

Исследование динамических характеристик радиального динамического гасителя крутильных колебаний антенны космического аппарата

© С.К. Хрупа, Г.А. Щеглов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена возможность использования радиального динамического гасителя для гашения крутильных колебаний крупногабаритных антенных систем космических аппаратов. Удобство применения подобного гасителя определяется тем, что в результате внутреннего параметрического резонанса происходит передача энергии от упруго закрепленной антенны, колебания которой трудно демпфировать, к динамическому гасителю, колебания которого демпфируются достаточно просто. Теоретическое исследование динамических характеристик гасителя проведено с использованием простой модельной колебательной системы с двумя степенями свободы. Нелинейные уравнения движения могут быть интегрированы численно. Обнаружено, что радиальный гаситель можно разместить на антенной системе космического аппарата вместо балансировочных грузов, при этом масса динамического гасителя колебаний должна составлять около 35 % массы рефлектора, а его положение равновесия должно находиться на максимально возможном удалении от оси вращения системы. Найдены диапазоны параметров, при которых динамический гаситель колебаний работает эффективно. Обнаружено, что применение этого гасителя целесообразно при относительно больших начальных возмущениях.

Ключевые слова: космический аппарат, динамический гаситель колебаний, демпфирование колебаний, антенные системы, колебательная система, две степени свободы

В настоящее время складные крупногабаритные антенные системы входят в состав многих космических аппаратов (КА) связи и дистанционного зондирования Земли [1–3]. Предполагается, что габаритные размеры антенных систем перспективных КА будут составлять несколько десятков метров. Например, максимальный диаметр рефлектора AstroMesh (Европейское космическое агентство) может достигать 50 м [1]; модульная конструкция позволяет создавать рефлекторы LDR (Япония) с апертурой до 30 м [4]. Такие крупногабаритные конструкции крепятся к корпусу КА с помощью штанг и кронштейнов (рис. 1). Низшие частоты собственных колебаний рефлектора, закрепленного на кронштейне, относительно корпуса КА составляют 0,1...0,6 Гц [5, 6]; эти значения будут снижаться при увеличении размеров антенн. При этом низшая парциальная частота собственных колебаний рефлектора оказывается на порядок выше и составляет десятки герц. Малая жесткость узлов крепления приводит при совершении программных

разворотов КА к нежелательным колебаниям рефлекторов, что нарушает работу целевой аппаратуры в период до момента успокоения колебаний.

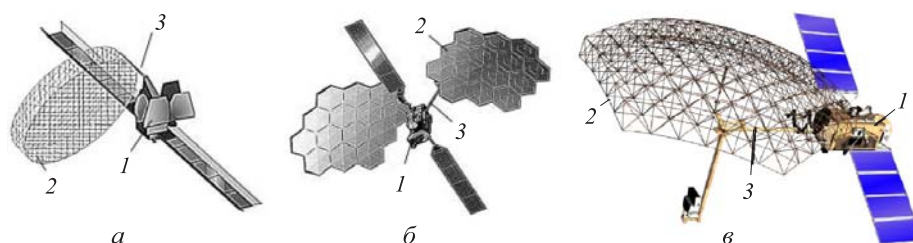


Рис. 1. Примеры крепления крупногабаритных рефлекторов к корпусу КА:
а — Thuraya (Европейское космическое агентство); *б* — Kiku-8 (Япония); *в* — «Кондор-Э» (Россия); *1* — корпус КА; *2* — рефлектор; *3* — штанга

Известно, что удовлетворение требований, заложенных в тактико-технические характеристики (ТТХ) КА, которые обладают крупногабаритными рефлекторами, в большей степени обеспечивается неподвижностью антенной системы относительно орбитальной системы координат. При этом колебания остальной части конструкции КА не столь критичны. Поэтому для улучшения таких систем в качестве одного из основных требований выдвигается требование обеспечить малое время затухания переходных процессов колебаний рефлектора при орбитальных маневрах КА.

Габаритные размеры рефлекторов в раскрытом состоянии значительно превосходят размеры корпуса КА, а крепление рефлектора к корпусу имеет малую жесткость, поэтому применение обычных демпферов, устанавливаемых в местах крепления кронштейнов к корпусу, часто оказывается неэффективным [7]. Время затухания колебаний, составляющее несколько десятков секунд, может не соответствовать требованиям, которые заложены в ТТХ КА. Проведенный анализ возможных средств демпфирования колебаний [8] позволяет сделать вывод о перспективности применения динамических гасителей колебаний (ДГК) для решения указанной проблемы. Обзор литературы о гашении колебаний, возникающих в маятниковых системах, можно найти, например, в работе [7].

Примером КА российского производства, обладающего крупногабаритной разворачивающейся антенной, является КА дистанционного зондирования Земли «Кондор-Э», его описание и характеристики приведены в открытых источниках. Аппарат предназначен для получения, хранения и передачи на наземные пункты приема и обработки высокодетальной информации в микроволновом диапазоне спектра электромагнитного излучения [9]. Внешний вид КА на орбитальном участке полета показан на рис. 1, *в*.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование динамических характеристик радиального динамического гасителя крутильных колебаний антенны КА с использованием простой модельной системы, позволяющее оценить возможность применения ДГК такого типа для подавления колебаний антенной системы, которые возникают в процессе эксплуатации КА на орбитальном участке полета.

Крутильные колебания крупногабаритной антенны относительно корпуса КА, возникающие под действием начальных возмущений, можно упрощенно, в силу существенного различия жесткости антенны и жесткости узла ее крепления, свести к колебаниям системы с одной степенью свободы — маятника (рис. 2). В маятнике рефлектор антенны моделируется телом, имеющим момент инерции I_p и массу M_p . Облучатель антенны моделируется сосредоточенной массой M_o . Указанные массивные элементы соединены абсолютно жестким невесомым стержнем. Массы расположены на расстоянии соответственно L_p и L_o относительно шарнира. Жесткость узла крепления антенны к корпусу КА моделируется пружиной кручения жесткостью k . В качестве обобщенной координаты рассматривают угол поворота $\varphi(t)$, который считают малым. Демпфирование по угловой координате $\varphi(t)$ в данной системе полагают пренебрежимо малым и в расчетной схеме не учитывают.

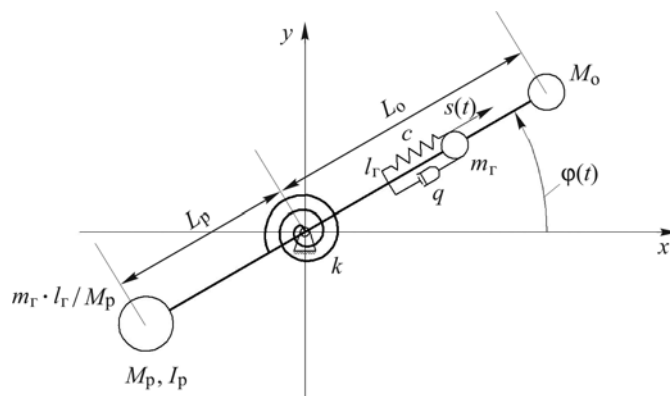


Рис. 2. Расчетная схема задачи

В рассматриваемую систему вводится ДГК, расположенный на штанге облучателя (см. рис. 2). Гаситель моделируется гармоническим осциллятором, который состоит из сосредоточенной массы m_r невесомой пружины жесткостью c и линейного демпфера, имеющего коэффициент трения q . Расположен ДГК так, что обобщенная координата $s(t)$ колебаний осциллятора направлена вдоль стержня, а положение

равновесия находится на расстоянии l_{Γ} от шарнира. В силу расположения ДГК его можно назвать радиальным. Подобные гасители применяются для подавления вибраций различных технических систем, например подвесных кабинок канатной дороги [10–13]. Чтобы сохранить статический баланс, в систему вводится груз, уравнивающий массу гасителя. Считается, что груз массой $m_{\Gamma}l_{\Gamma}/L_p$ расположен в центре масс рефлектора.

Радиальный ДГК работает по принципу внутреннего параметрического резонанса, который в рассматриваемой системе с двумя степенями свободы $\varphi(t)$ и $s(t)$ возможен при соответствующем соотношении парциальных частот [14]:

$$\omega_o = \frac{2\omega_M}{n}, \quad (1)$$

где ω_o — парциальная циклическая частота осциллятора (ДГК); ω_M — парциальная циклическая частота маятника (антенной системы); $n = 1, 2, \dots$ — порядок резонанса.

В случае основного параметрического резонанса ($n = 1$) зависимость между парциальными частотами колебаний ДГК и колебаний антенной системы принимает вид

$$\omega_o = 2\omega_M. \quad (2)$$

Парциальная циклическая частота колебаний ДГК

$$\omega_o = \sqrt{\frac{c}{m_{\Gamma}}}. \quad (3)$$

Парциальная циклическая частота колебаний антенной системы

$$\omega_M = \sqrt{\frac{k}{M_p L_p^2 + m_{\Gamma} l_{\Gamma} L_p + m_{\Gamma} l_{\Gamma}^2 + I_p + M_o L_o^2}}. \quad (4)$$

Определим приведенную угловую жесткость пружины кручения, используя выражение (4):

$$k = \omega_M^2 (M_p L_p^2 + m_{\Gamma} l_{\Gamma} L_p + m_{\Gamma} l_{\Gamma}^2 + I_p + M_o L_o^2). \quad (5)$$

Из выражений (2)–(4), подставляя (5), получаем зависимость между жесткостью пружины ДГК и парциальной циклической частотой антенной системы:

$$c = 4m_{\Gamma}\omega_M^2. \quad (6)$$

Введем связи между параметрами системы, используя безразмерные коэффициенты:

$$m_{\Gamma} = \mu M_p, \quad l_{\Gamma} = \alpha L_o, \quad q = \gamma \omega_o = 2\gamma \omega_m, \quad (7)$$

где μ — относительная масса ДГК; α — относительное расположение гасителя на штанге; γ — декремент колебаний.

Подставляя (7) в (5) и (6), получаем

$$k = \omega_o^2 \left(M_p L_p^2 + \mu \alpha M_p L_o L_p + \mu M_p \alpha^2 L_o^2 + I_p + M_o L_o^2 \right),$$

$$c = 4\mu M_p \omega_m^2. \quad (8)$$

Чтобы рассмотреть малые колебания системы относительно положения равновесия, введем безразмерную по времени величину, равную отношению физического времени t к периоду T_m парциальных колебаний антенной системы: $\tau = t/T_m$. Угол поворота антенной системы $\varphi(\tau)$ является безразмерной величиной; смещение ДГК представим в безразмерном виде, введя коэффициент λ , как $s(\tau) = \lambda(\tau)L_o$. Выражения для кинетической и потенциальной энергии, а также диссипативной функции Рэлея принимают вид соответственно

$$E = \frac{1}{2} M_o L_o^2 \varphi'(\tau)^2 + \frac{1}{2} (I_p + M_p L_p^2) \varphi'(\tau)^2 + \frac{1}{2} m_{\Gamma} l_{\Gamma} L_p \varphi'(\tau)^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} m_{\Gamma} \left[(l_{\Gamma} + L_o \lambda(\tau))^2 \varphi'(\tau)^2 + L_o^2 \lambda'(\tau)^2 \right], \quad (9)$$

$$P = \frac{1}{2} k \varphi(\tau)^2 + \frac{1}{2} c L_o^2 \lambda(\tau)^2, \quad (10)$$

$$R = \frac{1}{2} q L_o^2 \lambda'(\tau)^2. \quad (11)$$

Для получения нелинейных дифференциальных уравнений колебаний воспользуемся уравнениями Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial E}{\partial \varphi'} \right) - \frac{\partial E}{\partial \varphi} + \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{\partial R}{\partial \varphi'} = 0, \\ \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial E}{\partial \lambda'} \right) - \frac{\partial E}{\partial \lambda} + \frac{\partial P}{\partial \lambda} + \frac{\partial R}{\partial \lambda'} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Подставляя (9)–(11) в (12), с учетом (7) и (8) получаем систему нелинейных дифференциальных уравнений колебаний, которая будет использована для проведения анализа методом численного интегрирования:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(L_o^2 M_o + L_p^2 M_p + I_p + \mu M_p l_\Gamma L_p + \mu M_p L_o^2 [\alpha + \lambda(\tau)]^2 \right) \varphi''(\tau) + \\ & + 2L_o^2 \mu M_p (\alpha + \lambda(\tau)) \lambda'(\tau) \varphi'(\tau) + \\ & + \omega_m^2 \left(M_p L_p^2 + \mu \alpha M_p L_o L_p + \mu M_p \alpha^2 L_o^2 + I_p + M_o L_o^2 \right) \varphi(\tau) = 0, \quad (13) \\ & L_o^2 \mu M_p \lambda''(\tau) + 2L_o^2 \gamma \omega_m \lambda'(\tau) + 4\mu M_p \omega_m^2 L_o^2 \lambda(\tau) - \\ & - L_o^2 \mu M_p (\alpha + \lambda(\tau)) \varphi'(\tau) = 0. \end{aligned} \right.$$

Линеаризация уравнений системы (13) позволяет описать независимые малые колебания антенной системы и ДГК:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(L_o^2 M_o + L_p^2 M_p + I_p + \mu M_p l_\Gamma L_p + \mu M_p L_o^2 [\alpha + \lambda(\tau)]^2 \right) \varphi''(\tau) + \\ & + \omega_m^2 \left(M_p L_p^2 + \mu \alpha M_p L_o L_p + \mu M_p \alpha^2 L_o^2 + I_p + M_o L_o^2 \right) \varphi(\tau) = 0, \\ & L_o^2 \mu M_p \lambda''(\tau) + 2L_o^2 \gamma \omega_m \lambda'(\tau) + 4\mu M_p \omega_m^2 L_o^2 \lambda(\tau) = 0. \end{aligned} \right.$$

Для рассмотрения внутреннего параметрического резонанса необходимо численно интегрировать нелинейные уравнения системы (13).

Анализ второго уравнения системы (13) показывает, что колебания антенной системы воздействуют на ДГК как нелинейная позиционная возбуждающая сила:

$$F(\lambda(\tau), \varphi'(\tau)) = L_o^2 \mu M_p (\alpha + \lambda(\tau)) \varphi'(\tau)^2. \quad (14)$$

Значение силы $F(\lambda(\tau), \varphi'(\tau))$ прямо пропорционально квадрату угловой скорости колебаний маятника, а также относительной массе ДГК. Указанная сила тем больше, чем дальше от шарнира находится положение равновесия ДГК. Таким образом, повышение эффективности ДГК может быть достигнуто креплением его на максимально возможном удалении от шарнира, а также увеличением массы гасителя, что, однако, снижает массовое совершенство устройства.

Для исследования были заданы следующие параметры системы: $M_p = 51,5$ кг; $I_p = 106$ кг · м²; $L_p = 1,335$ м; $M_o = 23$ кг; $L_o = 2,99$ м; $f_o = 1,6$ Гц; $\omega_o = 10$ рад/с.

Режим движения колебательной системы с ДГК определяется параметрами α , μ и γ . Рассмотрим характерные режимы колебаний, описываемые системой уравнений (13), при следующих начальных условиях: $\varphi(0) = 0$, $\varphi'(0) = \psi \omega_m$, $s(0) = 0$, $s'(0) = 0$. Здесь введен безразмерный параметр начального возмущения угловой скорости ψ .

На рис. 3 показан пример результата численного интегрирования системы уравнений (13) при значениях параметров $\alpha = 0,75$, $\mu = 0,35$,

отсутствии демпфирования в ДГК ($\gamma = 0$) и начальном возмущении $\psi = 0,2$. Видно, что в силу внутреннего параметрического резонанса возникают «биения» — циклический обмен энергией между маятником и гасителем.

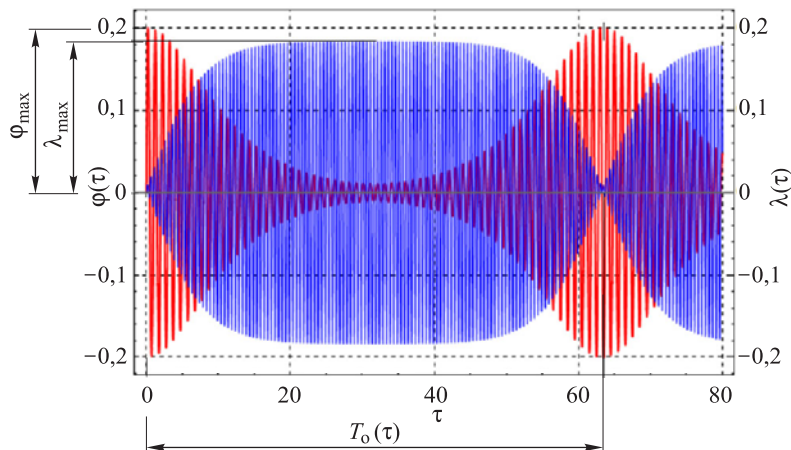


Рис. 3. Огибающие амплитуд колебаний при отсутствии демпфирования в ДГК и значениях коэффициентов $\alpha = 0,75$, $\mu = 0,35$, $\gamma = 0$, $\psi = 0,2$:

— $\varphi(\tau)$; — $\lambda(\tau)$; φ_{\max} — максимальная амплитуда колебаний маятника; λ_{\max} — максимальная амплитуда колебаний гасителя; $T_0(\tau) = T_0 / \tau$ — период биений

Чтобы определить рациональные значения коэффициентов α и μ , был проведен анализ периода биений и выявлены его зависимости от безразмерных параметров ДГК. Вид зависимостей периода биений $T_0(\tau)$ от значений коэффициентов α и μ при нулевом демпфировании ($\gamma = 0$) и начальном возмущении $\psi = 0,2$ представлен на рис. 4. На рисунке видно, что при увеличении значений параметров ДГК период биений уменьшается с 395 периодов колебаний системы при $\alpha = 0,3$ и $\mu = 0,075$ до 40 периодов при $\alpha = 0,9$ и $\mu = 0,8$.

Исходя из полученных результатов, а также с учетом конструктивных особенностей прототипа антенны КА для анализа были выбраны следующие параметры ДГК: $\alpha = 0,75$, $\mu = 0,35$ (см. рис. 3).

Было проведено исследование влияния начальных условий на колебательные процессы, возникающие в системе с ДГК. Рассматривалась система без демпфирования и с определенными выше параметрами ДГК. На рис. 5 приведена зависимость периода биений $T_0(\tau)$ от параметра начального возмущения ψ при отсутствии демпфирования ($\gamma = 0$). Как ясно из графика, применение радиального ДГК целесообразно только при больших значениях ψ и неэффективно в области малых начальных возмущений, так как процесс обмена энергией занимает весьма длительное время.

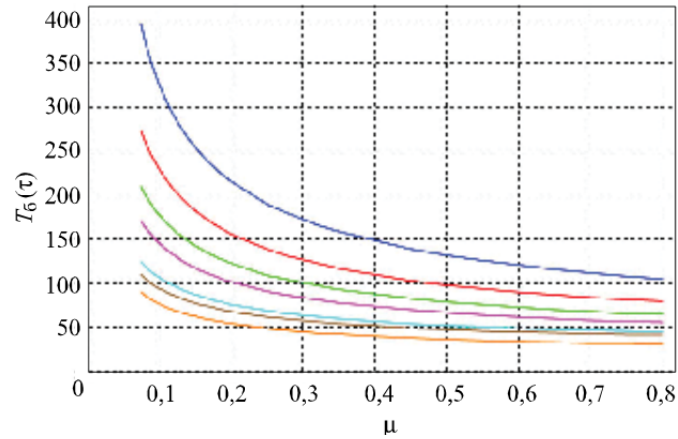


Рис. 4. Зависимость периода биений $T_6(\tau)$ от значений α и μ при нулевом демпфировании ($\gamma = 0$) и $\psi = 0,2$:
 — $\alpha = 0,3$; — $\alpha = 0,4$; — $\alpha = 0,5$; — $\alpha = 0,6$; — $\alpha = 0,7$;
 — $\alpha = 0,8$; — $\alpha = 0,9$

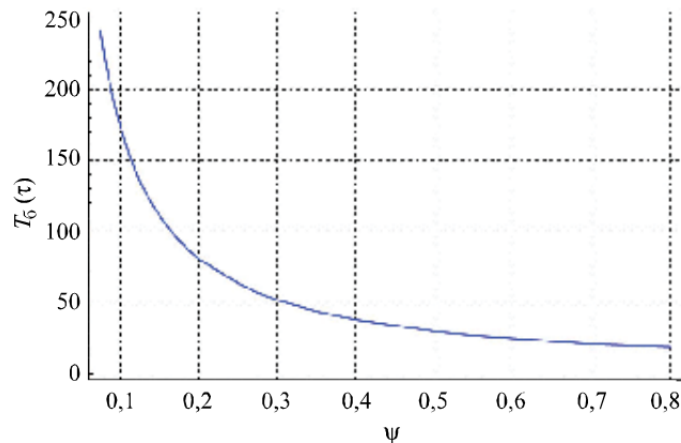


Рис. 5. Зависимость периода биений $T_6(\tau)$ от параметра начального возмущения ψ при отсутствии демпфирования ($\gamma = 0$)

После определения параметров ДГК и анализа влияния начальных условий была рассмотрена система, в которой учитывалось демпфирование. Начальные возмущения системы вызывают внутренний параметрический резонанс ДГК, и амплитуда его колебаний уменьшается вследствие передачи ему энергии. Одновременно с этим амплитуду колебаний ДГК уменьшает и демпфирование. Пример огибающих амплитуд колебаний маятника и ДГК при определенных параметрах, обеспечивающих эффективный режим гашения колебаний, показан на рис. 6.

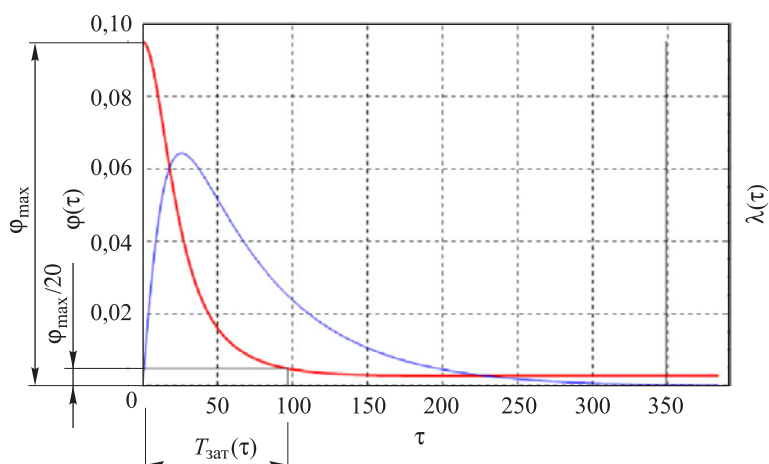


Рис. 6. Огибающие амплитуд колебаний при следующих значениях параметров:
 $\alpha = 0,75, \mu = 0,35, \gamma = 0,0475, \psi = 0,095$; — $\varphi(\tau)$; — $\lambda(\tau)$

При малых значениях параметра демпфирования $\gamma < 0,045$ эффективность гашения колебаний уменьшается — в системе имеются два периода биений (рис. 7, а, где представлены огибающие амплитуд колебаний маятника и гасителя). При большом значении $\gamma > 0,05$ эффективность ДГК снижается по другой причине: амплитуда остаточных колебаний системы начинает быстро увеличиваться и при значениях $\gamma \approx 0,13$ параметрический резонанс разрушается. Примеры огибающих амплитуд колебаний в этом случае показаны на рис. 7, б и в.

В свою очередь, при очень малых значениях параметра начальных возмущений $\psi < 0,09$ эффективность ДГК снижается, как и при увеличении параметра демпфирования: при $\psi \approx 0,035$ параметрический резонанс также разрушается. Примеры огибающих амплитуд колебаний показаны на рис. 7, г и д.

При начальных возмущениях $\psi > 0,1$ радиальный ДГК с подобранными значениями параметров и коэффициента демпфирования становится неэффективен, так как не позволяет демпфировать колебательные процессы за один период (рис. 7, е).

Поскольку вследствие конструктивно-компоновочных ограничений на реальном прототипе антенны КА положение точки крепления ДГК зависит не только от положения равновесия, но и от максимальной амплитуды его колебаний, было проанализировано влияние значения ψ на реализуемую величину максимальной амплитуды колебаний ДГК при различных значениях γ . Результаты проведенного анализа представлены на рис. 8. Отрезки линий на графиках соответствуют режиму эффективного гашения колебаний.

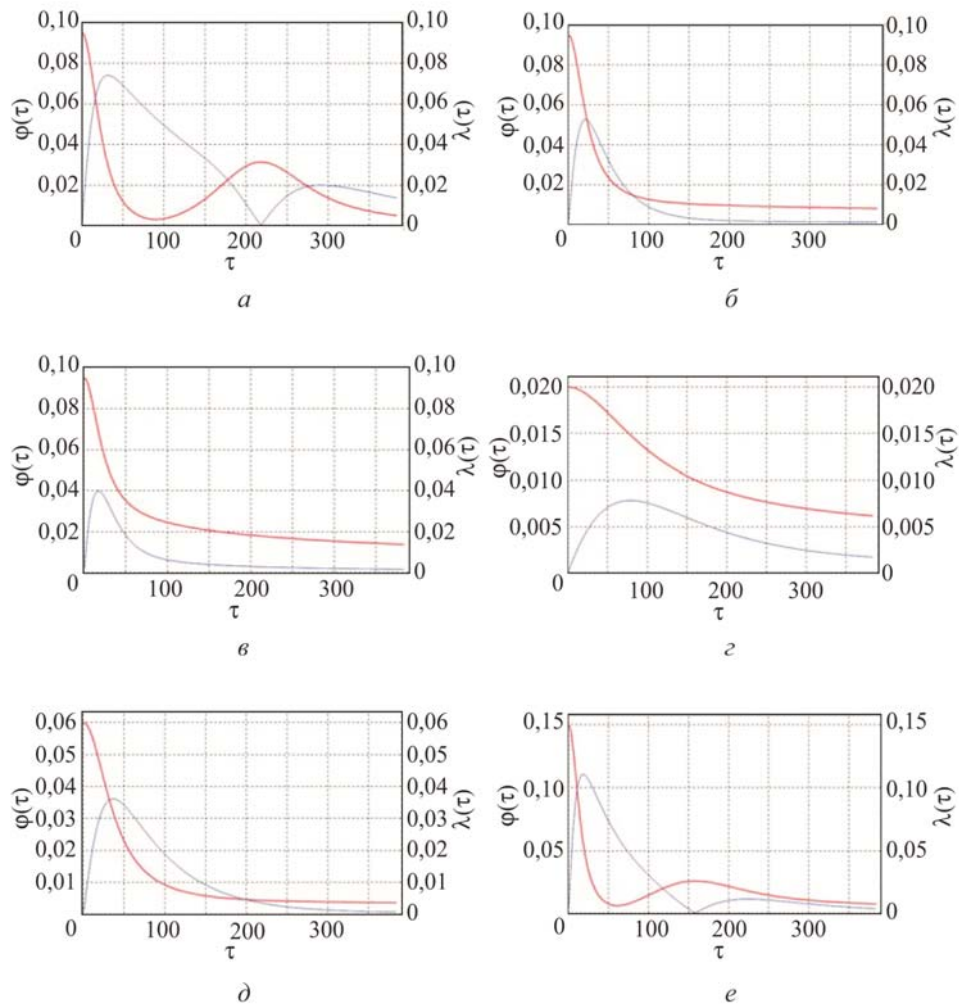


Рис. 7. Огибающие амплитуд колебаний при $\alpha = 0,75$, $\mu = 0,35$, различных параметрах начального возмущения и демпфирования:

a — $\gamma = 0,02$, $\psi = 0,095$; b — $\gamma = 0,1$, $\psi = 0,095$; c — $\gamma = 0,2$, $\psi = 0,095$; d — $\gamma = 0,0475$, $\psi = 0,02$; e — $\gamma = 0,0475$, $\psi = 0,06$; e — $\gamma = 0,0475$, $\psi = 0,15$; — $\varphi(\tau)$; — $\lambda(\tau)$

По эксплуатационным соображениям критерием эффективности работы ДГК было выбрано снижение максимальной амплитуды φ_{\max} колебаний маятника в 20 раз (см. рис. 6). Зависимость времени затухания колебаний маятника $T_{\text{зат}}(\tau)$ от значения ψ при различных значениях γ показана на рис. 9. Здесь отрезки линий на графиках также соответствуют режиму эффективного гашения колебаний. Сочетание параметров, при котором в системе возникает второй пик колебаний маятника (см. рис. 7, a), показано на рис. 9 отдельной кривой.

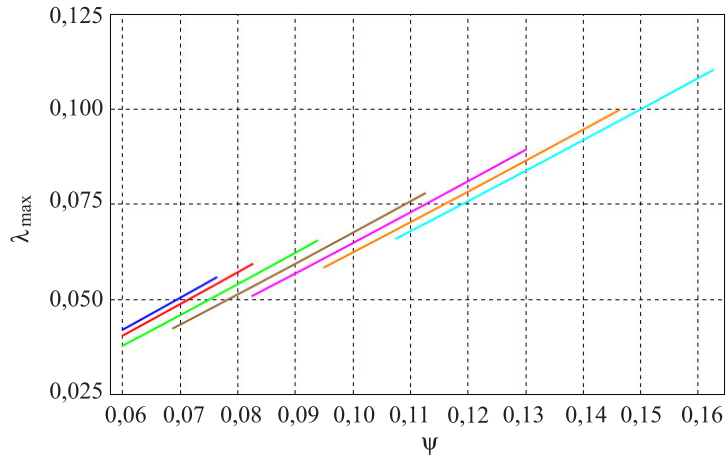


Рис. 8. Зависимость максимальной амплитуды колебаний ДГК от параметра начального возмущения ψ при различных значениях параметра демпфирования γ :

— $\gamma = 0,03$; — $\gamma = 0,04$; — $\gamma = 0,05$; — $\gamma = 0,06$; — $\gamma = 0,07$;
— $\gamma = 0,08$;

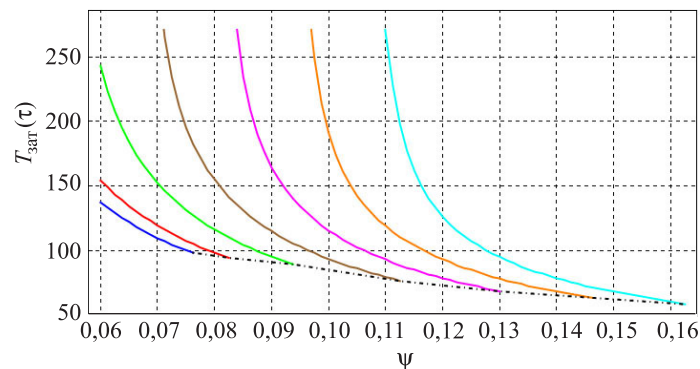


Рис. 9. Зависимость времени затухания колебаний системы $T_{\text{зат}}(\tau)$ от параметра начального возмущения ψ при различных значениях параметра демпфирования γ :

— $\gamma = 0,3$; — $\gamma = 0,4$; — $\gamma = 0,5$; — $\gamma = 0,6$; — $\gamma = 0,7$;
— $\gamma = 0,8$; - - - - - линия появления второго пика

По результатам проведенного анализа были определены диапазоны значений параметров начального возмущения $0,09 \leq \psi \leq 0,10$ и демпфирования $0,045 \leq \gamma \leq 0,050$, при которых радиальный ДГК эффективно гасит колебания маятника и имеет достаточно низкие значения максимальной амплитуды колебаний.

В целом по результатам проведенного анализа с использованием элементарной модели колебательной системы с двумя степенями свободы можно сделать следующие выводы об эффективности использо-

вания радиального ДГК для гашения крутильных колебаний антенных систем КА.

1. Удобство применения радиального ДГК определяется тем, что в результате внутреннего параметрического резонанса энергия передается от упруго закрепленной антенны, колебания которой трудно демпфировать, к ДГК, колебания которого демпфируются достаточно просто.

2. Использование ДГК радиального типа позволит увеличить скорость поворота антенной системы в процессе эксплуатации КА, что увеличивает его быстродействие при выполнении поставленных задач.

3. Обнаружено, что для эффективного гашения колебаний масса ДГК должна составлять около 35 % массы рефлектора, и это может затруднить применение гасителя подобного типа на КА. Однако поскольку чаще всего масса рефлектора существенно больше массы облучателя, для уравнивания конструкции на балке облучателя помещают балансировочные грузы. Как показал проведенный анализ, радиальный ДГК может быть удобно закреплен на антенне КА вместо балансировочных грузов, при этом его положение равновесия должно находиться на максимально возможном удалении от оси вращения системы.

4. Найдены диапазоны параметров, при которых ДГК работает эффективно. Обнаружено, что ДГК эффективен при относительно больших начальных возмущениях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Large Space Apertures Workshop. Overview*. Keck Institute for Space Studies. URL: <http://www.kiss.caltech.edu/workshops/apertures2008/> (дата обращения 01.05.2016).
- [2] Raab A. *Deployable double-membrane surface antenna*. Patent US 5777582 A.07.07.1998. URL: <https://www.google.si/patents/US5777582> (дата обращения 05.05.2016).
- [3] Зимин В.Н., Крылов А.В., Мешковский В.Е., Сдобников А.Н., Файзуллин Ф.Р., Чурилин С.А. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций. *Наука и образование*, 2014, № 10. DOI: 10.7463/1014.0728802
- [4] Ozawa S. 30m class lightweight large deployable reflector. *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. Rome, 11–15 April 2011, pp. 3354–3358.
- [5] Kohata H., Usui M., Sunagawa K., Hamaki T., Yamasa Y. In-orbit Electrical Performance of Large Deployable Reflector and Communications Experiments on ETS-VIII. *Proceedings of the 26th ISTS (International Symposium on Space Technology and Science)*. Hamamatsu City, Japan, June 1–8, 2008.
- [6] Santiago-Prowald J. Large Deployable Antennas Mechanical Concepts. *Large Space Apertures Workshop*. California Institute of Technology, Pasadena, 2008,

- November 10–11. URL: <http://www.kiss.caltech.edu/workshops/apertures2008/talks/santiagoprowald.pdf> (дата обращения 08.04.2016).
- [7] Биюшкина Т.С., Щеглов Г.А. Анализ способов демпфирования колебаний крупногабаритных конструкций КА в магнитном поле Земли. *Аэрокосмический научный журнал*, 2016, № 3. DOI: 10.7463/aersp.0316.0841754
- [8] Коцур О.С., Хрупа С.К. Применение динамических гасителей для сокращения времени переходных процессов элементов КА. *Наука и образование*, 2017, № 5. DOI: 10.7463/0517.0001135
- [9] Зайцев С.Э. Космический аппарат-носитель РСА «Кондор-Э» как основа радиолокационной космической системы «Кондор-ФКА». *VII Всерос. Арmandовские чтения*. Муром, Муромский ин-т ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2016. URL: www.mivlgu.ru/conf/armand2016/rmdzs-2016/pdf/S5_4.pdf (дата обращения 08.04.2016).
- [10] Viet L.D., Park Y. Vibration control of the axisymmetric spherical pendulum by dynamic vibration absorber moving in radial direction. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, vol. 25, iss. 7, pp. 1703–1709.
- [11] Younes M.F. Numerical study for dynamic vibration absorber using Coriolis force for pendulum system. *Journal of American Science*, 2015, no. 11 (12), pp. 157–162.
- [12] Matsuhisa H., Yasuda M. Dynamic absorber for ropeway gondola using coriolis force. *Vietnam Journal of Mechanics*, VAST, 2008, vol. 30, no. 4, pp. 291–298.
- [13] Matsuhisa H., Yasuda M. Dynamic Vibration Absorbers for Rolling Structures. *Conferencia Passive Vibration Absorbers*. URL: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/Conferencia30Ags2012/DynamicVibrationAbsorbers.pdf> (дата обращения 26.03.2018).
- [14] Витт А., Горелик Г. Колебания упругого маятника как пример колебаний двух параметрически связанных линейных систем. *ЖТФ*, 1933, т. III, вып. 2–3, с. 294–307.

Статья поступила в редакцию 10.04.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Хрупа С.К., Щеглов Г.А. Исследование динамических характеристик радиального динамического гасителя крутильных колебаний антенны космического аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1779>

Хрупа Станислав Константинович — аспирант, старший преподаватель кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: Khrupa.S.K@mail.ru

Щеглов Георгий Александрович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: Shcheglov_GA@bmstu.ru

Research of dynamic characteristics of the radial dynamic damper for suppressing torsional vibrations of spacecraft antenna

© S.K. Khrupa, G.A. Shcheglov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers the possibility of using a radial dynamic damper for suppressing torsional vibrations of large-scale antenna systems of space vehicles. It is convenient to use such a damper because resulting from internal parametric resonance, energy is transferred from an elastically fixed antenna, whose oscillations are difficult to damp, to a dynamic damper whose oscillations are easily damped. Theoretical study of the dynamic characteristics of the damper was carried out using a simple model vibrating system with two degrees of freedom. Nonlinear equations of motion can be integrated numerically. It has been found that a radial damper can be placed on the antenna system of a space vehicle instead of balancing weights, while the mass of the dynamic damper should be about 35% of the reflector mass, and its equilibrium position should be at the maximum possible distance from the axis of rotation of the system. The ranges of parameters at which the dynamic damper operates efficiently are found. It was found that the use of this damper is expedient for relatively large initial perturbations.

Keywords: spacecraft, dynamic damper, vibration suppression, antenna systems, vibrating system, two degrees of freedom

REFERENCES

- [1] *Large Space Apertures Workshop. Overview.* Keck Institute for Space Studies Publ. Available at: <http://www.kiss.caltech.edu/workshops/apertures2008/> (accessed May 01, 2016).
- [2] Raab A. *Deployable double-membrane surface antenna.* Patent US 5777582 A.07.07.1998. Available at: <https://www.google.si/patents/US5777582> (accessed May 05, 2016).
- [3] Zimin V.N., Krylov A.V., Meshkovsky V.E., Sdobnikov A.N., Faizullin F.R., Churilin S.A. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tehnicheskyy zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2014, no. 10. DOI: 10.7463/1014.0728802
- [4] Ozawa S. 30m class lightweight large deployable reflector. *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. Rome, 11–15 April, 2011, pp. 3354–3358.
- [5] Kohata H., Usui M., Sunagawa K., Hamaki T., Yamasa Y. In-orbit Electrical Performance of Large Deployable Reflector and Communications Experiments on ETS-VIII. *Proceedings of the 26th ISTS (International Symposium on Space Technology and Science)*. Hamamatsu City, Japan, June 1–8, 2008.
- [6] Santiago-Prowald J. *Large Deployable Antennas Mechanical Concepts.* *Large Space Apertures Workshop.* California Institute of Technology, Pasadena, 2008, November 10–11. Available at: <http://www.kiss.caltech.edu/workshops/apertures2008/talks/santiagoprowald.pdf> (accessed April 8, 2016).
- [7] Biushkina T.S., Shcheglov G.A. *Aerokosmicheskyy nauchnyy zhurnal — Aerospace Scientific Journal*, 2016, no. 3. DOI: 10.7463/aersp.0316.0841754

- [8] Kotsur O.S., Khrupa S.K. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhicheskiy zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2017, no. 5. DOI: 10.7463/0517.0001135
- [9] Zaytsev S.E. Kosmicheskiy apparat-nositel RSA "Kondor-E" kak osnova radiolokatsionnoy kosmicheskoy sistemy "kondor FKA" [The spacecraft with the SAR, "Kondor-E" is the basis of the radar-based space system "Kondor-FCA"]. *VII Vserossiyskie Armandovskie chteniya* [All-Russian Armand Readings]. Murom, Murom Institute of Vladimir State University Publ., 2016. Available at: www.mivlgu.ru/conf/armand2016/rmdzs-2016/pdf/S5_4.pdf (accessed April 8, 2016).
- [10] Viet L.D., Park Y. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 1703–1709.
- [11] Younes M.F. *Journal of American Science*, 2015, no. 11 (12), pp. 157–162.
- [12] Matsuhisa H., Yasuda M. *Vietnam Journal of Mechanics*, VAST, 2008, vol. 30, no. 4, pp. 291–298.
- [13] Matsuhisa H., Yasuda M. Dynamic Vibration Absorbers for Rolling Structures. *Conferencia Passive Vibration Absorbers*. Available at: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/Conferencia30Ags2012/DynamicVibrationAbsorbers.pdf> (accessed March 26, 2018).
- [14] Witt A., Gorelik G. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Soviet Physics: Technical Physics*, 1933, vol. III, no. 2–3, pp. 294–307.

Khrupa S.K., post-graduate student, Assist. Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: Khrupa.S.K@mail.ru

Shcheglov G.A. Dr. Sc., Assoc. Professor, Professor of the Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: Shcheglov_GA@bmstu.ru