УДК 629.78

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. В. ФОМИН, А. Е. ВОРОНКОВ, С. П. КУДАК, Р. А. БУЗИКОВ
Амурский государственный университет
Благовещенск, Россия

К классическим исполнительным органам систем ориентации и стабилизации малых космических аппаратов (МКА) относятся реакционные маховики, широко применяемые для трёхосной стабилизации и точного управления угловым положением спутника. Несмотря на широкое распространение и высокую точность управления, реакционные маховики имеют ряд ограничений [1]. Так, при достижении предельной частоты вращения происходит насыщение маховиков, вследствие чего требуется разгрузка накопленного кинетического момента с помощью дополнительных исполнительных органов. При необходимости увеличить запас кинетического момента маховика одно из возможных решений – повышение его момента инерции, что, как правило, ведет к росту массогабаритных характеристик. Стремление к миниатюризации маховика при сохранении требуемого кинетического момента требует увеличения частоты вращения, что сопровождается ростом энергопотребления. При работе в области малых угловых скоростей могут проявляться нелинейные эффекты из-за трения.

Одно из перспективных направлений совершенствования реакционных маховиков – применение конструкций с изменяемым моментом инерции. Так, в [2] предложены маховики с изменяемой геометрией и перераспределяемой массой, позволяющие изменять кинетический момент не только за счёт повышения частоты вращения маховика, но и за счёт увеличения момента инерции. Такой подход расширяет диапазон регулирования кинетического момента маховика и снижает вероятность насыщения, но усложняет конструкцию.

Другое перспективное направление – миниатюризация силовых гиродинов [3]. В таких исполнительных органах ротор вращается с постоянной частотой, а управляющий момент формируется за счёт изменения направления вектора кинетического момента. Это позволяет создавать значительные управляющие моменты и обеспечивать быстрое выполнение угловых манёвров. Однако применение гиродинов связано с возможностью возникновения сингулярных конфигураций, при которых формирование требуемого управляющего момента в отдельных направлениях становится невозможным.

Ещё одно перспективное направление – реакционные сферы [4]. Такой исполнительный орган содержит сферический ротор, способный вращаться вокруг произвольно ориентированной оси. Управляющий момент формируется

за счёт изменения частоты вращения ротора и направления его оси вращения, что позволяет одному устройству обеспечивать трехосное управление ориентацией МКА. Вместе с тем реализация реакционных сфер связана со сложностью создания привода и системы опор, обеспечивающих свободное вращение ротора вокруг произвольной оси. Так, контактные опоры сопровождаются трением и износом. Аэростатические и гидростатические опоры удерживают ротор без механического контакта благодаря подаче воздуха или жидкости под давлением. Их использование требует дополнительного оборудования для подачи рабочей среды, а в условиях космического вакуума – еще и герметизации системы. Магнитный подвес также позволяет исключить контактное трение, но при его совместном использовании с электромагнитным приводом взаимное влияние полей может создавать возмущающие моменты и усложнять управление вращением ротора.

Наряду с рассмотренными направлениями определенную перспективу имеет совмещение функций управления ориентацией и стабилизацией МКА с регулировкой его центра масс. Для этого авторами предложена конструкция, в которой блок из четырёх реакционных маховиков размещён на подвижной платформе (подана заявка в Роспатент № 2026120850). Электромеханический винтовой привод обеспечивает её движение по направляющим вдоль заданной оси. Перемещение блока позволяет использовать массу исполнительных органов системы ориентации и стабилизации МКА для динамической корректировки положения центра масс.

Таким образом, развитие гироскопических систем МКА связано с расширением их функциональных возможностей при ограниченных массогабаритных и энергетических ресурсах. Выбор исполнительных органов требует учёта точности управления, конструктивной сложности и эксплуатационных ограничений. В частности, предложенную авторами схему целесообразно применять для МКА, требующих компенсации смещения центра масс при движении элементов конструкции вдоль продольной оси аппарата, например при выдвижении объектива камеры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ismail, Z.** A study of reaction wheel configurations for a 3-axis satellite attitude control / Z. Ismail, R. Varatharajoo // Advances in Space Research. – 2010. – Vol. 45, № 6. – P. 750–759.

2. **Keshtkar, S.** Design of New Attitude Control and Momentum Storage device with Variable Moment of Inertia / S. Keshtkar, H. Kojima // 15th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE 2024). – Zagreb : Croatia, 2024.

3. **Gaude, A.** Design and Structural Analysis of a Control Moment Gyroscope (CMG) Actuator for CubeSats / A. Gaude, V. Lappas // Aerospace. – 2020. – Vol. 7, № 5. – Art. 55.

4. **Zhu, L.** Review of reaction spheres for spacecraft attitude control / L. Zhu, J. Guo, E. Gill // Progress in Aerospace Sciences. – 2017. – Vol. 91. – P. 67–86.