

УДК 681.5:62-567

23

И. Х. ХАЙРУЛЛИН, Ф. Р. ИСМАГИЛОВ, Ю. И. ШАВАЛЕЕВА,
Д. М. ГИНИЯТУЛЛИН

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРАХ ПРИ СТЫКОВКЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены электромагнитные переходные процессы в малоинерционных магнитоэлектрических явиполосных демпферах с успокоительной обмоткой по продольной оси. Получены выражения для магнитных полей и плотностей токов по продольной и поперечной осям, а также для электромагнитного момента в переходном режиме. Рассчитаны зависимости относительного момента в переходном режиме при различных параметрах демпфера. *Стыковочный механизм; малоинерционный демпфер; переходные процессы; постоянные магниты*

Управляемые системой сближения и ориентации космические аппараты доводятся до касания со скоростью в пределах $0,1 \div 0,6$ метра в секунду, и с этого момента начинается процесс стыковки, завершающийся жестким соединением аппаратов [1].

Стыковочное устройство обеспечивает ряд операций и одна из важнейших — амортизация соударений аппаратов. Отечественные стыковочные механизмы проектируются как электромеханические, в силовых амортизаторах которых применяется электромеханическое демпфирование, что надежнее гидравлического демпфирования, применяемого в системах стыковки в США [1].

На рис. 1 представлен один из вариантов стыковочного механизма [1].

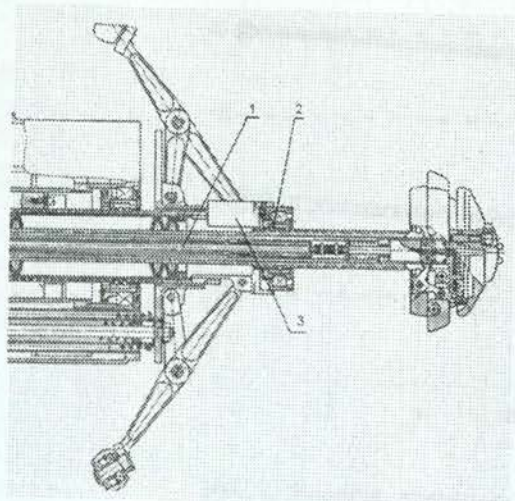


Рис. 1. Стыковочный механизм: 1 — штанга; 2 — шарико-винтовой преобразователь; 3 — демпфер

Этот стыковочный механизм является частью стыковочного агрегата. Штанга 1 стыковочного механизма выполнена в виде винта с шарико-винтовым преобразователем 2, преобразующим поступательное движение винта во вращательное движение гайки, и наоборот. Вращающаяся гайка посредством мультипликатора со встроенной обгонной муфтой вращает ротор малоинерционного демпфера 3. При соударении космических аппаратов ротор 1 демпфера (рис. 2), вращающийся в магнитном поле постоянных магнитов 3, за доли миллисекунд разгоняется до скорости вращения порядка 10^4 об/мин [1].

Происходит интенсивное торможение и гашение кинетической энергии, которая выделяется в виде тепла в полом роторе, выполненном из алюминия в тонкостенной стаканообразной форме, позволяющей получить минимальный момент инерции.

Таким образом демпфер амортизатора работает в переходном режиме.

В данной работе рассматриваются электромагнитные переходные процессы в магнитоэлектрическом демпфере с успокоительной обмоткой 2 по продольной оси при мгновенном разгоне ротора до максимальной скорости вращения при следующих допущениях:

- 1) немагнитный зазор существенно меньше радиуса кривизны, что позволяет решать задачу в декартовой системе координат;
- 2) магнитная проницаемость постоянных магнитов в переходных и установившихся режимах не меняется и во всем объеме одинакова;

3) электрическая проводимость постоянных магнитов равна нулю;

4) магнитное поле вне торцов постоянных магнитов отсутствует;

5) существуют только основные гармоники магнитного поля и токов в демпфере;

6) магнитная проницаемость материала ротора и успокоительной обмотки равны магнитной проницаемости вакуума μ_0 ;

7) электрическая проводимость материалов ротора и успокоительной обмотки во время переходных процессов остается неизменной. Влияние допущений может быть учтено дополнительной коррекцией результатов решения.

Например, высшие гармоники учитываются введением коэффициента высших гармоник, поперечные краевые явления учитываются приближенно с помощью коэффициента уменьшения электрической проводимости k_{σ} , и расчетная электрическая проводимость σ_1 ротора принимается равной $\sigma_1 = \sigma k_{\sigma}$, где σ — электрическая проводимость материала ротора, $k_{\sigma} < 1$ — коэффициент уменьшения электрической проводимости, зависящий от геометрии полого ротора [3, 4].

Устройство демпфера представлено на рис. 2.

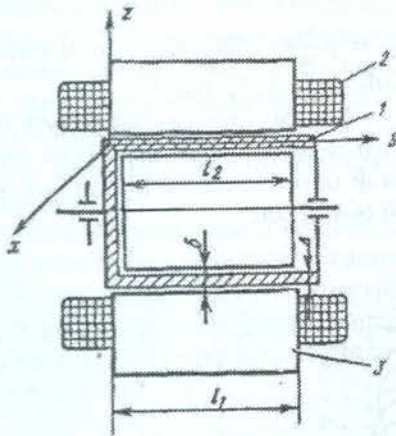


Рис. 2. Малоинерционный демпфер: 1 — ротор; 2 — успокоительная обмотка; 3 — постоянные магниты

С учетом результатов исследований [5] уравнения электромагнитного поля и поля успокоительной обмотки могут быть представлены в виде:

$$\frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} - \sigma_1 \frac{\partial B_{ya}}{\partial t} - \sigma_1 \frac{\partial B_2}{\partial t} - \sigma_1 \nu \frac{\partial B_{ya}}{\partial x} - \sigma_1 \nu \frac{\partial B_{10}}{\partial x} = 0,$$

$$0 = i_{yd} r_{yd} + \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} \frac{\partial}{\partial t} (k_{\sigma y} B_{ya} + B_2), \quad (1)$$

где B_2 и H_2 — составляющие магнитной индукции и напряженности магнитного поля ротора, B_{10} — индукция магнитного поля постоянных магнитов, B_{ya} — магнитная индукция, обусловленная аperiodическим током успокоительной обмотки, ν — линейная скорость ротора, i_{yd} — аperiodический ток успокоительной обмотки, $k_{\sigma y}$ — коэффициент рассеяния успокоительной обмотки, B_{2d} — магнитное поле ротора по продольной оси, r_{yd} — сопротивление успокоительной обмотки, W_y — число витков успокоительной обмотки (для короткозамкнутой $W_y = 1$), τ — полюсное деление $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, D — средний диаметр ротора, p — число пар полюсов, l_{δ} — расчетная длина ротора, $l_{\delta} = \frac{l_1}{2}$ (рис. 2).

С учетом допущения 5 первичные магнитные поля можно представить меняющимися вдоль оси X по гармоническому закону, перейти к комплексной форме [5] и записать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{B}_1 &= \dot{B}_{10m} e^{j\alpha x}, \quad \dot{H}_2 = \dot{H}_{2m} e^{j\alpha x}, \\ \dot{B}_2 &= \dot{B}_{2m} e^{j\alpha x}, \end{aligned}$$

где $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$.

Применением метода двух реакций [6] все электромагнитные величины раскладываются по продольной оси d (вдоль оси полюса) и поперечной q (сдвинутой относительно оси d на 90 эл. градусов).

$$\begin{aligned} \dot{H}_{2m} &= \dot{H}_{dm} + j \dot{H}_{qm} \\ \dot{B}_{2m} &= \dot{B}_{dm} + j \dot{B}_{qm} \end{aligned} \quad (2)$$

Система уравнений (1) после преобразований перехода к операторной форме приводится к виду:

$$\begin{aligned} \alpha^2 (H_{dm} + j H_{qm}) + \sigma_1 \omega (p_{\omega} + j) B_{yam} + \\ + j \sigma_1 \omega (p_{\omega} + j) (B_{dm} + j B_{qm}) + j \sigma_1 \omega B_{10m} = 0; \\ i_{ya} r_{yd} + \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} \omega p_{\omega} (k_{\sigma y} B_{ym} + B_{dm}) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $p_{\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{d}{dt}$ — оператор Лапласа в безразмерной форме;

$$B_{ym} = i_{ya} \omega \frac{\mu_0}{\delta k_{\mu d}} k_{fy}, \quad (4)$$

где k_{fy} — коэффициент формы поля успокоительной обмотки, $k_{\mu d}$ — коэффициент приведения магнитной системы по продольной оси, δ — воздушный зазор.

$$B_{dm} = \mu_0 k_d H_{dm}, \quad B_{qm} = \mu_0 k_q H_{qm},$$

где k_d и k_q — коэффициенты приведения по продольной и поперечной осям.

С учетом (4) из второго уравнения системы (3) можно найти связь между B_{ym} и B_{dm} :

$$B_{ym} = -\frac{\tau_{0y} p_{\omega} B_{dm}}{1 + p_{\omega} \tau_y}, \quad (5)$$

$$\text{где } \tau_y = k_{\sigma y} \tau_{0y}, \tau_{0y} = \frac{2\omega \mu_0 k_{fy} l_{\delta}}{\pi \delta k_{\mu d}} \cdot \frac{1}{r_{yd}}.$$

Решая систему уравнений (3) относительно B_{dm} и B_{qm} , можно получить их изображения:

$$\dot{B}_{dm} = -B_{10m} \cdot \frac{1 + p_{\omega} \tau_y}{(\tau_y - \tau_{y0}) \varphi(p_{\omega})}; \quad (6)$$

$$\dot{B}_{qm} = -B_{10m} \frac{1 + \varepsilon_1 p_{\omega}^2 (\tau_y - \tau_{y0}) + p_{\omega} (\tau_y - \tau_{y0})}{\varepsilon_1 k (\tau_y - \tau_{y0}) \varphi(p_{\omega})}; \quad (7)$$

$$\dot{B}_{dp}(t) = B_{10m} \left[1 - \frac{1 + p_{\omega} (\tau_y - \tau_{y0})}{(\tau_y - \tau_{y0}) \varphi(p_{\omega})} \right], \quad (8)$$

где

$$\varphi(p_{\omega}) = p_{\omega}^3 + p_{\omega}^2 \frac{k \tau_{\omega} + \varepsilon_1 k + \tau_y - \tau_{y0}}{\varepsilon_1 k (\tau_y - \tau_{y0})} + p_{\omega} \frac{k \varepsilon_1 + \tau_y + \varepsilon_1^2 k (\tau_y - \tau_{y0})}{\varepsilon_1^2 k (\tau_y - \tau_{y0})} + \frac{1 + \varepsilon_1^2 k}{\varepsilon_1^2 k (\tau_y - \tau_{y0})},$$

$\varepsilon_1 = \frac{\mu_0 \sigma k_{\sigma} \omega}{\alpha^2} k_d$ — магнитное число Рейнольдса, $k = \frac{k_q}{k_d}$ — коэффициент, учитывающий явно-полнотность.

Изображение плотности токов по продольной и поперечной осям: $\delta_{dm} = -j\alpha H_{dm}$, $\delta_{qm} = -j\alpha H_{qm}$.

Выполнив обратные преобразования Лапласа, можно получить:

$$B_{dm}(t) = -B_{10m} \left[\frac{\varepsilon_1^2 k}{1 + \varepsilon_1^2 k} + \sum_{p_{\omega 1}} \frac{1 + p_{\omega k} \tau_y}{p_{\omega k} (\tau_0 - \tau_{y0}) \psi(p_{\omega k}, \varepsilon_1 \dots)} \cdot e^{p_{\omega k} t} \right]$$

$$B_{qm}(t) = -B_{10m} \left[\frac{\varepsilon_1}{1 + \varepsilon_1^2 k} + \frac{1}{\varepsilon_1 k (\tau_0 - \tau_{y0})} \times \sum_{p_{\omega 1}} \frac{(\varepsilon_1 p_{\omega k}^2 (\tau_0 - \tau_{y0}) + p_{\omega k} (\tau_0 - \tau_{y0}) + 1)}{p_{\omega k} \psi(p_{\omega k}, \varepsilon_1 \dots)} e^{p_{\omega k} t} \right]$$

$$\dot{B}_{dp}(t) = B_{10m} \left[\frac{1}{1 + \varepsilon_1^2 k} - \sum_{p_{\omega 1}} \frac{1 + p_{\omega k} (\tau_y - \tau_{y0})}{p_{\omega k} (\tau_y - \tau_{y0}) \psi(p_{\omega k}, \varepsilon_1 \dots)} e^{p_{\omega k} t} \right], \quad (9)$$

где $p_{\omega k}$ — корни характеристического уравнения

$$p_{\omega}^3 + p_{\omega}^2 a + p_{\omega} b + c = 0,$$

$$\psi(p_{\omega k}, \varepsilon_1 \dots) = 3p_{\omega}^2 + 2p_{\omega}^a + b,$$

$$a = \frac{\varepsilon_1 k + k \tau_y + \tau_y - \tau_{y0}}{\varepsilon_1 k (\tau_y - \tau_{y0})},$$

$$b = \frac{\varepsilon_1 k + \varepsilon_1 + \tau_y + \varepsilon_1^2 k (\tau_y - \tau_{y0})}{\varepsilon_1^2 k (\tau_y - \tau_{y0})},$$

$$c = \frac{1 + \varepsilon_1^2 k}{\varepsilon_1^2 k (\tau_y - \tau_{y0})}.$$

Используя полученные соотношения, электромагнитный момент в переходном режиме определяется в виде:

$$M = \frac{\pi D^2}{4} l_{\delta} [B_{dp}(t) \delta_{qm}(t) - B_{qm}(t) \delta_{dm}(t)], \quad (10)$$

которое может быть представлено в виде:

$$M = M_{\max} \cdot m_j(t),$$

где $M_{\max} = p \frac{B_{10m}^2}{\mu_0 k_d} \pi D l_{\delta}$, m_j — относительный момент, $m_j = f(\varepsilon_1, \tau_y, \tau_{y0}, k)$

На рис. 3 представлены зависимости относительного момента для демпфера без успокоительной обмотки, а на рис. 4 — с успокоительной обмоткой.

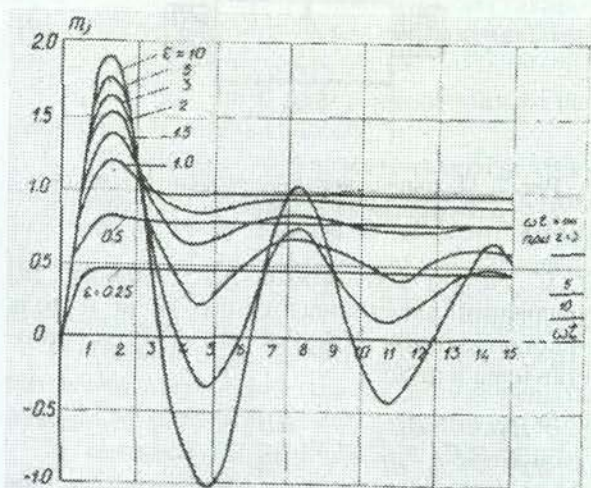


Рис. 3. График зависимости кривой относительного момента от времени в безразмерной форме при различных значениях ε

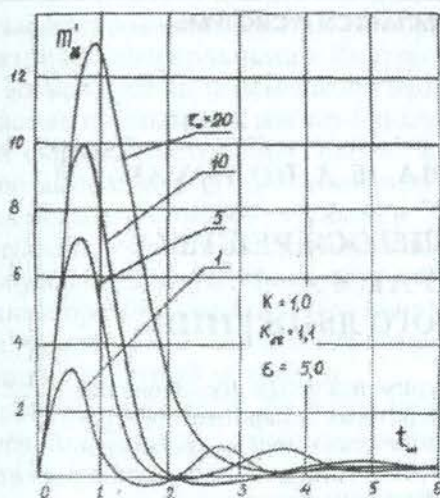


Рис. 4. График зависимости кривой относительного момента от времени в безразмерной форме при различных значениях τ

Анализ этих и ряда других аналогичных кривых для различных ε_1 , τ_y , $k_{\sigma y}$, k показывает, что с ростом τ_y , например, за счет уменьшения сопротивления успокоительной обмотки, максимум момента растет и может превосходить максимальный момент в установившемся режиме на порядок и более с одновременным увеличением продолжительности действия. Ограничение максимального момента в переходном режиме получается при увеличении сопротивления успокоительной обмотки, но даже при ее отсутствии наибольший момент превосходит максимальный в установившемся режиме при $\varepsilon_1 = 1,5 \div 2$ и более в $(1,4 \div 1,8)$ раза, что должно учитываться при проектировании.

Полученные результаты совпадают с расчетными и экспериментальными данными работы [5] при одинаковых параметрах демпферов, и это позволяет считать возможным использование полученных соотношений при проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыромятников, В. С. Стыковочные устройства космических аппаратов / В. С. Сыромятников. М.: Машиностроение, 1984. 215 с.
2. Сыромятников, В. С. Магнитоэлектрическое демпфирование в амортизаторах стыковочных механизмов / В. С. Сыромятников, И. Х. Хайруллин // Космические исследования. 1977. № 4. С. 554–558
3. Хайруллин, И. Х. Теоретическое и экспериментальное исследование малоинерционных тормозов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Х. Хайруллин. М.: МЭИ, 1970. 16 с.

4. Кирюхин, В. М. Аналитическое определение интегральных параметров тонкостенных немагнитных экранов электрических машин / В. М. Кирюхин // Электричество. 1973. № 9.
5. Хайруллин, И. Х. Электромагнитные переходные процессы в малоинерционных явнополюсных тормозах и уфтах / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов // Электричество. 1998. № 5.
6. Хайруллин, И. Х. Исследование электромагнитных демпфирующих элементов систем управления: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа: УАИ, 1979. 21 с.

ОБ АВТОРАХ



Хайруллин Ирек Ханифович, проф. каф. электромех. Дипл. инж.-электромех. (Ивановск. энергет. ин-т, 1963) Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УАИ, 1981). Иссл. в обл. электромех. преобр. энергии.



Исмагилов Флюор Рашитович, проф., проректор, зав. каф. электромеханики. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.



Шавалеева Юлия Ирековна, асп. той же каф. Дипл. экон. по информ. системам. Готовит дис. по информ. системам для проектирования электромех. систем.



Гиниятуллин Денис Мухаметович, магистрант фак-та авиац. приборостроения. Дипл. бакалавр по электромех. и электротехнол. (УГАТУ, 2007).