

Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что в данном случае применение модели EMMSP дает более точный в среднем прогноз по сравнению с моделью Хольта-Винтерса. Средняя относительная погрешность для EMMSP составляет 3.96%, а для модели Хольта-Винтерса 4.15%. В отдельных случаях модель EMMSP давала критически большую ошибку, возможным решением этой проблемы может быть включение в модель дополнительных факторов, в первую очередь, фактора температуры и фактора выходного дня.

#### **Список использованных источников:**

1. Hyndman, R. Forecasting: principles and practice. [Text] / R. Hyndman, G. Athanasopoulos. Melbourne: OTexts, 2013. – 292 p.
2. Чучуева, И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального правдоподобия : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 : защищена 20.03.12 / Чучуева Ирина Александровна ; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. – М., 2012. – 143 с.
3. Chatfield, C. The Analysis of Time Series: An Introduction [Text] / C. Chatfield. – N.-Y.: Chapman & Hall, 2003. – 352 p.
4. Box, G.E.P. Time Series Analysis: Forecasting and Control [Text] / G.E.P. Box, G.M. Jenkins, G.C. Reinsel, G.M. Ljung. N.-Y.: Wiley, 2015. – 670 p.

#### **Пирогов В.В.**

*кандидат физико-математических наук, доцент,  
Кировоградский национальный технический университет*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОСНОВНЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ ДВИЖЕНИЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ИЗОЛИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОВЕРШАЮЩЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ**

Учитывая активное развитие микроэлектроники, технологий и материалов, в космической отрасли различных стран прослеживается тенденция к увеличению доли так называемых малых космических аппаратов (КА) [1], масса которых не превышает 1000 кг. Малые КА обладают рядом важных преимуществ [2; 3] перед большими КА, а именно:

- сравнительно малыми сроками реализации проекта (не более 3–4 лет);
- меньшими расходами и рисками, связанными с разработкой, выводом на орбиту и их дальнейшей эксплуатацией;
- возможностью создания простых, надежных и универсальных платформ для решения различных научных и народнохозяйственных задач.

На дальнейшее активное применение и увеличение доли малых КА указывает и развитие так называемых «кластерных» космических систем связи, дистанционного зондирования космического пространства и Земли, на базе мини-, микро- и наноспутников [4–7]. Такие космические системы имеют повышенный охват пространства, высокую оперативность и надежность

системы в целом за счет формирования и поддержания орбитальной группировки.

Важно отметить, что степень реализации различных задач (например, раннего обнаружения изменений в природной среде, глобального контроля и прогнозирования состояния атмосферной и «космической» погоды, радиомониторинга и видеонаблюдения территорий и объектов, гравиметрии, геодезии, радиофизики и др.), проводимых в космическом пространстве с помощью малых КА, во многом зависит от технических и эксплуатационных характеристик систем стабилизации. Учитывая размеры и массу малых КА, к системам стабилизации предъявляются очень жесткие ограничения (небольшая масса и габаритные размеры, низкое потребление энергии, простота конструкции, надёжность и т. д.). В наибольшей степени таким требованиям удовлетворяют пассивные системы стабилизации [8, 9], которые получили широкое распространение на ряде метеорологических, исследовательских и спутниках связи серии «Pioneer», «Explorer», «TIROS», «TELSTAR», «SYNKOM», «ATC», «ESSA», «Meteosat», «Gms», «SCD», «HESSI», «MSG» и др. Несмотря на это, применение пассивных систем стабилизации довольно ограничено, ввиду их невысокой точности. Например, по данным работ [10–12], для различных КА стабилизируемых вращением с установленными на них пассивными демпферами угла нутации (маятниковыми, шаровыми, жидкостными), остаточный угол нутации достигал значений  $0,5 \div 5$  градусов, и наблюдался даже через длительный промежуток времени.

Попытка объяснить возникновение таких «аномальных» остаточных углов нутации, для жидкостных демпферов угла нутации, была сделана в работах [10–12]. В работе [13] исследовалась динамика вращающегося КА и маятникового демпфера угла нутации. В работах [14; 15] исследовалась динамика вращающегося КА и демпфера угла нутации в виде массы на пружине, которая двигается или параллельно продольной оси КА, или в плоскости перпендикулярной к ней. Было показано, что демпферы угла нутации могут значительно влиять на движение КА, при этом устойчивыми могут быть движения, в которых КА вращается не вокруг продольной оси, а вокруг близкой к ней оси.

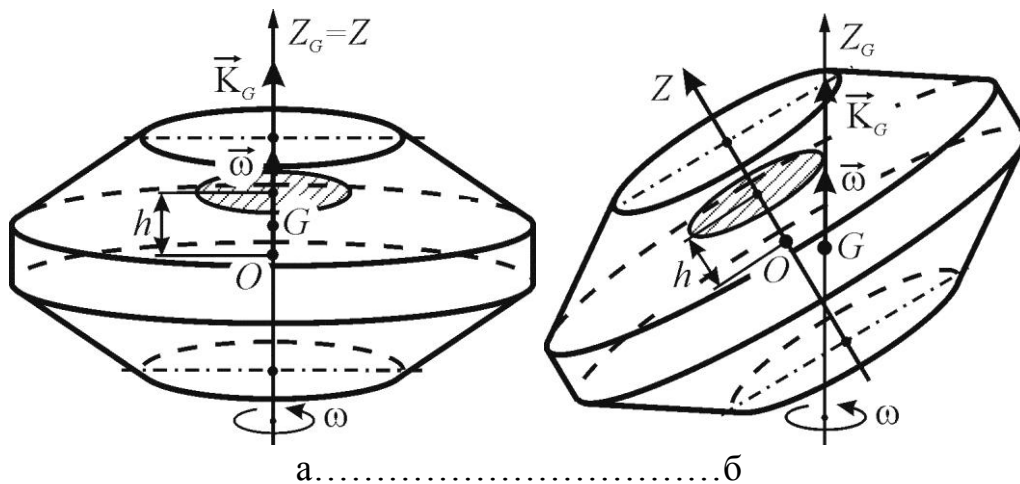
Отметим, что и ранние [12; 14], и современные [10; 11; 13; 15] работы, посвящённые исследованию динамики и устойчивости движений системы вращающийся КА-демпфер, имеют один общий существенный недостаток, который и сегодня не позволяет объяснить возникающие остаточные углы нутации. А именно, не учитывается тот факт, что пассивные демпферы угла нутации (маятниковые, шаровые и жидкостные) одновременно обладают свойствами пассивных автобалансиоров (АБ). Все это приводит к необходимости исследования устойчивости установившихся движений систем, в которых тела, присоединённые к вращающемуся КА, проявляют свойства не только демпфера, но и АБ.

Для повышения точности и эффективности пассивных систем стабилизации, используемых на вращающихся КА, в [16–19], вместо пассивных демпферов угла нутации предложено использовать пассивные классические

(маятниковые, шаровые) и неклассические (в виде абсолютно твёрдых тел, определённым образом насаженных на продольную ось КА) АБ.

Для исследования процесса устранения угла нутации, используется механическая модель изолированной системы с вязким рассеиванием (диссипацией) энергии. Изолированная система состоит из вращающегося несущего и присоединенных тел. Относительным движениям присоединенных тел препятствуют силы вязкого сопротивления (внутренние диссипативные силы). Так как система изолированная, то для нее имеют место законы сохранения движения центра масс и кинетического момента системы. У конкретных изолированных систем, состоящих из несущего тела и присоединенных тел, которые образуют пассивные АБ, существуют основные (рис. 1, а) и побочные (рис. 1, б) установившиеся движения (на рис. 1, а, б, заштрихованной областью показано место установки пассивного АБ). На основных движениях, в которых наступает стабилизация положения оси вращения несущего тела, продольная ось несущего тела совпадает с его осью вращения, а на побочных – нет.

В настоящей работе исследована устойчивость основных установившихся движений вращающейся изолированной механической системы состоящей из статически неуравновешенного несущего тела и двух одинаковых математических маятников, насаженных на продольную ось несущего тела.



**Рис. 1. Установившиеся движения изолированной системы в случае ее пространственного движения: а – основные; б – побочные**

*Источник: разработка автора*

В рамках рассматриваемой теоретико-механической модели изолированной системы установлено, что основные движения, в которых наступает стабилизация положения оси вращения несущего тела, условно асимптотически устойчивы. Условная асимптотическая устойчивость основных движений имеет место лишь в случае, когда поперечные осевые моменты инерции несущего тела больше чем продольный осевой момент инерции, а расстояние от плоскости уравнивания до центра масс системы не превышает определенного предельного значения.

Найдены оптимальные значения параметров системы при которых скорость прихода системы к основному движению будет наибольшая. Также установлено, что значения параметров системы, при которых основные движения устойчивы, могут изменяться в довольно широких пределах.

#### **Список использованных источников:**

1. Овчинников М. Ю. Малые мира сего / М. Ю. Овчинников // Компьютерра. – 2007. – № 15. – С. 37-43.
2. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. д.т.н., проф. В. Ф. Фатеева. – М.: Радиотехника, 2010. – 320 с.
3. Макриденко Л. А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. П. Ходненко [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 114, № 1. – С. 15-26.
4. Small Satellites: A Revolution in Space Science [Электронный ресурс] / Final Report. – Keck Institute for Space Studies, California Institute of Technology, Pasadena, CA, July 2014. – 83 p.
5. Gidlund S. Design Study for a Formation-Flying Nanosatellite Cluster / S. Gidlund // LUT, Department of Space Science, Kanada, 2005. – P. 128.
6. Sandau R. Small Satellites for Earth Observation: Selected Contributions / R. Sandau, H.-P. Röser, A. Valenzuela. – Springer, 2008. – 406 p.
7. Small Spacecraft Technology State of the Art / Mission Design Division Staff. – Ames Research Center, Moffett Field, California, July 2014. – 200 p.
8. Попов В. И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов / В. И. Попов. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
9. Huges P. C. Spacecraft Attitude Dynamics / P. C. Huges. – Dover Publications, New York, 2004. – 585 p.
10. Fonseca I. M. SACI-2 Attitude Control Subsystem / I. M. Fonseca, M. C. Santos // INPE. – Brasil, 2002. – Vol. 3. – Pp. 197-209.
11. Hubert C. Surface Tension Lockup in the IMAGE Nutation Damper – Anomaly and Recovery / C. Hubert, D. Swanson // NASA GSFC Flight Mechanics Symposium, 2001.
12. Рейтер Г. С. Вращательное движение пассивных космических аппаратов / Г. С. Рейтер, У. Т. Томсон // Проблемы ориентации искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1966. – С. 336-350.
13. Mirer S. A. Optimal Parameters of a Spin-Stabilized Satellite with a Pendulum-Like Damper / S. A. Mirer, V. A. Sarychev // Cosmic Research. – 1997. – Vol. 35, No. 6. – Pp. 609-615.
14. Cochran J. E. Nutation Dampers vs Precession Dampers for Asymmetric Spacecraft / J. E. Cochran, J. A. Thompson // Journal Guidance and Control. – 1980. – Vol. 3, No. 1. – P. 22-28.
15. Janssens F. L. On the stability of spinning satellites / F. L. Janssens, J. C. Van der Ha // Acta Astronautica. – 2011. – Vol. 68, Issues 7-8. – Pp. 778-789.
16. Filimonikhin G. B. Stabilization of the Rotation Axis of a Solid by Coupled Perfectly Rigid Bodies / G. B. Filimonikhin, V. V. Pirogov // International Applied Mechanics. – 2005. – Vol. 41, Issue 8. – Pp. 937-943.
17. Filimonikhin G. B. Attitude stabilization of the rotational axis of a carrying body by pendulum dampers / G. B. Filimonikhin, V. V. Pirogov, I. I. Filimonikhina // International Applied Mechanics. – 2007. – Vol. 43, Issue 10. – Pp. 1167-1173.
18. Filimonikhin G.B. Stability of Steady-State Motion of an Isolated System Consisting of a Rotating Body and Two Pendulums / G. B. Filimonikhin, I. I. Filimonikhina, V. V. Pirogov // International Applied Mechanics. – 2014. – Vol. 50, Issue 4. – Pp. 459-469.
19. Пирогов, В. В. Исследование устойчивости установившихся движений изолированной системы, совершающей плоское движение / В. В. Пирогов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – т. 5, № 7(77). – С. 9-20.