

5. PHILIPS SEMICONDUCTOR. Preliminary specification, SECAM encoder TDA8505, July 1994.
6. MOTOROLA SEMICONDUCTOR. Application Note of the MC 1377 color encoder (AN932).

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА УТЕЧКИ ВОЗДУХА ИЗ МОДУЛЕЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Бобин Д.Г.

Длительное существование на околоземной орбите обитаемых космических станций требует обеспечения их высокой надежности. Возрастающее количество космического мусора, наличие метеорных потоков, а также наличие у станций большой площади поверхности увеличивает вероятность их разгерметизации. В данной работе предлагается метод автоматического определения места утечки в реальном режиме времени, основанный на использовании сигналов с бортовой системы ориентации или специальных датчиков микроускорений.

Рассмотрим модель процесса разгерметизации. После пробоя обшивки космического аппарата (КА) появляется струя воздуха, истекающая из отверстия. Зная изменение давления во времени, можно вычислить диаметр отверстия [1]:

$$d = \sqrt[3]{\ln\left(\frac{p_0 - p_{\text{вых}}}{p - p_{\text{вых}}}\right) \frac{Mv}{RT} \frac{4V_{\text{ср}}}{\pi\tau}} L, \quad (1)$$

где p - давление газа в системе; p_0 - начальное давление; $p_{\text{вых}}$ - давление на выходе канала; L - длина канала; τ - время, прошедшее после пробоя; v - объем системы; R - универсальная газовая постоянная, $R=8.314$ Дж/моль·К; T - абсолютная температура; M - молярная масса газа; $V_{\text{ср}} = \sqrt{8RT/\pi M}$ - средняя арифметическая скорость молекул в газе [1].

Зная размер отверстия можно найти массу воздуха, истекающего в единицу времени [1]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{M}{RT} G_{01} S (p - p_{\text{вых}}), \quad (2)$$

где G_{01} - удельная проводимость отверстия, S - его площадь. При нормальных условиях, размерах отверстий порядка нескольких миллиметров и отношения давлений $p_{\text{вых}}/p \ll 0.53$ значение G_{01} принимается равным 200 м/с [1]. Скорость потока воздуха определяется выражением

$$V = G_{01} \frac{(p - p_{\text{вых}})}{p}. \quad (3)$$

Теперь перейдем к определению места пробоя. Все расчеты представим для простейшего случая - КА цилиндрической формы. При пробое обшивки КА из образовавшегося отверстия начинает исходить со скоростью \vec{V} воздух, создавая реактивную силу \vec{F} , которая изменяет угловое положение КА, его линейную и угловую скорости. По закону сохранения импульса:

$$\vec{F} dt = -\vec{V} dm. \quad (4)$$

Реактивная сила \vec{F} приводит к появлению углового ускорения КА, которое можно найти из формулы (5) [2]:

$$J \vec{\varepsilon} = [\vec{R}, \vec{F}], \quad (5)$$

где $\vec{\varepsilon}$ - вектор углового ускорения, \vec{R} - радиус-вектор отверстия, J - матрица моментов инерции $J = \begin{pmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{pmatrix}$, а $[\vec{R}, \vec{F}]$ - векторное произведение \vec{F} и \vec{R} .

Так как диаметр отверстия соизмерим с толщиной стенок обшивки, то можно сделать допущение, что вектор скорости истекающего воздуха перпендикулярен обшивке КА. В этом случае возможны два случая: течь возникает в боковой стенке и течь в торце КА. В первом случае вектор \vec{V}_1 лежит в плоскости YZ и проекция $V_{1X}=0$. Для второго случая справедливо равенство $V_{2Y}=V_{2Z}=0$.

На реальном КА положение центра масс зависит от перемещений людей, аппаратуры, и т.д. Поэтому центр масс будет смещен относительно центра аппарата на некоторую величину $d\vec{R}$, которая будет меняться с течением времени. Из рисунка 1 можно видеть, что в уравнении (5) необходимо заменить \vec{R} на $\vec{R} - d\vec{R}$.

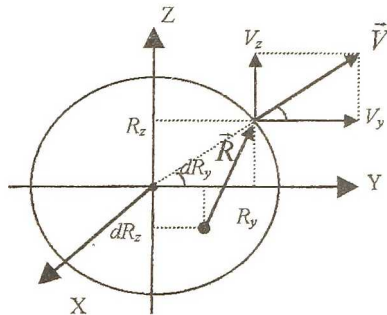


Рис. 1

Для дальнейших расчетов нам понадобятся некоторые из проекций уравнения (5) на оси координат. Для первого случая:

$$\begin{cases} \varepsilon_y = \frac{(R_x - dR_x)V_z}{J_y} \cdot \frac{dm}{dt} \\ \varepsilon_z = -\frac{(R_x - dR_x)V_y}{J_z} \cdot \frac{dm}{dt} \end{cases}, \quad (6a)$$

для второго случая:

$$\begin{cases} \varepsilon_y = -\frac{(R_z - dR_z)V_x}{J_y} \cdot \frac{dm}{dt} \\ \varepsilon_z = \frac{(R_y - dR_y)V_x}{J_z} \cdot \frac{dm}{dt} \end{cases}, \quad (6b)$$

Рассмотрим первый случай: частица пробивает боковую стенку КА. Из рис. 1 можно видеть, что $R_z/V_z = R_y/V_y = R/V$. Отсюда получаем следующую систему:

$$\begin{cases} R_y = \frac{RV_y}{V} \\ R_z = \frac{RV_z}{V} \end{cases}. \quad (7)$$

Далее из уравнений системы (6a) выделим $R_x - dR_x$

$$R_x - dR_x = -\frac{\varepsilon_y J_y}{V_z} \frac{dm}{dt} = \frac{\varepsilon_z J_z}{V_y} \frac{dm}{dt}, \quad (8)$$

отсюда получаем

$$V_z = -\frac{\varepsilon_y J_y}{\varepsilon_z J_z} V_y. \quad (9)$$

А поскольку $V_x=0$, то $V_y^2 + V_z^2 = V^2$, и, используя (9), можно найти:

$$\begin{cases} V_y = \frac{\varepsilon_z J_z}{\pm \sqrt{(\varepsilon_y J_y)^2 + (\varepsilon_z J_z)^2}} V \\ V_z = -\frac{\varepsilon_y J_y}{\pm \sqrt{(\varepsilon_y J_y)^2 + (\varepsilon_z J_z)^2}} V \end{cases}. \quad (10)$$

Положение отверстия рассчитывается по формулам (7) для R_y и R_z , а R_x определяется из (8).

Рассмотрим второй случай. Из (66) найдем R_y и R_z , учитывая, что величина V_x и ее направление совпадают с модулем и направлением вектора скорости V :

$$R_x = R_{x\max}; \quad R_y = \frac{J_z \varepsilon_z}{V_x \frac{dm}{dt}} + dR_y; \quad R_z = -\frac{J_y \varepsilon_y}{V_x \frac{dm}{dt}} + dR_z. \quad (11)$$

Величина $R_{x\max}$ равна половине длины КА.

Различить первый и второй варианты пробоя можно, измеряя проекции линейного ускорения на оси координат.

С помощью несложных геометрических выкладок можно найти, что проекция линейного ускорения на ось Ox при пробое боковой стенки меняется в зависимости от расположения отверстия в пределах

$$\left[0, \frac{1}{2} \frac{V}{m_{ка}} \frac{dm}{dt} \right] \quad (\text{это справедливо для КА, обладающего диаметром меньшим, чем длина}). \quad \text{При пробое с торца проекция ускорения лежит в пределах} \left[\frac{V}{m_{ка}} \frac{dm}{dt} \frac{L^2}{L^2 + 4R_{ка}^2}, \frac{V}{m_{ка}} \frac{dm}{dt} \right]. \quad \text{Если диаметр КА меньше его длины,}$$

то выполняется условие $\frac{L^2}{L^2 + 4R_{ка}^2} > \frac{1}{2}$ и пределы изменения a_{x1} и a_{x2} не перекрываются.

Таким образом, при выполнении условия $L > 2R_{ка}$ определить вариант пробоя можно из условия:

$$\begin{cases} 0 \leq a_x \leq \frac{1}{2} \frac{V}{m_{ка}} \frac{dm}{dt} & - \text{случай 1,} \\ \frac{V}{m_{ка}} \frac{dm}{dt} \frac{L^2}{L^2 + 4R_{ка}^2} \leq a_x \leq \frac{V}{m_{ка}} \frac{dm}{dt} & - \text{случай 2.} \end{cases} \quad (12)$$

Теперь опишем алгоритм нахождения места пробоя. Сначала рассчитывается диаметр отверстия и, с помощью формул (2) и (3), находится скорость истечения и масса истекающего воздуха. После этого с датчиков снимается информация о линейных и угловых ускорениях, зависимость которых от положения отверстия приведена на рисунке 2.

Расчеты производились для следующих параметров КА: диаметр - 5 м, длина - 10 м, масса - 10 т, давление внутри аппарата - 100 кПа, давление снаружи - 0 Па, толщина обшивки КА - 2 мм. При заданных массогабаритных показателях КА имеет следующие моменты инерции: $J_x = 31250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_y = J_z = 83333 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Затем определяется вариант пробоя из условия (12). И, используя сигналы с датчиков углового ускорения, вычисляются координаты области возможного расположения отверстия, размеры которой зависят от смещения центра тяжести.

Достоинством системы является возможность определения места пробоя в реальном масштабе времени без выхода в открытое космическое пространство, что существенно снижает время и трудоемкость ремонтных работ.

Основным недостатком этой системы является то, что существует зона положения отверстия, в которой невозможно определить его координаты. Это связано с тем, что величина углового ускорения зависит от расстояния от отверстия до центра масс, и чем меньше это расстояние, тем меньше угловое ускорение.

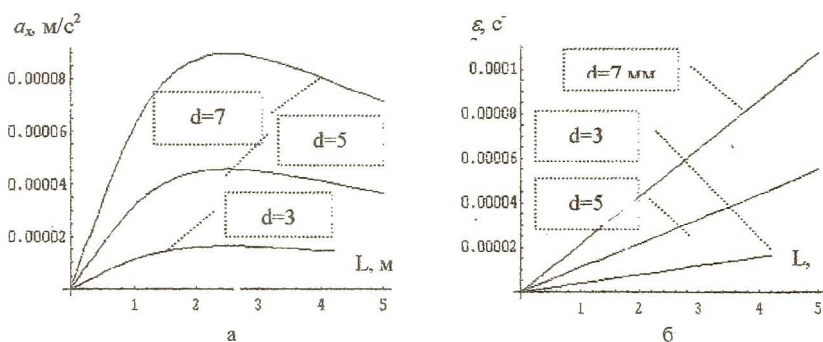


Рис. 2. Зависимость проекции линейного ускорения (а) на ось ОХ и углового ускорения (б) от расстояния между местом пробоя и осью КА при пробое

Если форма КА будет отличаться от цилиндрической, то это приведет к увеличению числа возможных вариантов пробоя, следствием чего может стать появление нескольких мест вероятного нахождения отверстия. Усложнение формы КА не приводит к повышению погрешности вычисления места течи, однако, может привести к снижению чувствительности метода из-за увеличения момента инерции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1975. 622 с.
2. Ориентация искусственных спутников в гравитационных и магнитных полях/ В.И. Боевкий, Ю.Г. Гуревич, Ю.Н. Павлов, Г.И. Толстоусов. М.: Наука, 1976. 303 с.