2.

Скорректированная уточненная модель макета двигателя представлена на рис. 4, фотография получившегося макета – на рис. 5.

Закон сохранения момента импульса для роторной системы с двумя роторами, где выполнена компенсация реактивного момента, записывается следующим образом:

$$J_1\Omega_1 = J_2\Omega_2, \quad (1)$$

где J_1 – момент инерции исполнительного механизма вместе с первым ротором, кг·м²; J_2 – момент инерции компенсирующего устройства вместе со вторым ротором, кг·м²; $\Omega_1 = \frac{\pi n_1}{30}$ – угловая скорость

первого ротора; $\Omega_2 = \frac{\pi n_2}{30}$ – угловая скорость второго

ротора. Частота вращения [об/мин] первого и второго роторов определяются по известным формулам:

$$n_1 = \frac{60f}{p_1}; \quad (2)$$

$$n_2 = \frac{60f}{p_2}, \quad (3)$$

где p_1 и p_2 – число пар полюсов первого и второго роторов электродвигателя; f – частота питающей сети, Гц. Таким образом, с учетом (2) и (3), при одной и той же частоте питающей сети f , уравнение (1) примет вид:

$$\frac{J_1}{p_1} = \frac{J_2}{p_2}. \quad (4)$$

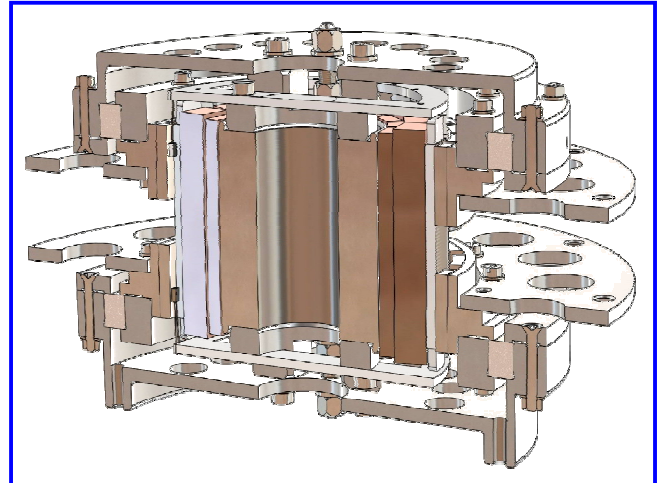


Рис. 4. Сечение модели макета синхронного электродвигателя с постоянными магнитами с двумя наружными роторами

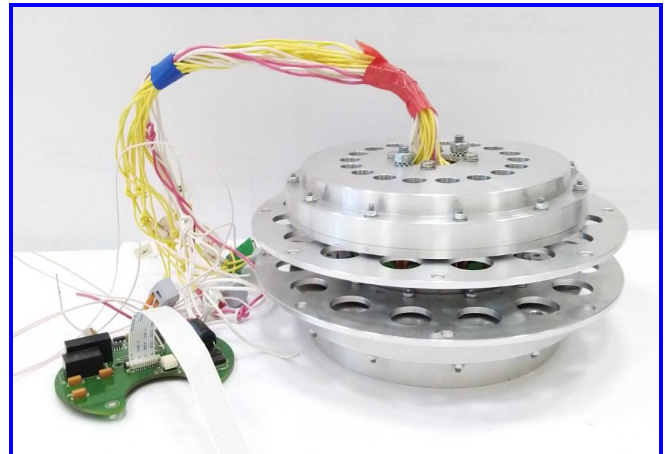


Рис. 5. Макет двигателя

При нагружении верхнего ротора механической нагрузкой с моментом инерции $J_1 = 0,011$ кг·м² расчетное значение момента инерции компенсационной нагрузки составляет $J_2 = 0,089$ кг·м².

Был проведен следующий эксперимент. Макет двигателя размещен на свободно вращающейся платформе (рис. 6, а). Метки на вращающейся и неподвижной частях опоры показывают положения опор относительно друг друга. При включении двигателя возникает реактивный момент, действующий на опору и приводящий к ее повороту. После того, как двигатель входит в стационарный режим вращения, действие реактивного момента на опору прекращается и платформа остается в некоем положении, показанном на рис. 6, б.

Для компенсации реактивного момента на второй ротор установлена механическая нагрузка с моментом инерции $J = 0,060$ кг·м², момент инерции вращающейся части опоры $J = 0,020$ кг·м².

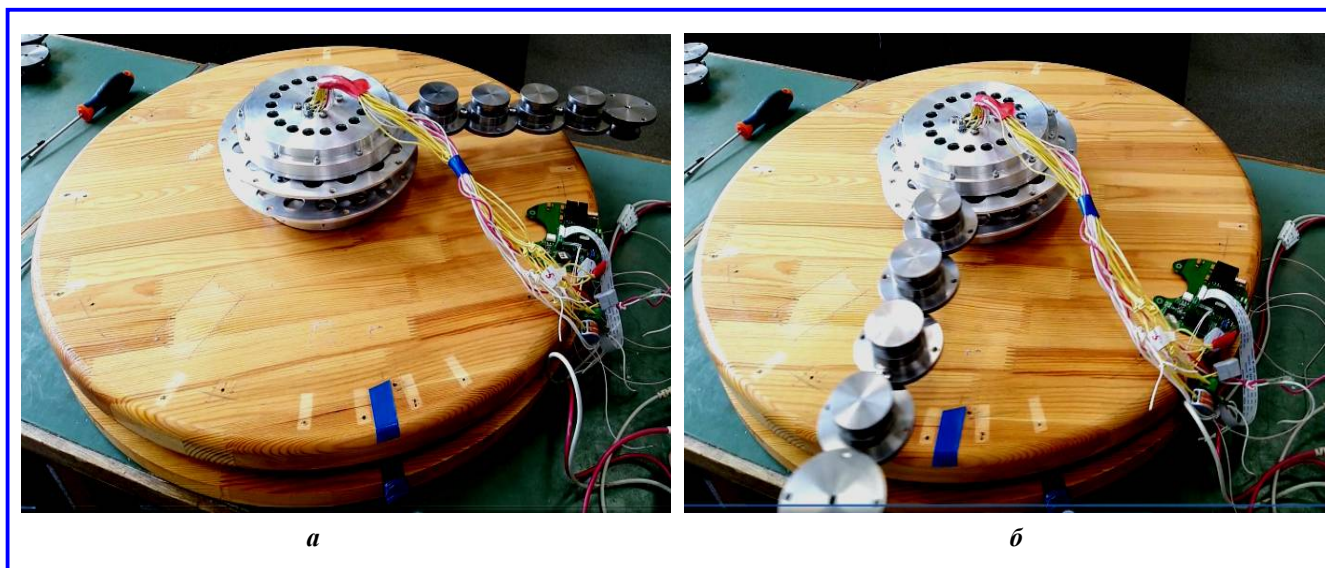


Рис. 6. Поворот опоры под действием паразитного момента: *а* – исходное положение; *б* – положение после выхода двигателя на стационарное вращение

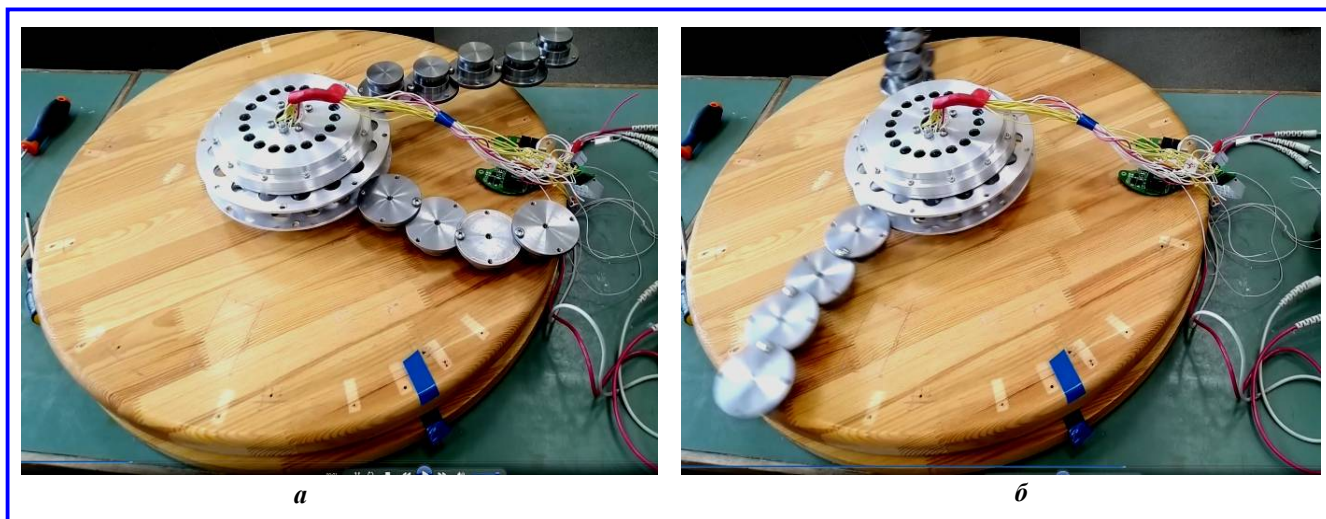


Рис. 7. Поворот опоры под действием паразитного момента при использовании компенсационной нагрузки: *а* – исходное положение; *б* – положение после выхода двигателя на стационарное вращение

Таким образом, суммарная инерционная нагрузка на втором роторе $J = 0,080 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ (трением в подшипнике опоры пренебрегаем). На рис. 7, *б* показано положение метки после выхода двигателя на стационарное вращение при наличии компенсационной механической нагрузки: положение вращающейся опоры осталось неизменным относительно положения до включения двигателя.

Эксперимент подтверждает возможность создания двухроторного двигателя с подбором компенсационной механической нагрузки для минимизации передаваемого на опору реактивного момента.

Выводы

В режиме съемки поверхности Земли с высоким пространственным разрешением космическим ап-

паратом реактивный паразитный возмущающий момент, действующий на космический аппарат со стороны электропривода направленной антенны, недопустим и должен быть скомпенсирован.

Предложен двухроторный приводной электродвигатель, позволяющий скомпенсировать реактивный момент при повороте полезной нагрузки.

Литература

1. Шевченко А. Ф. Электромеханические преобразователи энергии с модулированным магнитным потоком: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шевченко Александр Федорович.

вич; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1999. – 346 с. : ил.

2. Патент на изобретение РФ № 2355909 по заявке № 2007136888 Российская Федерация МПК F03B9/00 (2006.01). Ветровой электрогенератор двойного

вращения (варианты) : № 2007136888/06 : заявл. 05.10.2007 : опубликовано 20.05.2009 / Захаренко А. Б., Дашко О. Г., Кривоспицкий Ю. П., Литвинов В. Н., Мартынов А. М.; патентообладатель ЗАО НПП «Инкар-М». – 13 с. : ил.

Поступила в редакцию 19.02.2020

Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела общих научно-технических исследований, доктор технических наук, доцент, т. (495) 366-26-44.

Нина Андреевна Белокурова, инженер-конструктор 1-й категории, аспирант, т. (495) 366-54-24. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

STRUCTURE OF SYNCHRONOUS DUAL-ROTOR ELECTRIC MOTOR WITH REACTIVE TORQUE COMPENSATION

A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova

Compensation of reactive disturbance torque, which makes impact on a spacecraft from the part of rotating devices (for example, beam antenna) is important for a spacecraft. For on-line transmission of mission data, stereo imagery and data transmission modes of a spacecraft often active simultaneously. For compensation of reactive torque at antenna pointing, it is suggested to use a dual-rotor drive electric motor in operation. The following two variants of electric motor configuration are suggested: with one external and one internal rotor, and with two external rotors. For both variants the electromagnetic torques for each rotor have been calculated, the electric motor model has been developed and the possibility of reactive torque compensation using a dual-rotor synchronous motor has been confirmed experimentally.

Key words: spacecraft, reactive torque, dual-rotor electric motor.

References

1. Shevchenko A. F. Electromechanical energy converters with modulated magnetic flux: category 05.09.03 'Electrotechnical complexes and systems': thesis for doctoral degree in technical sciences / Shevchenko Aleksandr Fedorovich; Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 1999. – 436 p.: ill.

2. Patent RF No. 2355909 upon application No. 2007136888 Russian Federation IPC F03B9/00 (2006.01). Double rotation wind-driven generator (variants): No. 2007136888/06: applied on 05.10.2007: published on 20.05.2009 / Zakharenko A. B., Dashko O. G., Krivospitskii Iu. P., Litvinov V. N., Martynov A. M.; patent holder ZAO NPP 'Inkar-M'. – 13 p.: ill.

Andrei Borisovich Zakharenko, Head of Department of General Scientific and Technical Researches, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Associate Professor, tel.: +7 (495) 366-26-44.

Nina Andreevna Belokurova, Design Engineer of the 1st category, PG student, tel.: +7 (495) 366-54-24. (JC «VNIEM Corporation»).