

Анализ возможности подавления крутильных колебаний антенны космического аппарата с помощью динамического гасителя

© С.К. Хрупа, О.Н. Тушев

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

Рассмотрена динамика ферменных антенных систем с динамическим гасителем в области низкочастотных собственных крутильных колебаний. Применение динамического гасителя колебаний обусловлено слабыми диссипативными свойствами антенной системы. За счет внутреннего резонанса происходит передача энергии от упруго закрепленной антенной системы к динамическому гасителю, колебания которого демпфируются достаточно просто. Теоретическое исследование динамических характеристик гасителя проведено на простой линейной модели колебательной системы с двумя степенями свободы. Уравнения движения интегрируются численно. Показано, что масса динамического гасителя составляет около 5 % массы рефлектора, а положение гасителя должно быть на максимально возможном удалении относительно оси вращения системы, при этом он может быть использован вместо балансировочных грузов. Определены диапазоны конструктивных параметров динамического гасителя колебаний и уровни нагрузок, при которых он работает эффективно.

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

При проектировании современных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли в качестве целевой аппаратуры широко используются трансформируемые антенные системы ферменного типа [1–4]. На разрабатываемых перспективных КА габаритные размеры антенных систем составляют несколько десятков метров. Для примера можно привести такие КА, как Thuraya (разработка ОАЭ), Kiku-8 (разработка Японии), NISAR (совместная разработка Республики Индия и США), «Кондор-Э» (разработка РФ) и SMAP с рефлектором AstroMesh (разработка США) (рис. 1).

Ферменные конструкции рефлекторов, которые входят в состав таких антенных систем, в основном крепятся на корпусе КА с помощью различных штанг, кронштейнов и шарниров [5–7], примеры такого крепления приведены на рис. 2.

Жесткость элементов крепления мала, поэтому низшая частота носительных колебаний антенной системы и корпуса КА составляет менее 1 Гц [8]. Это неизбежный недостаток, который при совершении программных разворотов КА ухудшает работу его целевой аппаратуры до момента успокоения колебаний.

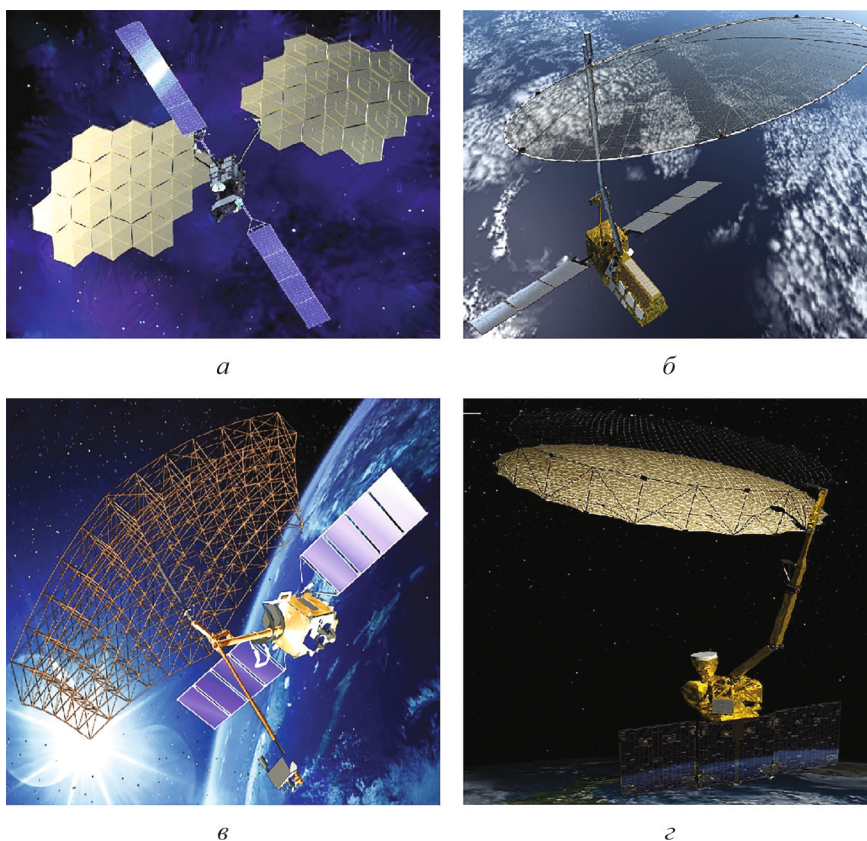


Рис. 1. Примеры КА, оборудованных крупногабаритными рефлекторами:
а — Kiku-8; б — NISAR; в — «Кондор-Э»; г — SMAP

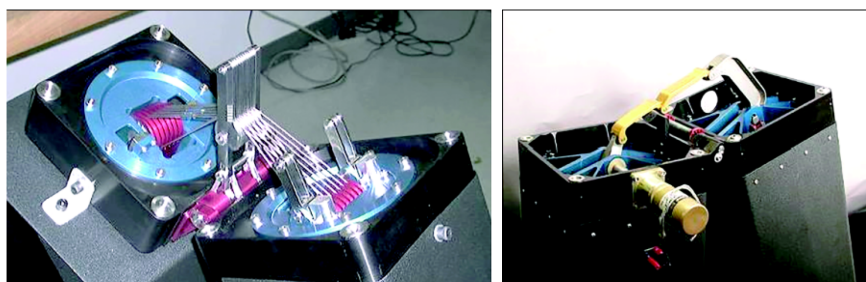


Рис. 2. Шарниры для крепления штанги рефлектора к корпусу КА

Как правило, диссипативные свойства антенной системы достаточно низкие и любые начальные возмущения приводят к длительным низкочастотным переходным процессам, что очень часто оказывается неприемлемым в отношении тактико-технических требований, предъявляемых к КА. При этом низшая парциальная частота собственных колебаний рефлектора составляет более 10 Гц [9, 10].

Таким образом, радикальное сокращение времени затухания низкочастотных колебательных процессов, совершаемых элементами КА, является важной инженерной задачей, которая может быть решена различными способами.

Вследствие того что крепление антенной системы на корпус КА весьма податливо и габаритные размеры рефлекторов в рабочем состоянии значительно превосходят размеры корпуса КА, использование обычных демпферов неэффективно [11]. Вместе с тем применение динамических гасителей колебаний (ДГК) весьма перспективно [12, 13].

Цель данной работы заключается в теоретическом исследовании динамических характеристик орторадialного динамического гасителя крутильных колебаний антенной системы КА на простой модельной задаче, результаты которого позволяют оценить эффективность использования ДГК такого типа для подавления относительных крутильных колебаний антенной системы и корпуса КА, возникающих на этапе орбитального участка полета.

При рассмотрении низкочастотных колебаний рефлектор можно промоделировать с достаточной точностью как твердое тело с соответствующей массой и моментами инерции.

Жесткость антенной системы существенно отличается от жесткости ее крепления к корпусу КА. По этой причине крутильные колебания антенной системы относительно корпуса КА, возникающие под действием начальных возмущений, можно упрощенно свести к элементарной колебательной системе с одной вращательной степенью свободы — маятнику (рис. 3).

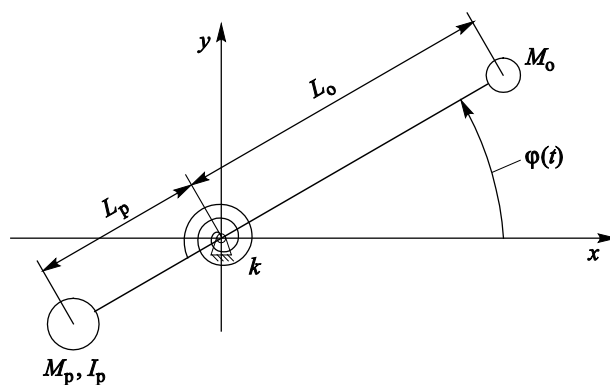


Рис. 3. Расчетная схема задачи

Рефлектор, который входит в состав антенной системы, моделируется как твердое тело, обладающее собственным моментом инерции I_p , массой M_p и расположенное на расстоянии L_p относительно шарнира. Облучатель моделируется как твердое тело массой

M_0 , расположенное на расстоянии L_0 от оси вращения. Указанные массивные элементы соединены абсолютно жестким невесомым стержнем. Жесткость узла крепления антенной системы к корпусу КА имитирует торсионная пружина жесткостью k . В качестве обобщенной координаты рассматривается малый угол поворота $\varphi(t)$ антенной системы. В рамках допущений принимается, что диссипация при колебаниях антенной системы пренебрежимо мала.

В рассматриваемую систему вводится ДГК, расположенный на штанге облучателя на расстоянии l_r от оси вращения, который моделируется гармоническим осциллятором массой m_r , жесткостью c и с коэффициентом диссипации q (рис. 4). Поступательное движение гасителя направлено перпендикулярно штанге в плоскости вращения. Перемещение гасителя определяет угловая обобщенная координата $\theta(t)$. В силу направления движения ДГК его можно назвать орторадиальным. Известны патенты на ДГК подобного рода, например [14]. Для сохранения статического баланса в систему вводится груз массой $m_r l_r / L_p$, который располагается в центре масс рефлектора и уравновешивает массу гасителя в его нейтральном положении.

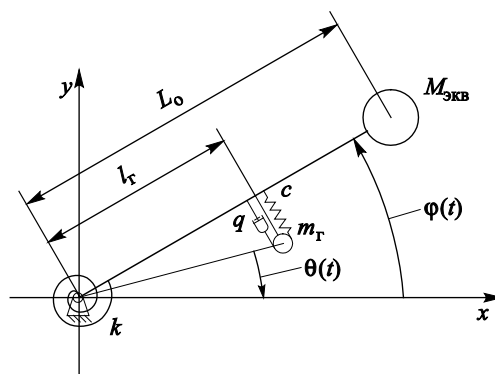


Рис. 4. Динамически эквивалентная схема с динамическим гасителем

Поскольку антенная система в данной задаче имеет одну вращательную степень свободы, для упрощения дальнейшего анализа ее можно рассматривать как математический маятник с эквивалентной массой $M_{\text{эКВ}}$, расположенной на расстоянии L_0 от точки вращения системы (см. рис. 4).

Масса эквивалентного груза определяется из условия равенства частот собственных колебаний рассматриваемой и эквивалентной систем:

$$\omega_M = \omega_{\text{ЭКВ}}, \quad (1)$$

где ω_M , $\omega_{\text{ЭКВ}}$ — парциальная циклическая частота собственных колебаний маятника (антенной системы) и эквивалентного маятника соответственно.

Циклическую частоту колебаний антенной системы определяют по формуле

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

а циклическую частоту колебаний эквивалентного маятника — по формуле

$$\omega_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{k}{M_{\text{ЭКВ}} L_o^2 + m_{\Gamma} l_{\Gamma}^2}}. \quad (3)$$

Приравнявая выражения собственных частот (2) и (3), определяем эквивалентную массу с учетом балансировочного груза:

$$M_{\text{ЭКВ}} = (M_p L_p^2 + m_{\Gamma} l_{\Gamma} L_p + I_p + M_o L_o^2) / L_o^2. \quad (4)$$

Для рассмотрения малых колебаний относительно положения равновесия введем безразмерную величину, равную отношению физического времени к периоду колебаний гасителя:

$$\tau = \frac{t}{T_M},$$

где T_M — период парциальных колебаний маятника (антенной системы).

Задача решается для малых углов $\varphi(\tau)$ и $\theta(\tau)$, что соответствует реальным динамическим процессам в системе, которые могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями.

Орторадиальный ДГК работает при условии возникновения биеений, которые в рассматриваемой системе с двумя степенями свободы $\varphi(\tau)$ и $\theta(\tau)$ возможны при соответствующем соотношении парциальных частот [15]:

$$\omega_o \approx \omega_{\text{ЭКВ}}, \quad (5)$$

где ω_o — парциальная циклическая частота осциллятора (динамического гасителя).

Парциальная циклическая частота колебаний ДГК

$$\omega_o = \sqrt{c/m_{\Gamma}}. \quad (6)$$

Угловая жесткость пружины кручения определяется из выражения (3):

$$k = \omega_{\text{ЭКВ}}^2 (M_{\text{ЭКВ}} L_0^2 + m_{\Gamma} l_{\Gamma}^2). \quad (7)$$

Зависимость между парциальной циклической частотой колебаний антенной системы и жесткостью пружины ДГК можно получить, подставляя в (5) выражения (3) и (6):

$$c = m_{\Gamma} \omega_{\text{ЭКВ}}^2. \quad (8)$$

Для связи между параметрами системы введем безразмерные коэффициенты:

$$m_{\Gamma} = \mu M_{\text{р}}; \quad l_{\Gamma} = \alpha L_0; \quad q = \gamma \omega_0 = \gamma \omega_{\text{ЭКВ}}, \quad (9)$$

где μ — относительная масса ДГК; α — относительный коэффициент расположения ДГК на штанге облучателя; γ — параметр демпфирования колебаний.

Подставляя (9) в формулы (7) и (8), получаем

$$k = \omega_{\text{ЭКВ}}^2 (M_{\text{ЭКВ}} L_0^2 + \alpha^2 \mu M_{\text{р}} L_0^2); \quad (10)$$

$$c = \mu M_{\text{р}} \omega_{\text{ЭКВ}}^2, \quad (11)$$

где $M_{\text{ЭКВ}} = (M_{\text{р}} L_{\text{р}}^2 + \alpha \mu M_{\text{р}} L_0 L_{\text{р}} + I_{\text{р}} + M_0 L_0^2) / L_0^2$.

С учетом принятых обозначений выражения для кинетической и потенциальной энергий, а также для диссипативной функции Рэлея принимают следующий вид:

$$E = \frac{1}{2} M_{\text{ЭКВ}} L_0^2 \varphi'(\tau)^2 + \frac{1}{2} \alpha^2 \mu M_{\text{р}} L_0^2 \theta'(\tau)^2; \quad (12)$$

$$P = \frac{1}{2} \omega_{\text{ЭКВ}}^2 (M_{\text{ЭКВ}} L_0^2 + \alpha^2 \mu M_{\text{р}} L_0^2) \varphi(\tau)^2 + \frac{1}{2} \mu M_{\text{р}} \omega_{\text{ЭКВ}}^2 \alpha^2 L_0^2 [\varphi(\tau) - \theta(\tau)]^2, \quad (13)$$

$$R = \frac{1}{2} \gamma \omega_{\text{ЭКВ}} \alpha^2 L_0^2 [\varphi'(\tau) - \theta'(\tau)]^2. \quad (14)$$

Для получения дифференциальных уравнений колебаний антенной системы и ДГК воспользуемся уравнениями Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial E}{\partial \varphi'} \right) - \frac{\partial E}{\partial \varphi} + \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{\partial R}{\partial \varphi'} = 0, \\ \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial E}{\partial \theta'} \right) - \frac{\partial E}{\partial \theta} + \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial R}{\partial \theta'} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Подставляя выражения (12)–(14) в (15) и проводя преобразования, получаем систему линейных дифференциальных уравнений колебаний

$$\begin{cases} \varphi''(\tau) + \frac{\alpha^2 \gamma \omega_{\text{ЭКВ}}}{M_{\text{ЭКВ}}} \varphi'(\tau) + \left(1 + \frac{2\alpha^2 \mu M_p}{M_{\text{ЭКВ}}} \right) \omega_{\text{ЭКВ}}^2 \varphi(\tau) - \\ - \frac{\alpha^2 \gamma \omega_{\text{ЭКВ}}}{M_{\text{ЭКВ}}} \theta'(\tau) - \frac{\alpha^2 \mu M_p \omega_{\text{ЭКВ}}^2}{M_{\text{ЭКВ}}} \theta(\tau) = 0, \\ \theta''(\tau) + \frac{\gamma \omega_{\text{ЭКВ}}}{\mu M_p} \theta'(\tau) + \omega_{\text{ЭКВ}}^2 \theta(\tau) - \frac{\gamma \omega_{\text{ЭКВ}}}{\mu M_p} \varphi'(\tau) - \omega_{\text{ЭКВ}}^2 \varphi(\tau) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Анализ первого уравнения системы (16) показывает, что при малом коэффициенте α ($\alpha \ll 1$) будут малыми и декременты затухания колебаний ДГК, что уменьшит эффективность гашения колебаний.

Для определения влияния относительной массы μ ДГК получим квадраты частот $\omega_{1,2}$ собственных колебаний системы:

$$\omega_{1,2}^2 = \omega_{\text{ЭКВ}}^2 \left\{ 1 + \frac{\alpha}{M_{\text{ЭКВ}}} \left[\alpha \mu M_p \mp \sqrt{\mu M_p (M_{\text{ЭКВ}} + \alpha^2 \mu M_p)} \right] \right\}. \quad (17)$$

По результатам анализа уравнения (17) было определено, что для возникновения внутреннего резонанса при $\alpha \approx 1$ необходимо использовать условие малости демпфирующей массы $\mu \ll 1$, что, в свою очередь, обосновывает использование ДГК малой массы.

Подводя итог, отметим, что эффективность ДГК может быть повышена при закреплении гасителя малой массы на максимально возможном удалении от шарнира.

Для дальнейшего численного исследования системы уравнений (16) были заданы следующие параметры системы:

$$M_p = 51,5 \text{ кг}; \quad I_p = 106 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad L_p = 1,335 \text{ м};$$

$$M_o = 23 \text{ кг}; \quad L_o = 2,99 \text{ м}; \quad \omega_o = 10 \text{ рад/с}.$$

Режим движения колебательной системы с ДГК определяется параметрами α , μ и γ . Был рассмотрен характерный режим колебаний в системе (16) при следующих начальных условиях:

$$\varphi(0) = 0; \quad \varphi'(0) = \psi\omega_{\text{экв}}; \quad \theta(0) = 0; \quad \theta'(0) = 0,$$

где ψ — безразмерный коэффициент возмущения, характеризующий изменения начальной угловой скорости.

На рис. 5 приведен результат численного интегрирования системы (16) с параметрами $\alpha = 0,75$, $\mu = 0,05$ при отсутствии демпфирования в ДГК ($\gamma = 0$) и $\psi = 0,02$. Кроме того, указаны максимальная амплитуда колебаний маятника φ_{max} , максимальная амплитуда колебаний ДГК θ_{max} и период биений $T_{\text{б}}(\tau) = T_{\text{б}}/\tau$. Видно, что в силу внутреннего резонанса возникают биения — циклический обмен энергией между антенной системой и ДГК.

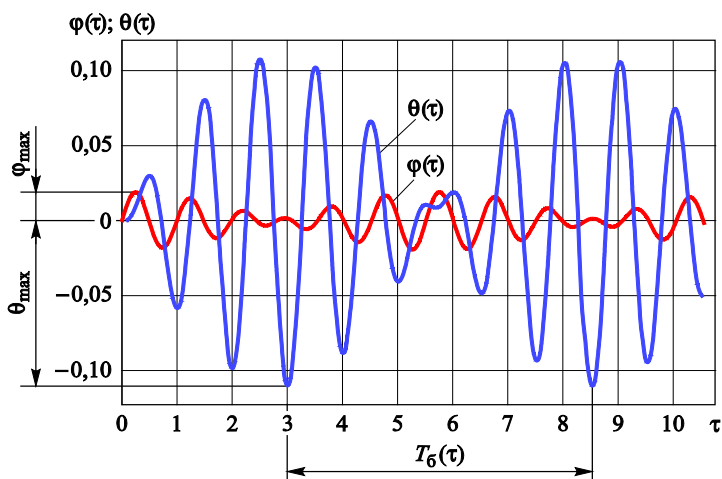


Рис. 5. Огибающие амплитуд колебаний маятника $\varphi(\tau)$ и ДГК $\theta(\tau)$ при отсутствии демпфирования ($\gamma = 0$) в гасителе и значениях коэффициентов $\alpha = 0,75$, $\mu = 0,05$, $\psi = 0,02$

Для определения рациональных значений коэффициентов α и μ был проведен анализ и выявлены зависимости периода биений от безразмерных параметров гасителя. Вид зависимостей периода биений $T_{\text{б}}(\tau)$ от значений коэффициентов α и μ при нулевом демпфировании ($\gamma = 0$) и начальном возмущении $\psi = 0,02$ представлен на рис. 6. Как видно из приведенных зависимостей, при увеличении параметров ДГК период биений уменьшается с 94 периодов колебаний системы при $\alpha = 0,1$ и $\mu = 0,01$ до трех периодов при $\alpha = 0,8$ и $\mu = 0,2$.

При использовании ДГК такого типа необходимо также учитывать максимальную амплитуду колебаний гасителя θ_{\max} , зависимость которой от значений коэффициентов α и μ при нулевом демпфировании ($\gamma = 0$) и начальном возмущении $\psi = 0,02$ представлена на рис. 7.

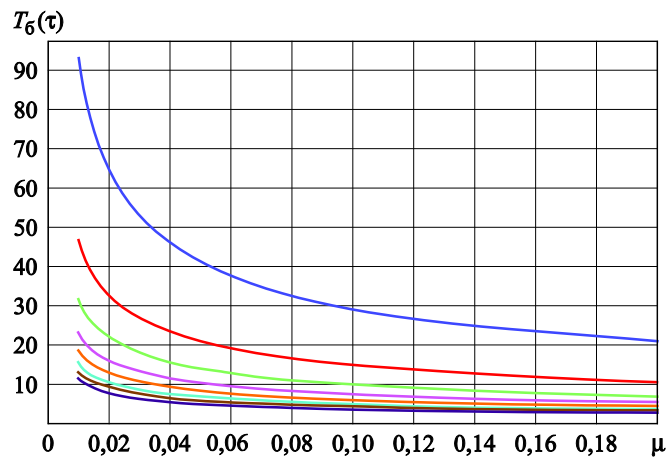


Рис. 6. Зависимость периода биений $T_6(\tau)$ от значений μ при нулевом демпфировании ($\gamma = 0$), начальном возмущении $\psi = 0,02$ и различных значениях коэффициента α :
 $\alpha = 0,1$ (—), $0,2$ (—), $0,3$ (—), $0,4$ (—), $0,5$ (—), $0,6$ (—),
 $0,7$ (—), $0,8$ (—)

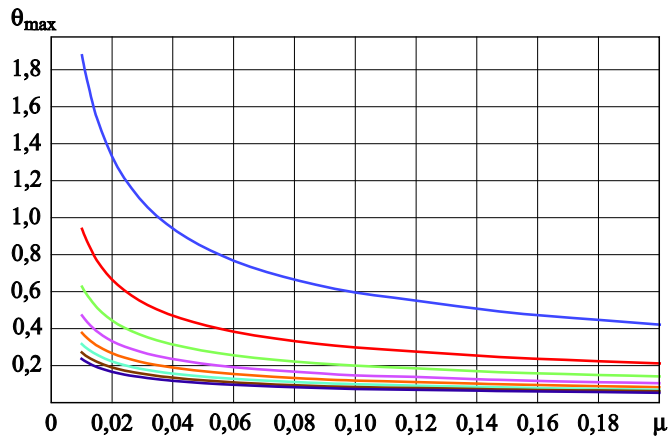


Рис. 7. Зависимость максимальной амплитуды колебаний ДГК θ_{\max} от значений μ при нулевом демпфировании ($\gamma = 0$), начальном возмущении $\psi = 0,02$ и различных значениях коэффициента α :
 $\alpha = 0,1$ (—), $0,2$ (—), $0,3$ (—), $0,4$ (—), $0,5$ (—), $0,6$ (—),
 $0,7$ (—), $0,8$ (—)

Для того чтобы определить влияние параметра начального возмущения на колебательные процессы, рассматривалась система с рассчитанными ранее параметрами ДГК без демпфирования при различных значениях параметра начального возмущения. Проведенные расчеты показали, что период биений $T_6(\tau)$ не зависит от изменения коэффициента возмущения ψ при нулевом демпфировании ($\gamma = 0$). Выявлена также линейная зависимость значения максимальной амплитуды колебаний ДГК θ_{\max} от коэффициента начального возмущения:

$$\theta_{\max} = 5,52622\psi. \quad (18)$$

На основании соотношения (18) можно сделать вывод о том, что ДГК орторадиального типа наиболее эффективен при малых значениях начального возмущения по причине малости максимальной амплитуды ДГК.

Затем система уравнений (16) была рассмотрена с учетом демпфирования. Начальные возмущения системы вызывают внутренний резонанс ДГК, и амплитуда его колебаний уменьшается вследствие передачи энергии гасителю. Одновременно с этим демпфирование уменьшает и амплитуду колебаний гасителя. Пример огибающих амплитуд колебаний антенной системы и ДГК при определенных параметрах, обеспечивающих эффективный режим гашения колебаний, приведен на рис. 8.

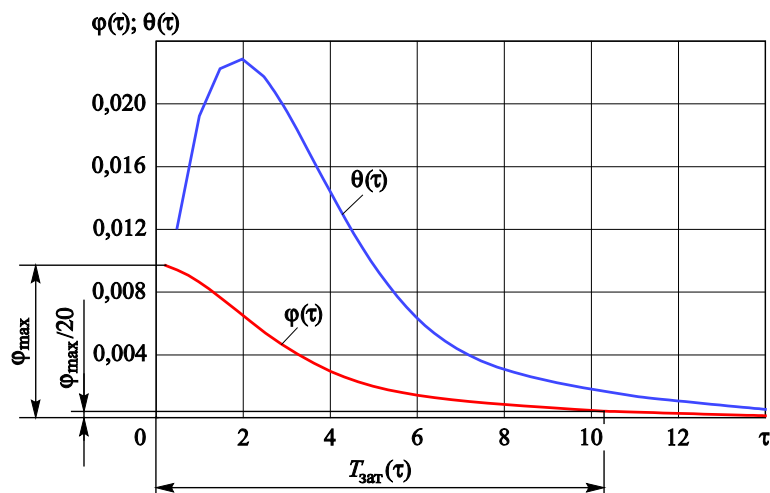


Рис. 8. Огибающие амплитуд колебаний антенной системы $\varphi(\tau)$ и ДГК $\theta(\tau)$ при $\alpha = 0,75$, $\mu = 0,05$, $\gamma = 0,75$, $\psi = 0,01$

При малых значениях параметра демпфирования ($\gamma < 0,65$) эффективность гашения колебаний уменьшается — в системе имеются два периода биений и более (рис. 9, а, б). При значении параметра демпфирования в диапазоне $\gamma > 0,85$ эффективность ДГК падает по другой причине: амплитуда колебаний ДГК начинает уменьшаться и при значениях $\gamma \approx 10$ становится равной амплитуде колебаний системы, что, в свою очередь, увеличивает время гашения колебаний антенной системы. Примеры огибающих амплитуд колебаний при $\gamma = 5$ приведены на рис. 9, в.

При значениях коэффициента начального возмущения $\psi > 0,02$ максимальная амплитуда колебаний ДГК θ_{\max} начинает резко увеличиваться относительно амплитуды колебаний антенной системы (рис. 9, г).

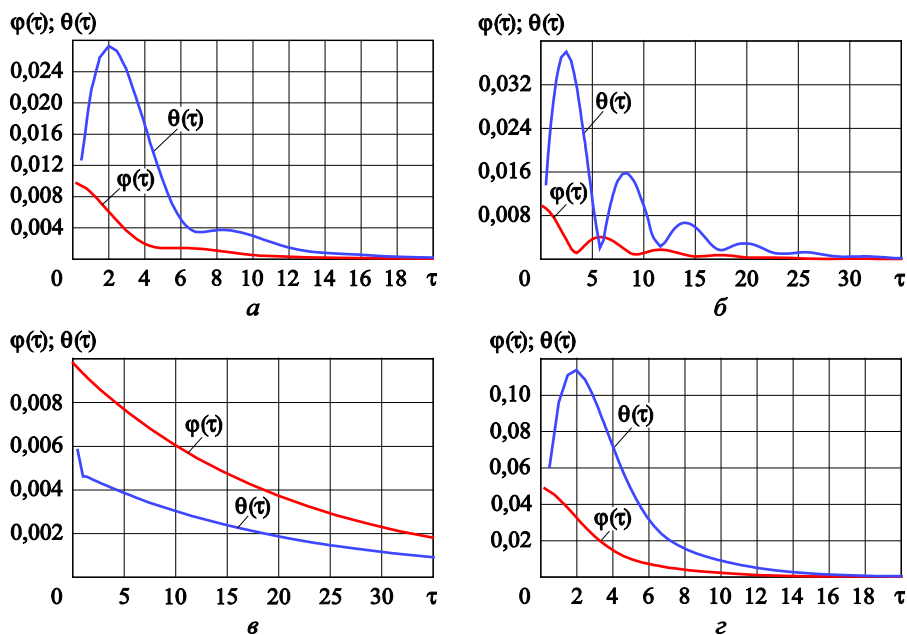


Рис. 9. Огибающие амплитуд колебаний антенной системы $\varphi(\tau)$ и ДГК $\theta(\tau)$ при $\alpha = 0,75, \mu = 0,05$ и различных параметрах демпфирования и начального возмущения:

а — $\gamma = 0,55, \psi = 0,01$; б — $\gamma = 0,25, \psi = 0,01$;

в — $\gamma = 5, \psi = 0,01$; г — $\gamma = 0,75, \psi = 0,05$

Поскольку на реальном прототипе антенны КА положение точки крепления ДГК вследствие конструктивно-компоновочных ограничений зависит не только от положения равновесия, но и от максимальной амплитуды колебаний гасителя, было проанализировано влияние параметра демпфирования γ на реализуемую максимальную амплитуду колебаний ДГК при различных значениях коэффициента возмущения ψ . Результаты проведенного анализа представлены на рис. 10.

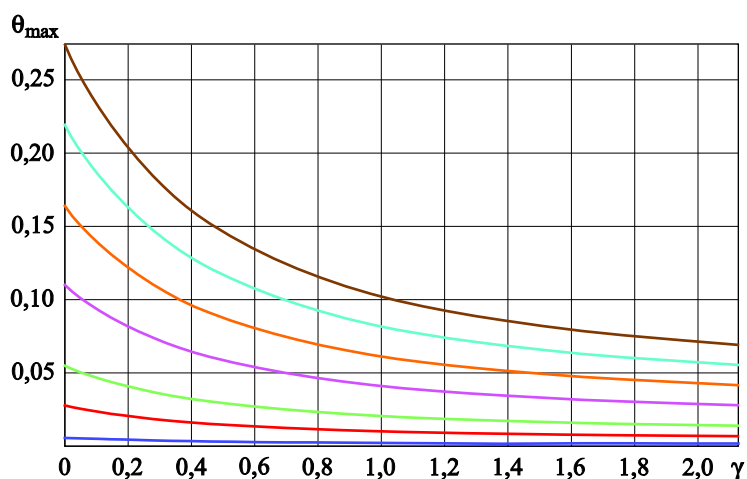


Рис. 10. Зависимость максимальной амплитуды колебаний динамического гасителя θ_{\max} от параметра демпфирования γ при различных значениях начального возмущения:
 $\psi = 0,001$ (—), $0,005$ (—), $0,01$ (—), $0,02$ (—),
 $0,03$ (—), $0,04$ (—), $0,05$ (—)

Критерием эффективности работы ДГК выбрано снижение максимальной амплитуды φ_{\max} колебаний маятника в 20 раз (см. рис. 8).

Зависимость времени затухания колебаний антенной системы $T_{\text{зат}}(\tau)$ от значения параметра демпфирования γ представлена на рис. 11.

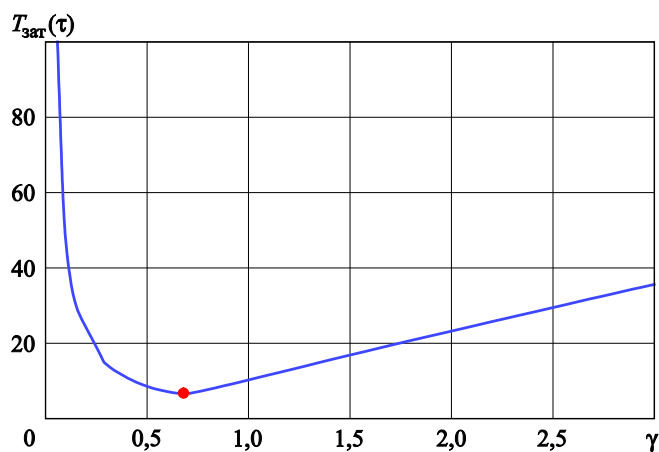


Рис. 11. Зависимость времени затухания колебаний системы $T_{\text{зат}}(\tau)$ от параметра демпфирования γ

Параметр начального возмущения ψ не влияет на время затухания колебаний $T_{\text{зат}}(\tau)$, так же как и на период биений $T_0(\tau)$. По этой причине приведенная на рис. 11 зависимость отражает влияние параметра демпфирования γ на время затухания колебаний $T_{\text{зат}}(\tau)$ при любом значении параметра начального возбуждения ψ . Красная точка на рис. 11 соответствует сочетанию параметров, при котором в системе исчезает второй период биений (см. рис. 9, а).

По результатам проведенного анализа были определены диапазоны значений параметров начального возмущения и демпфирования, при которых ДГК орторадиального типа эффективно гасит колебания маятника при достаточно низких значениях максимальной амплитуды колебаний гасителя: $0 < \psi \leq 0,01$; $0,65 \leq \gamma \leq 0,85$.

В целом по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Удобство применения орторадиального ДГК заключается в том, что за счет возникающих биений происходит передача энергии от упруго закрепленной антенной системы с малой диссипацией к ДГК с более сильными диссипативными свойствами.

2. Для обеспечения резонансного режима масса ДГК должна быть много меньше массы рефлектора. Эта особенность ДГК особенно важна для применения на КА, поскольку позволяет минимизировать массу конструкции и использовать ДГК вместо балансировочных грузов.

3. При оптимальном значении времени затухания конструкция мало чувствительна к изменению параметров, что делает такой гаситель грубой системой.

4. Особенностью работы антенной системы с установленными ДГК при оптимальном сочетании параметров является кратковременное возникновение больших амплитуд колебаний ДГК в начале переходного режима. Эти амплитуды могут в несколько раз превосходить амплитуды колебаний антенной системы. По этой причине ДГК данного типа целесообразно использовать при довольно низких уровнях начального возмущения.

5. Все описанные свойства орторадиального гасителя хорошо согласуются с известными ранее полученными результатами, например с данными, приведенными в работе [16].

Статья поддержана грантом РФФИ №17-08-01468а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Raab A. *Deployable double-membrane surface antenna*. Patent US 5777582 A.07.07.1998. URL: <https://www.google.si/patents/US5777582> (дата обращения 01.06.2018).
- [2] 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, с. 179–191. DOI: 10.7463/1014.0728802
- [3] Пономарев С.В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2011, № 4, с. 109–119.
- [4] Гряник М.В., Ломан В.И. *Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа*. Москва, Радио и связь, 1987, 72 с.
- [5] Тестоедов Н.А., Халиманович В.И., Величко А.И., Леканов А.В., Шипилов Г.В., Романенко В.И., Токарев А.В., Акчурин В.П. *Зонтичная антенна космического аппарата*. Пат. № 2418346 Российская Федерация, опубл. 10.05.2011, бюл. № 13, 10 с.
- [6] Халиманович В.И., Величко А.И., Шипилов Г.В., Романенко А.В., Леканов А.В., Порпылев В.Г., Акчурин В.П. *Зонтичная антенна космического аппарата*. Пат. № 2370864 Российская Федерация, опубл. 20.10.2009, бюл. № 29, 7 с.
- [7] Тестоедов Н.А., Халиманович В.И., Шипилов Г.В., Романенко А.В., Шальков В.В., Величко А.И., Акчурин В.П. *Развертываемый крупногабаритный рефлектор космического аппарата*. Пат. № 2350519 Российская Федерация, опубл. 27.03.2009, бюл. № 9, 19 с.
- [8] 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/apertures/presentations/santiagoprowald.pdf> (дата обращения 01.06.2018).
- [9] Крылов А.В., Мешковский В.Е., Чурилин С.А. Численный анализ прочности и частот собственных колебаний модуля бортовой многолучевой антенны. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, спецвыпуск «Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения», 2010, с. 35–45.
- [10] Зимин В.Н. *Разработка методов анализа динамики и оценки работоспособности раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2008, 36 с.
- [11] Щеглов Г.А., Биюшкина Т.С. Анализ способов демпфирования колебаний крупногабаритных конструкций КА в магнитном поле Земли. *Аэрокосмический научный журнал*, 2016, № 2 (03), с. 11–25. DOI: 10.7463/aersp.0316.0841754
- [12] Коцур О.С., Хрупа С.К. Применение динамических гасителей для сокращения времени переходных процессов элементов КА. *Наука и образование*, 2017, № 5, с. 57–73. DOI: 10.7463/0517.0001135
- [13] 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-7-1779

- [14] Matsuhisa H., Tokkyokiki M. *Dynamic vibration absorber for pendulum type structure*, Пат. EP 0618380 A1, Япония, 1994.
- [15] Болотин В.В., ред. *Вибрации в технике. Т. 1. Колебания линейных систем*. Москва, Машиностроение, 1978, 352 с.
- [16] Корнев Б.Г., Резников Л.М. *Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения*. Москва, Наука, 1988, 304 с.

Статья поступила в редакцию 28.02.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Хрупа С.К., Тушев О.Н. Анализ возможности подавления крутильных колебаний антенны космического аппарата с помощью динамического гасителя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 4.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1866>

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

Тушев Олег Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kafsm2@bmstu.ru

Analysis of the possibility of suppressing spacecraft antenna torsional vibrations by means of dynamic absorber

© S.K. Khrupa, O.N. Tushev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper deals with dynamics of truss antenna systems with a dynamic absorber in the region of low-frequency natural torsional vibrations. The use of a dynamic absorber is due to the weak dissipative properties of the antenna system. Owing to the internal resonance, energy is transferred from the elastically fixed antenna system to the dynamic absorber, whose vibrations are damped quite simply. A theoretical study of the dynamic characteristics of the absorber was carried out on a simple linear model of a two-degree-of-freedom vibrating system. The equations of motion are integrated numerically. Findings of research show that the mass of the dynamic absorber is about 5% of the mass of the reflector, the absorber should be as far as possible relative to the axis of rotation of the system, and it can be used instead of balancing weights. The ranges of design parameters of the dynamic absorber and the levels of loads at which it operates efficiently are determined.

Keywords: spacecraft, dynamic absorber, vibration damping, antenna systems, vibrating system, two degrees of freedom

REFERENCES

- [1] Raab A. *Deployable double-membrane surface antenna*. Patent US 5777582 A.07.07.1998. Available at: <https://www.google.si/patents/US5777582> (accessed June 1, 2018).
- [2] Zimin V.N., Krylov A.V., Meshkovskiy V.E., Sdobnikov A.N., Fayzullin F.R., Churilin S.A. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2014, no. 10, pp. 179–191. DOI: 10.7463/1014.0728802
- [3] Ponomarev S.V. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika (Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics)*, 2011, no. 4, pp. 109–119.
- [4] Gryanik M.V., Loman V.I. *Razvertyvaemye zerkalnye anteny zontichnogo tipa [Umbrella type deployable mirror antennas]*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1987, 72 p.
- [5] Testoedov N.A., Khalimanovich V.I., Velichko A.I., Lekanov A.V., Shipilov G.V., Romanenko V.I., Tokarev A.V., Akchurin V.P. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata [Spacecraft umbrella-type antenna]*. Patent RF, no. 2418346, publ. May 10, 2011, bul. no 13, 10 p.
- [6] Khalimanovich V.I., Velichko A.I., Shipilov G.V., Romanenko A.V., Lekanov A.V., Porpylev V.G., Akchurin V.P. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata [Spacecraft umbrella-type antenna]*. Patent RF, no. 2370864, publ. October 20, 2009, bul. no. 29, 7 p.
- [7] Testoedov N.A., Khalimanovich V.I., Shipilov G.V., Romanenko V.I., Shalkov V.V., Velichko A.I., Akchurin V.P. *Razvertyvaemy krupnogabaritny reflektor kosmicheskogo apparata [Deployable large spacecraft reflector]*. Patent RF, no. 2350519, publ. March 27, 2009, bul. no. 9, 19 p.
- [8] 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/apertures/presentations/santiagoprowald.pdf> (accessed June 1, 2018).

- [9] Krylov A.V., Meshkovskiy V.E., Churilin S.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2010, spec. no. 1, pp. 35–45.
- [10] Zimin V.N. *Razrabotka metodov analiza dinamiki i otsenki rabotosposobnosti raskryvayushchikhsya krupnogabaritnykh kosmicheskikh konstruksiy fermennogo tipa*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Development of methods for analyzing the dynamics and assessment of performance of large truss-type deployed space structures. Dr. eng. sc. diss. abstr.]. Moscow, 2008, 36 p.
- [11] Scheglov G.A., Biyushkina T.S. *Aerokosmicheskij nauchny zhurnal — Aerospace Scientific Journal*, 2016, no. 2 (03), pp. 11–25. DOI: 10.7463/aersp.0316.0841754
- [12] Kotsur O.S., Khrupa S.K. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2017, no. 5, pp. 57–73. DOI: 10.7463/0517.0001135
- [13] Khrupa S.K., Scheglov G.A. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-7-1779
- [14] Matsuhisa H., Tokkyokiki M. *Dynamic vibration absorber for pendulum type structure*, Patent EP 0618380 A1, Japan, 1994.
- [15] Bolotin V.V., ed. *Vibratsii v tekhnike. Tom 1. Kolebaniya lineynykh system* [Vibrations in engineering. Vol. 1. Oscillations of linear systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 352 p.].
- [16] Korenev B.G., Reznikov L.M. *Dinamicheskie gasiteli kolebaniy. Teoriya i tekhnicheskie prilozheniya* [Dynamic vibration dampers. Theory and technical applications]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 304 p.

Khrupa S.K., Assist. Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow state Technical University. e-mail: khrupa.S.K@mail.ru

Tushev O.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow state Technical University. e-mail: kafsm2@bmstu.ru