

УДК 621.45.01+533.9.07

Г.К. БАХМЕТ, А.В. ЛОЯН, О.П. РЫБАЛОВ, В.А. ФЕДОТЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ МАЯТНИКОВЫМ ТЯГОМЕРОМ

Рассмотрен тягомер маятникового типа, использующий для измерения малых тяг метод уравнивания. Приведена оценка погрешности определения тяги, которая представлена как сумма погрешности чувствительности индикатора нуля, тарировки, погрешности измерения силы тока магнитной катушки, компенсирующей отклонение рычага тягомера под действием силы тяги двигателя. Сделан вывод о значении погрешности тягомера двигателей малых тяг.

**абсолютная погрешность, гаситель колебаний, двигатель, двигатель малых тяг, маятниковый тип, относительная погрешность, тарировка, тяга, тягомер**

#### Введение

Важной проблемой при проектировании космического аппарата на базе стационарного плазменного двигателя (СПД) является оптимальный выбор двигательной установки. Основными показателями эффективности СПД являются тяговый к.п.д. и цена тяги, определяемые через значение тяги двигателя. Теоретический подсчет значения тяги связан со знанием расхода, скорости и плотности рабочего тела и ионов на срезе сопла. Это величины расчетные, зависящие от модельных представлений, и их значение отличается от действительных. В реальных условиях существуют представления, не учитываемые в физической модели (разброс тяги, угловое отклонение вектора тяги и т.д.). Поэтому определение экспериментальным путем тяги двигателя является важной задачей на этапе конструирования, отладки и повышения эффективности СПД. В настоящее время разработаны в основном тягомеры для СПД повышенных тяг. Тягомеры для двигателей малых тяг отсутствуют. Отсутствуют обоснования точности измерения тяги тягомерами, что значительно усложняет их использование при исследовании работы СПД.

#### Тягоизмерительное устройство для двигателей малых тяг

Разработанный в учебной лаборатории ХАИ тягомер маятникового типа для двигателей малых тяг

(0,2Г), представленный на схеме (рис. 1), состоит из призматической подвески (А), рычага (Р) длиной 2000 мм., магнитного узла (М), закрепленного на рычаге двигателя (Дв), тарировочного узла (Т), компенсатора (К), гасителя колебаний (Г), индикатора нуля.

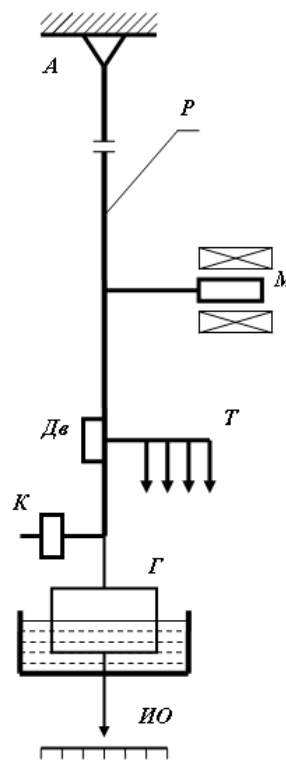


Рис. 1. Тягомер маятникового типа для двигателей малых тяг

Особенности такого тягомера:

- 1) для измерения тяги двигателя использовался метод уравнивания, когда тяга двигателя как неизвестная величина приводилась к равенству с из-

вестной величиной – силой сердечника магнитной катушки (М); это равенство контролировалось индикатором нуля;

2) сила сердечника магнитной катушки определялась посредством тарировки (Т), когда тарировочные грузы были эквивалентны значению величин тяг;

3) для установки нуля перед измерением использовалось компенсирующее устройство (К), создающее необходимый для этого момент силы;

4) в тягомере использовался гаситель колебаний (Г), который представлял собой тонкую пластину площадью 80 кв.см. помещенную в ванночку с вакуумным маслом.

Для тягомера были сделаны предварительные оценочные расчеты возникающих при нагружении элементов тягомера моментов и усилий, реакции опор конструкции [1, 2].

### Погрешность тяги двигателя

Абсолютная погрешность тяги двигателя была представлена в виде:

$$\Delta F = \Delta F_0 + \Delta F_T + \Delta F_M + \Delta F_{\text{дон}},$$

где  $\Delta F_0$  – погрешность индикатора нуля;  $\Delta F_T$  – погрешность тарировочного устройства;  $\Delta F_M$  – погрешность измерения силы тока магнитной катушки, компенсирующей отклонение рычага тягомера под действием силы тяги двигателя;  $\Delta F_{\text{дон}}$  – неучитываемые погрешности (температура, давление и т.д.). Приведенную запись можно представить через относительные погрешности:

$$\frac{\Delta F}{F_\delta} = \frac{\Delta F_0}{F_\delta} + \frac{\Delta F_T}{F_\delta} + \frac{\Delta F_M}{F_\delta} + \frac{\Delta F_{\text{дон}}}{F_\delta};$$

$$\delta F = \delta F_0 + \delta F_T + \delta F_M + \delta F_{\text{дон}}.$$

### Погрешность чувствительности индикатора нуля

Погрешность нечувствительности нуля может быть представлена в виде  $\delta F_0 = \frac{\Omega_0}{x}$ , где  $\Omega_0$  – пре-

дельная чувствительность индикатора смещения нуля, равная в нашем случае чувствительности мерной линейки,  $\Omega_0 = 7 \text{ мкм} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , а  $x$  – чувствительность тягомера как маятника.

Для определения  $x$  рассмотрим равновесие моментов действующих на рычаг тягомера в случае его отклонения на угол  $\alpha$ . В случае равновесия системы запись действующих моментов имеет вид

$$-F_M L_M + F_\delta L_p - \left( \frac{G_p}{2} + G_\delta \right) L_p \sin \alpha = 0,$$

где  $F_M$  – сила магнита;  $L_M$  – плечо магнита;  $F_\delta$  – тяга двигателя;  $L_p$  – длина рычага;  $G_\delta$  – вес двигателя;  $G_p$  – вес рычага;  $\sin \alpha = \frac{x_M}{L_p}$ .

Если представить:  $F_\delta = F_\delta^* + \Delta F_{\text{до}}$ , где  $F_\delta^*$  – значение тяги, которое компенсируется силами магнита ( $F_M \cdot L_M = F_\delta^* \cdot L_p$ ), а  $\Delta F_{\text{до}}$  – значение тяги, на которое ноль не реагирует, то можно записать

$$\delta F_o = \frac{\Delta F_{\text{до}}}{F_\delta}.$$

Приведенные рассуждения с учетом линейных размеров устройства позволили оценить относительную погрешность установки нуля в виде выражения

$$\delta F_o = \sqrt{\frac{\Omega \cdot (G_p + 2 \cdot G_\delta)}{2 \cdot F_\delta \cdot L_p} \cdot \left( \frac{L_p}{L_p + l_n} \right)},$$

где  $l_n$  – расстояние от рычага до индикатора нуля.

Для приведенной конструкции было получено, что относительная погрешность установки нуля равна

$$\delta F_o = \frac{0,00374}{\sqrt{F_\delta}}.$$

Для тяги двигателя 0,2 Г или  $F_\delta = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ н}$ , получим  $\delta F_o = 0,084 \approx 0,08$ .

### Погрешность тяги, определяемая тарировкой

Для тарировки в тягомере использовалось 4 груза с весами в интервале от 1 до 5 грамм, распо-

ложенных на выбранных длинах плеч. Момент тарировки представлял собой поочередное удаление весов  $G_1, G_2, G_3, G_4$  с рычага устройства тарировки (Т).

В этом случае нарушение равновесия из-за уменьшения моментов тарировочного устройства приводило к перемещению рычага тягомера на некоторый угол. Для компенсации этого отклонения включался электромагнит, и регулированием его силы тока создавалось усилие перемещения магнитного сердечника, приводящее к установке рычага в нулевое положение.

Снятие груза было эквивалентно значению определенной величины тяги. При этом, снятие грузов можно было выполнять по очереди по одному грузу, или комбинировано, что позволяло подобрать необходимые числовой ряд значений тяг.

Был рассмотрен набор схем тарировки, позволивший оценить эквивалентные грузам тяги двигателя и расчетные погрешности этих тяг.

Например, при снятии первого груза  $G_1$ , эквивалентность моментов  $L_p \cdot F_\delta^{(1)} = l_1 \cdot G_1$ , позволяет оценить тягу двигателя  $F_\delta^{(1)} = \frac{l_1 \cdot G_1}{L_p}$  и ее погрешность:

$$\delta F_\delta = \delta l_1 + \delta G_1 + \delta L_p.$$

При снятии трех грузов  $G_1 + G_2 + G_3$  погрешность по аналогии оценивалась как

$$\delta F_\delta = \delta L_p + \frac{\sum_{i=1}^3 l_i \cdot G_i \cdot (\delta l_i + \delta G_i)}{\sum_{i=1}^3 l_i \cdot G_i}.$$

Было показано, что для оценки можно принять за относительную погрешность тяги, определяемую неточностью тарировки, величину равную 0,01 ( $\delta F_\delta^{(1)} = 0,0123$ ).

### Погрешность, связанная с измерением силы тока магнитной катушки

Сила тока магнитной катушки линейно связана с усилием магнита:

$$P_M = k \cdot I.$$

В этом случае можно считать, что относительная погрешность измерения тока равна относительной погрешности силы магнита, т.е.  $\delta P_M = \delta I$ .

А так как сила тяги связана с усилием магнита соотношением

$$P_M \cdot L_M = F_{\delta\delta} \cdot L_{\delta\delta},$$

то в этом случае относительная погрешность равна

$$\delta F_M = \delta P_M + \delta L_M + \delta L_{\delta\delta}.$$

Для рассматриваемой конструкции тягомера было получено  $\delta F_M = 0,00195 \approx 0,002$ .

### Вывод

Оценочную погрешность тягомера можно представить как величину, равную

$$0,08 + 0,01 + 0,002 = 0,09595 \approx 0,096.$$

Данная работа проводилась в рамках проекта УНТЦ №1936.

### Литература

1. Бахмет Г.К., Рибалов О.П. Коефіцієнт тертя підпори маятникового тягоміра // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2005. – № 8 (24). – С. 226-227.
2. Бахмет Г.К., Лоян А.В. Вплив зовнішніх коливань на роботу тягоміра СПД малих тяг // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2005. – №10 (26). – С. 151-153.

Поступила в редакцию 25.05.2006

**Рецензент:** канд. физ.-мат. наук А.В. Головченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.