

Г.Б. Филимонихин, В.В. Пирогов, И.И. Филимонихина

Кировоградский национальный технический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАССИВНЫХ АВТОБАЛАНСИРОВ КАК ДЕМПФЕРОВ УГЛА НУТАЦИИ БЫСТРОВРАЩАЮЩИХСЯ СПУТНИКОВ

Рассмотрены особенности использования пассивных автобаланси́ров как демпферов угла нутации быстровращающихся спутников. Составлен обзор спутников, для которых применим разработанный способ демпфирования. Приведены основные теоретические результаты, полученные авторами по данной теме. Приведены практические рекомендации по использованию пассивных автобаланси́ров, как демпферов угла нутации.

Вступление. Пассивные автобаланси́ры (АБ) нашли широкое применение для уравнивания на ходу быстровращающихся роторов [1]. Корректирующие грузы (КГ) этих АБ на определенных скоростях вращения ротора сами приходят в то положение, в котором уравнивают ротор и далее вращаются с ним как одно целое, пока не появятся возмущения различного происхождения. В работах [2-12] изучена возможность и способы использования АБ для устранения угла нутации быстровращающегося спутника. В отличие от предназначенных для этого известных демпферов угла нутации, АБ при определенных условиях способны не только уменьшать угол нутации, вызванный неточным приданием начального вращения спутнику, но и способны уменьшать угол нутации, вызванный неуравновешенностью спутника относительно продольной оси. Для различных спутников остаточный угол нутации (от неуравновешенности) может достигать $0,5^{\circ} \dots 3^{\circ}$, что значительно ухудшает работу аппаратуры спутника, а именно качество сканирования поверхности Земли, фотоснимков, приводит к непостоянной флуктуации радиосигнала и т.д. [13-15]. Поэтому уравнивание спутника с одновременным демпфированием нутационных колебаний является актуальной задачей. В данной работе указаны типы спутников, для которых применим разработанный способ демпфирования. Приведены основные теоретические результаты, полученные авторами по данной теме, а также практические рекомендации по использованию АБ, как демпферов угла нутации.

§1. Типы спутников, угол нутации которых можно устранять пассивными АБ. Обзор литературы [13-21], национальных образовательных и аэрокосмических программ различных стран показывает, что пассивное демпфирование нутационных колебаний спутников, стабилизируемых вращением, получило широкое распространение на практике. Этот метод использовался и используется на метеорологических, исследовательских и спутниках связи серии «Пионер», «Explorer», «TIROS», «TELSTAR», «Синком», «ATC», «ESSA», «Meteosat», «Gms», «SCD», «HESSI», «THC-0». На

целесообразность использования пассивного демпфирования на современных микро и наноспутниках указывают и сегодняшние национальные образовательные, аэрокосмические, и другие программы, в частности США - «CubeSat», «ION-F», «Constellation Pathfinder»; Японии – «TokyoTech»; Канады – «CanX»; Италии – «UniSat»; России – «ПСИНОМ»; Украины – «Освіта-КА» и др.

В зависимости от решаемых задач ось вращения спутника направляют перпендикулярно плоскости орбиты или к центру орбиты (рис. 1). В первом случае для ориентации оси используется магнитное поле Земли, во втором - силы гравитации, солнечный ветер. Это – пассивные способы ориентации. Вместе с пассивными способами демпфирования угла нутации эти методы не нуждаются в использовании энергии на ориентацию и стабилизацию (а некоторые – и раскрутку) спутника, поэтому долговечны и обеспечивают длительное (до 5 и более лет) активное существование таких спутников.

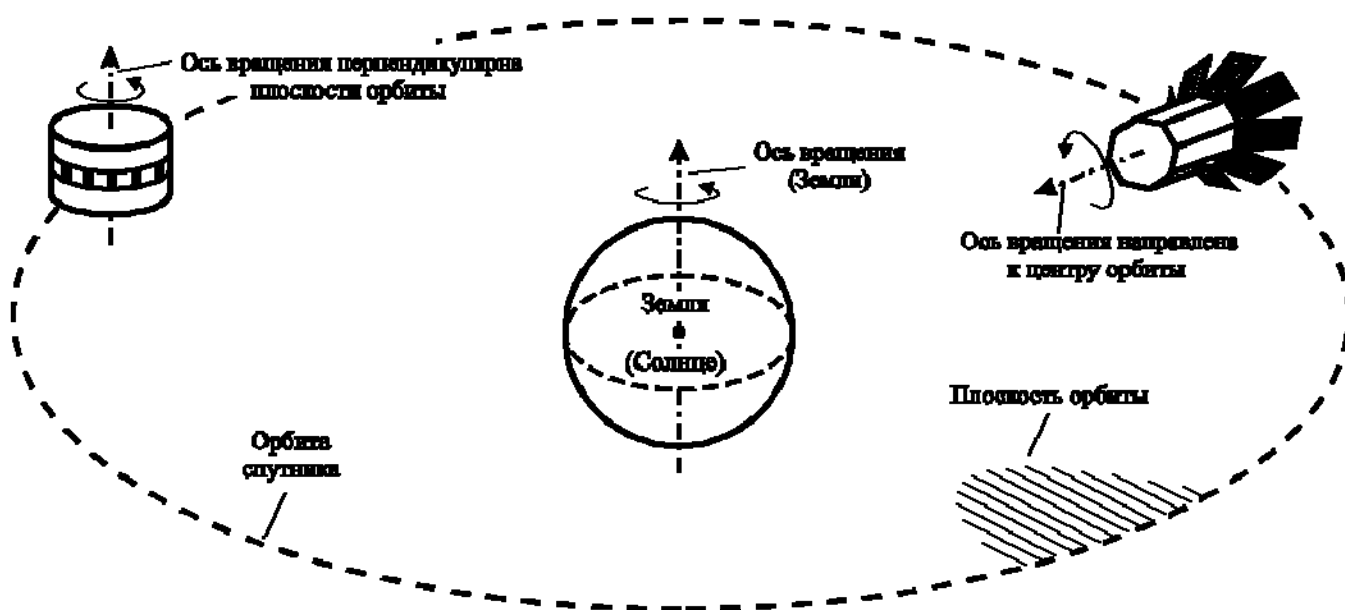


Рис 1. Ориентация оси вращения спутника, стабилизированного вращением

Разработанный метод применим для сплюснутых (устойчивых) быстровращающихся спутников, ориентируемых магнитным полем Земли или солнечным ветром, и наиболее эффективен в случае статической неуравновешенности спутников. По форме корпуса эти спутники можно разделить на цилиндрические и сферические (рис. 2), однако у всех их продольный осевой момент инерции больше поперечных.

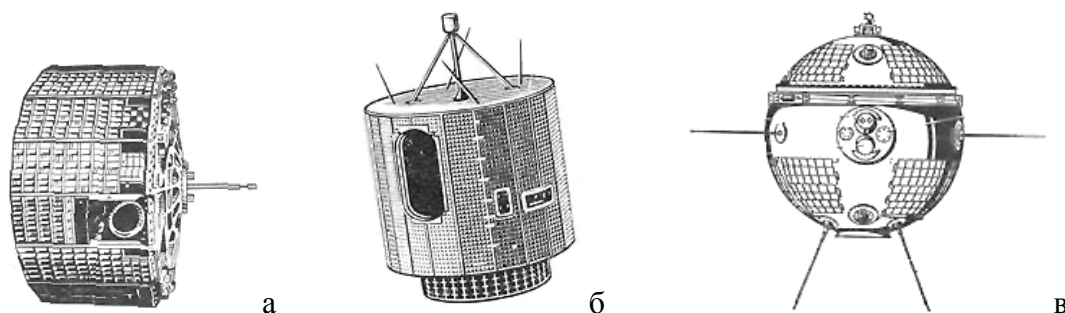


Рис 1. Форма корпуса быстровращающихся спутников:
а, б – цилиндрическая; в – сферическая

Информация по указанным выше и ряду других быстровращающихся спутников и о типах применяемых в них пассивных демпферах приведена в табл. 1.

Спутники, ориентируемые силами тяжести, являются медленно вращающимися (и не сплюснутыми) [13-16]. Их также можно уравнивать АБ, но способы использования АБ для этих целей еще не исследованы.

Табл. 1 - Быстровращающиеся спутники с пассивными демпферами угла нутации

Спутник, предназначение, страна	Год запуска	Масса, кг и класс спутника	Частота вращения, об/хв	Тип демпфера	Остаточный угол нутации, град
Телстар-1, 2, связи, США	1962, 1963	77, микро	–	Ж	0,5 ⁰
Синком, связи, США	1963	–	160	Ж	0,5 ⁰ ...1 ⁰
TIROS IX, TIROS X (рис. 1, а), метеорологический, США	1965	135, мини	10	Р	–
Explorer XXXII (рис. 1, в), исследовательский, США	1966	225, мини	30	–	–
ESSA-I, ESSA-II, ESSA-III, метеорологические, США	1966	138, мини	10	–	–
ATS 1, связи, США	1966	351, мини	100	Р	0,5 ⁰ ...1 ⁰
Explorer XLVII (IMP-H) исследовательский, США	1972	390, мини	45	–	–
SMS -1 (рис. 1, б), метеорологический, США	1974	625, миди	100	–	–
GOES: A, B,...H, метеорологические, США	1975, 1977, 1978, 1980, 1981, 1983, 1986, 1987	399, мини	100	Ж	0,5 ⁰ ...1 ⁰
Meteosat 1,2,...7, метеорологические, EUMETSAT	1977, 1981, 1988, 1989, 1991, 1993, 1997	322, мини	100	Ж	0,5 ⁰
Gms-1,2,...5, метеорологические, Япония-США	1977, 1981, 1984, 1989, 1995	320, мини	100	Ж	0,5 ⁰
FY-2, метеорологический, Китай	1997	320, мини	100	Ж	0,5 ⁰ ...1 ⁰
SCD-2, связи, Бразилия	1998	117, мини	228	–	0,5 ⁰ ...1 ⁰
HESSI, исследовательский, США	2002	293, мини	15	–	–
THC-0, исследовательский, Россия	2005	5, нано	1-3	–	–
Rstar и Vstar, связи, Япония	2007	53, микро	10	–	–

EUMETSAT – европейское космическое агентство.

Р – резонансно-механический,

Ж – жидкостной демпфер.

– информация недоступна.

§2. Задачи, методы и основные результаты исследований.

В работах [2-12] авторами решались следующие задачи исследований:

- рассматривались случаи, в которых пассивные АБ могут полностью устранить угол нутации, вызванный как неточным приданием начального вращения спутнику, так и неуровновешенностью спутника относительно его

продольной оси;

- оценивалась скорость устранения угла нутации маятниковыми (шариковыми) АБ и влияние на этот процесс различных параметров.

Показана эффективность энергетического метода для: выделения всех возможных установившихся движений системы спутник - АБ; оценки их устойчивости; получения обобщенных условий наступления уравнивания. Метод не нуждается в составлении дифференциальных уравнений движения системы.

Показана эффективность первого метода Ляпунова для: получения необходимых и достаточных условий устойчивости так называемых основных движений - в которых КГ АБ (маятники или шары) уравнивают спутник и полностью устраняют угол нутации; оценки скорости уменьшения этого угла; влияния на этот процесс параметров системы.

Показана эффективность эвристического метода [1] для определения условий, при которых КГ АБ любого типа будут следовать к положению, в котором уравнивают спутник, то есть условий, при каких АБ будет работать собственно как автобалансир. При этом получаются обобщенные условия, пригодные для АБ любого типа.

Были получены такие основные результаты исследований:

1. В рамках моделей, в которых спутник движется плоскопараллельно и статически уравнивается маятниковыми (шаровыми) АБ [2,3], или АБ со связанными твердыми телами [4], установлено, что при любых параметрах системы АБ со временем устраняют статическую неуравновешенность спутника, и он начинает вращаться вокруг собственной продольной оси.

2. В рамках моделей, в которых спутник совершает пространственное движение и уравнивается двумя парами маятников (шаров) в двух различных плоскостях уравнивания, установлено, что ни при каких параметрах системы невозможно устранение угла нутации, вызванного неуравновешенностью спутника [5,6].

3. Установлено существование двух независимых тенденций при работе АБ любого типа [8-11]:

- уменьшение угла нутации, вызванного неточным приданием начального вращения спутнику только в случае сплюснутого спутника (работа АБ в качествах демпфера угла нутации);
- тенденция к приходу КГ АБ в положение, в котором они уравнивают спутник в случае вытянутого или сплюснутого спутника (работа АБ в качестве автобалансира).

Условия проявления тенденций указаны в табл. 2, 3. В них: C – продольный, A, B - поперечные главные центральные осевые моменты инерции системы спутник - АБ, когда она совершает основное движение; b - расстояние от центра масс системы до плоскости уравнивания.

Табл. 2 - Тенденции в работе двух АБ, уравнивающих спутник в двух различных плоскостях (динамическое уравнивание)

Спутник -	Ограничения	Свойство, что проявляется	
		автобалансира	демпфера
вытянутый	$A, B > C$	+	–
сплюснутый	$C > A, B$	–	+

Табл.3 - Тенденции в работе одного АБ, уравнивающего спутник в одной плоскости (статическое уравнивание)

Спутник -	Ограничения	Проявляемое свойство	
		автобалансира	демпфера
вытянутый	$A, B > C$	+	–
сплюснутый	$C > A, B; C < A + b^2 M_{\Sigma},$ $C < B + b^2 M_{\Sigma}$	–	+
	$C > A + b^2 M_{\Sigma}, C > B + b^2 M_{\Sigma}$	+	+

Необходимо отметить, что две тенденции могут мешать друг другу при уменьшении угла нутации. Так, в случае вытянутого спутника возможно начальное уменьшение угла нутации, вызванного неуравновешенностью – в результате прихода КГ в окрестность положения, в котором они устраняют неуравновешенность (проявляется тенденция к автобалансировке). Но затем угол нутации будет возрастать в результате диссипации энергии при колебании КГ в окрестности указанных положений (не проявляется тенденция к демпфированию угла нутации).

§3. Практические рекомендации.

3.1. Способы применения АБ как демпферов угла нутации.

Предложено использовать АБ в качестве демпферов угла нутации быстровращающегося спутника такими двумя способами [12].

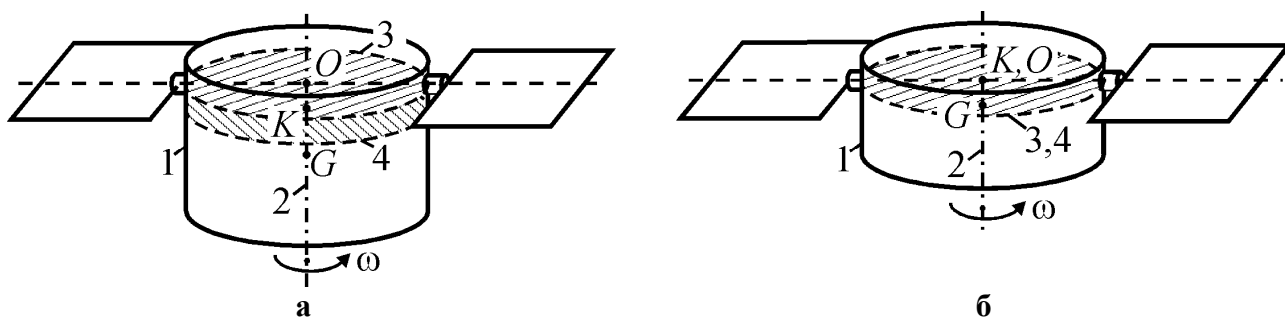
В первом способе (рис. 3, а) плоскость статической неуравновешенности 3 не совпадает с плоскостью уравнивания 4. Для уменьшения угла нутации, как от неточного придания начального вращения спутнику, так и от статической неуравновешенности спутника, предлагается устанавливать АБ любого типа как можно ближе к плоскости статической неуравновешенности, но на расстоянии от центра масс спутника G , меньшем расстояния

$$[C - \max(A, B)] / [M_{\Sigma} |GO|], \quad (1)$$

где $|GO|$ - расстояние от центра масс спутника до плоскости статической неуравновешенности.

Во втором способе (рис. 3, б) плоскость статической неуравновешенности 3 совпадает с плоскостью уравнивания 4. Для полного устранения угла нутации предлагается устанавливать АБ с твердыми КГ: с маятниками, насаженными на продольную ось спутника (ротора); шаровые АБ – в которых шары перекачиваются по кольцевой беговой дорожке; неклассические АБ [1]. Для работоспособности АБ необходимо и достаточно выполнения условия

$$|GK| = |GO| < \sqrt{[C - \max(A, B)]/M_{\Sigma}}. \quad (2)$$

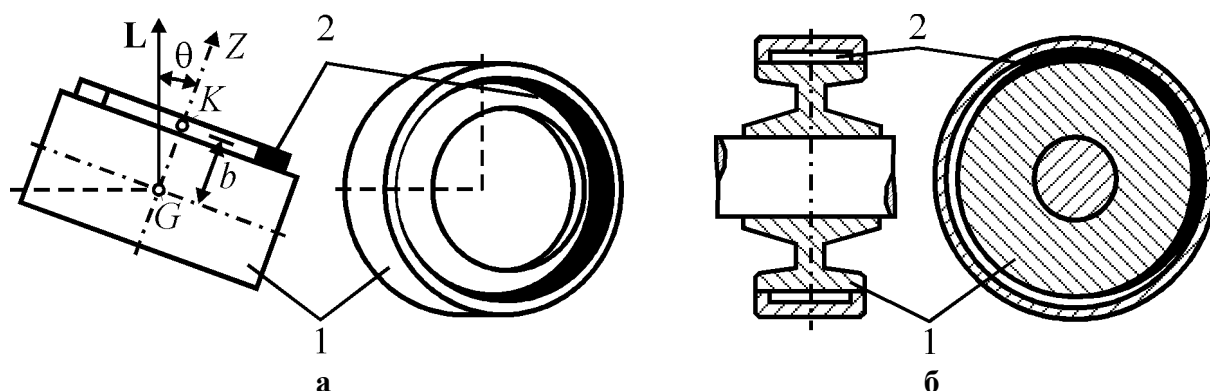


1 – быстровращающийся спутник; 2 – продольная ось; 3 – плоскость дисбаланса;
4 – плоскость уравнивания; G – центр масс спутника

Рис 3. Способы использования АБ в качестве демпферов угла нутации быстровращающихся спутников:

а - плоскость статического дисбаланса не совпадает с плоскостью уравнивания;
б - плоскость статического дисбаланса совпадает с плоскостью уравнивания

3.2. Рекомендации по установке известных кольцевых и маятниковых демпферов. Патентный поиск и сравнение конструкций показывают, что известный кольцевой демпфер угла нутации [13-15, 23-25] является жидкостным АБ Леблана [22]. В обоих этих устройствах жидкость (ртуть) частично заполняет кольцевую полость, и последняя располагается соосно продольной оси спутника (рис. 4, а) или ротора (рис. 4, б).



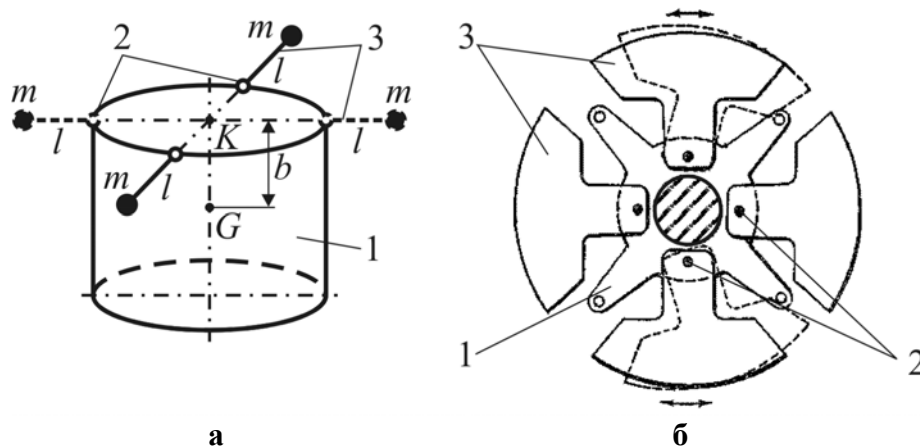
1 – спутник (ротор); 2 – кольцевая полость, заполненная жидкостью (ртутью)

Рис 4. Жидкостной демпфер (а) как жидкостной АБ Леблана (б)

Известно, что жидкостной демпфер оставляет определенный угол нутации. В некоторых работах остаточный угол объясняется поверхностным натяжением, или стоячими волнами на поверхности жидкости [23-25]. В соответствии с вышеизложенным, кольцевой демпфер должен устанавливаться с удовлетворением требований (1) или (2), иначе жидкость в нем будет стремиться к положению, в котором будет увеличивать статическую неуравновешенность даже уравновешенного, осесимметричного спутника, что будет дополнительной причиной наличия остаточного угла нутации.

Аналогично, известный двух или четырехмаятниковый демпфер угла нутации [27-30] (рис. 5, а) является маятниковым АБ Кларка (рис. 5, б) [26].

Поэтому маятниковый демпфер также должен устанавливаться с удовлетворением требований (1) или (2).



1 – корпус спутника (ротора); 2 – оси, параллельные продольной оси спутника (ротора);
3 – маятники

Рис. 5 – Маятниковый демпфер (а) как маятниковый АБ Кларка (б)

Следует отметить, что жидкостной и маятниковый демпферы быстрее других АБ устраняют угол нутации, вызванный неточным приданием начального вращения спутнику. Однако как АБ они не могут полностью уравновесить статический дисбаланс спутника [1]. Более того, это наименее эффективные АБ и видимо поэтому до настоящего времени на их автобалансирующие свойства не обращали внимания [13-21,23-25,27-30].

Выводы:

1. научно-технический прогресс способствует уменьшению размеров спутников и как следствие – приводит к увеличению доли спутников, ориентируемых и стабилизируемых пассивными способами;
2. наиболее дешевым и на сегодня единственным пассивным методом устранения нутационных колебаний, вызванных как неточным приданием начального вращения спутнику, так и неуровновешенностью спутника относительно продольной оси, является предложенный метод использования пассивных АБ, как демпферов угла нутации;
3. метод применим для сплюснутых быстровращающихся спутников, ориентируемых магнитным полем Земли или солнечным ветром, и наиболее эффективен в случае статической неуровновешенности спутников.

Литература:

1. **Філімоніхін Г.Б.** Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами. - Кіровоград: КНТУ, 2004. - 352 с.
2. **Філімоніхін Г.Б.** Стабілізація маятниками положення осі обертання ізольованого абсолютно твердого тіла // Вісник, математика-механіка. Київський національний університет. Вип. №7-8, 2002. С. 67-71.
3. **Горошко О. О., Філімоніхін Г. Б., Пирогов В. В., Філімоніхіна І.І.** Стабілізація положення осі обертання абсолютно твердого тіла

багатомаятниковим (багатокульовим) автобалансиром // Вісник Київського ун-ту. Серія: фізико-матем. науки. 2005. - №4. - с. 67-76.

4. **Филимонихин Г.Б., Пирогов В.В.** Стабилизация положения оси вращения твердого тела связанными абсолютно твердыми телами // Прикладная механика, т.41, №8, 2005. –С.122-129.

5. **Пирогов В.В.** Стабилизация оси вращения тела в пространстве пассивными автобалансирующими устройствами // Труды XXX Академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2006 г. С. 96.

6. **Филимонихин Г.Б., Пирогов В.В., Филимонихина И.И.** Стабилизация маятниковыми демпферами пространственного положения оси вращения несущего тела // Прикладная механика, т.43, №10, 2007. –С.120-128.

7. **Філімоніхін Г. Б., Пирогов В. В., Філімоніхіна І. І.** Рівняння руху ізольованої системи, яка здійснює просторовий рух // Вісник Київського ун-ту. Серія: фізико-матем. науки. 2007. - №4.

8. **Філімоніхіна І.І.** Умови зменшення автобалансирами кута нутації обертового супутника Землі // Всеукраїнський н.-т. журнал „Вібрації у техніці та технологіях”. –2007. №1 (46), С. 34-37.

9. **Філімоніхіна І.І.** Визначення умов зрівноважування обертових тіл пасивними автобалансирами // Тези доповідей 8-го Міжнародного симпозіуму Українських інженерів-механіків у Львові, 22-25.05.2007, С. 33.

10. **Филимонихина И.И., Филимонихин Г.Б.** Условия уравнивания автобалансирами вращающегося тела в изолированной системе // Прикладная механика, т.43, №11, 2007. –С.113-120.

11. **Філімоніхіна І.І., Філімоніхін Г.Б.** Усталені рухи і умови самозрівноваження одного типу ізольованої системи // Вісник Київського ун-ту. Серія: фізико-матем. науки. 2007. - №3. - с. 103-109.

12. **Філімоніхіна І.І., Філімоніхін Г.Б.** Застосування пасивного автобалансира як демпфера кута нутації сплюснутого обертового космічного апарата: Пат. на корисну модель № 28407 Україна, МПК В64G 1/00 / *І.І.Філімоніхіна, Г.Б.Філімоніхін* (Україна); КНТУ - № 200708020; Заявл. 16.07.2007; Опубл. 10.12.2007, Бюл.№20.

13. **Артюхин Ю.П., Каргу Л.И., Симаев В.Л.** Системы управления космических аппаратов, стабилизированных вращением. М.: Наука, 1979, 296 с.

14. **Овчинников М.Ю.** Системы ориентации спутников: от Лагранжа до Королева. / Соросовский образовательный журнал, Математика, № 12, 1999, С. 91-96.

15. **Попов В.И.** Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1986. - 184 с, ил.

16. **Демченко А.В., Зівачо В.С., Кулабухов А.М. и др.** Первый украинский молодежный спутник //Космічна наука і технологія, т. 12, №5/6, 2006. – С. 4-9.

17. **Ильин А.А.** Динамика быстро вращающихся малых спутников в геомагнитном поле: Автореф. дис канд. физ.-мат. наук: 01.02.01. - Теоретическая механика / Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, - Москва, 2006. - 18 с.

18. **Ефремов Г.А., Витер В.В. Липатов А.А. и др.** Малые спутники в сетях связи и вещания // Технологии и средства связи. 2000. №1.
19. **Гриценко А.А.** Использование стабилизированных вращением малых космических аппаратов в системах спутниковой связи на GEO и НЕО орбитах. ЗАО "Информационный Космический Центр "Северная Корона", 2001. 4 с.
20. **Meissinger H.F.** Low-Cost, Minimum-Size Satellites for Demonstration of Formation Flying Modes at Small, Kilometer-Size Distances / 13-th Annual AIAA/ Utah State University Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August 23-26, 1999, C 1-15.
21. **Ovchinnikov M.Yu.** Small Satellites in Russia (Economical and Management Aspects), Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems Journal, Kazan Technical University (Kazan, Russia) and Aeronautical University (Daytona Beach, USA) Publisher, 1998, N 1 (5), pp. 13-25.
22. **Leblanc M.** Patent 1,159,052. Automatic balancer for rotating bodies: patent 1,159,052 // Serial No. -803,970. Filed 01.12.1913, Patented 02.11.1815.
23. **Рейтер Г.С., Томсон У.Т.** Вращательное движение пассивных космических аппаратов // Проблемы ориентации искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1966. с. 452.
24. **Carrier G.F., Miles J.W.** On the Annular Damper a Freely Precessing Gyroscope. J. Appl. Mech. 27, 1960, pp 237-240.
25. **Hubert C., Swanson D.** Surface Tension Lockup in the IMAGE Nutation Damper — Anomaly and Recovery // NASA GSFC Flight Mechanics Symposium, 2001.
26. **Clark K.** Patent 2,405,404 US. Domestic appliance: patent 2,405,404 US // Serial No 363,321. Filed 29.10.1940, Patented 06.08.1846.
27. **Likins P.W.** Effects of energy dissipation on the free body motions of spacecraft /Technical Report No 32.860, NASA, California Institute of Technology Pasadena, California, 1966, p. 70.
28. **Newkirk H.L.** Pendulum-type nutation damper used in the NASA atmospheric structure satellite S-6. California, Navweps Report 8525, June 1965 p. 74.
29. **Мирер С.А., Сарычев В.А.** Оптимальные параметры спутника, стабилизируемого вращением, с демпфером маятникового типа // Космические исследования. – 1997. – т.35. №6. – С. 651-658.
30. **Chang, C.O., Liu, L.Z., Alfriend, K.T.** Dynamics and Stability of a Freely Precessing Spacecraft Containing a Nutation Damper, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 19, No. 2, 1996, pp. 297–305.

Поступила в редколлегию 31.03.2008