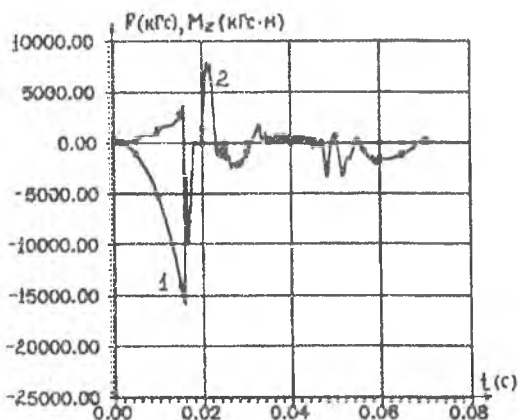


Библиографический список

1. Бранец В.Н., Дыгловский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.

2. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука, 1986. 368 с.

3. Гладкий В.Ф. Динамика конструкции летательного аппарата. М.: Наука, 1969. 496 с.



Р и с. 4. Усилие в замке (1) и суммарный момент (2)

УДК 629.84.063

С.А.Петренко, А.А.Маркин, Ю.В.Монахов,
И.П.Калугин

ОТДЕЛЕНИЕ ФЕРМЫ ЗАПРАВочно-ДРЕНАЖНОЙ МАЧТЫ
РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ "ЭНЕРГИЯ"

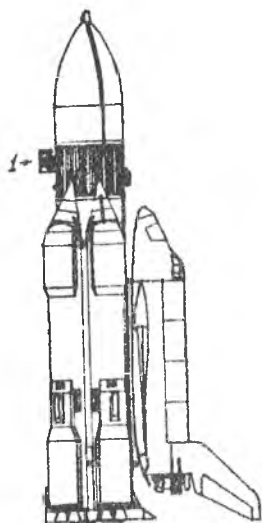
Разработана математическая модель процесса отделения фермы заправочно-дренажной мачты ракеты-носителя "Энергия". Рассмотрены основные факторы, определяющие динамику и время отделения фермы; предложены рекомендации, повышающие надежность функционирования фермы.

Для обеспечения заправки, дренажа и слива компонентов топлива при испытаниях или достартовой аварии в состав ракетно-космического комплекса "Энергия" включена заправочно-дренажная мачта (ЗДМ).

Выбор конструктивного решения стыка наземной и бортовой магистралей заправки и дренажа в виде заправочно-дренажной мачты определен по результатам оптимизации габаритов, зон размещения, числа разъемов, Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.

энергетики отводимых на старте устройств, числа команд управления, а также надежности изделия в целом.

В таком исполнении стык заправки и дренажа топлива на старте представляет собой рациональную по энергетике и массе, с сосредоточенной зоной размещения конструктивных элементов ствода и самого стыка наземной и бортовых магистралей пневмогидромеханическую систему, состоящую из мачты, собственно фермы и механизмов системы отвода.



Р и с. 1. Ракета-носитель "Энергия"
1 - ферма ЗДМ

Ферма ЗДМ, предназначенная для стыковки и расстыковки трубопроводов заправки и дренажа топливной системы ракеты-носителя (РН), выполнена в виде ферменно-стержневой конструкции, на которой монтируются плата пневморазъемных соединений, пневмоциты и арматура пневмо-гидро-схемы (ПГС). Соединение фермы и РН осуществляется пневмозамками в районе межбака РН (рис. 1).

Система отвода включает в себя пневмосистему с пневмоцилиндрами отвода и обезвешивания, шарнирно соединенными с мачтой и фермой (кинематическая схема на рис. 2), гидравлические порционеры, установленные на плате ПГС, и пружинные толкатели.

Расстыковка и отвод фермы ЗДМ осуществляется после начала движения изделия при воздействии на нее угловых и линейных траекторных перегрузок, колебаний РН, гравитационных воздействий, усилий средств отвода и сил инерции.

Математическая модель процесса отделения может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:

ренциальных уравнений:

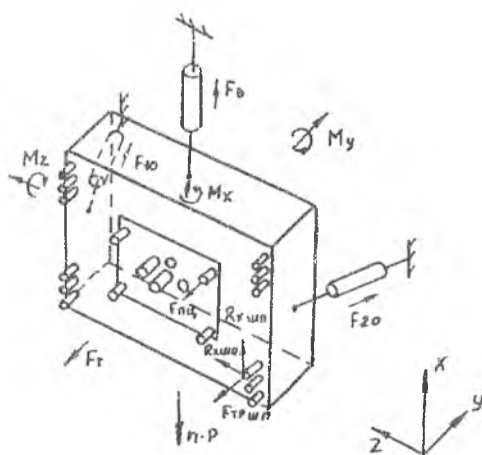
$$\dot{\lambda}_i = \frac{1}{2} \lambda_i \times \vec{\omega}_i, \quad (1)$$

$$\vec{K}_i + \vec{\omega}_i \times \vec{K}_i = \vec{M}_i \dot{s}, \quad (2)$$

$$\vec{L}_1 = \vec{F}_{1s}, \quad (3)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{V}_1, \quad (4)$$

$$\hat{L}_2 = \hat{F}_{2s} - \hat{K} \hat{V}_2, \quad (5)$$



Р и с. 2. Схема сил и моментов, действующих при отводе фермы ЗДМ

$$\hat{X}_2 = \hat{V}_2; \quad (6)$$

$$\dot{p}_{j1} = \frac{\alpha_{кр} (R \omega_{j1} T_{j2} - P_{j1} S_{nj} l_j)}{V_{noj} + S_{nj} l_j}, \quad (7)$$

$$\dot{T}_{j1} = \frac{T_{j1} S_{nj} l_j}{V_{noj} + S_{nj} l_j} - \frac{R T_{j1}^2 \omega_{j1}}{P_{j1} (V_{noj} + S_{nj} l_j)} + \frac{T_{j1} P_{j1}}{P_{j1}}, \quad (8)$$

$$\dot{p}_{j2} = \frac{\alpha_{кр} R (\omega_{j2} T_{j3} - \omega_{j1} T_{j2})}{V_{TP45}}, \quad (9)$$

$$\dot{T}_{j2} = \frac{T_{j2} P_{j2}}{P_{j2}} - R \frac{T_{j2}^2 (\omega_{j2} - \omega_{j1})}{P_{j2} V_{TP45}}, \quad (10)$$

$$\dot{p}_{j3} = \frac{\alpha_{кр} R (\omega_{j3} T_{TP45} - \omega_{j2} T_{j3})}{V_{pec}}, \quad (11)$$

$$\dot{T}_{j3} = \frac{T_{j3} \dot{P}_{j3}}{P_{j3}} - R \frac{T_{j3}^2 (\omega_{j3} - \omega_{j2})}{P_{j3} V_{pec}}, \quad (12)$$

где i - индекс, определяющий отношение геометрического объекта к системе координат, связанной с физическим объектом; $i = 1$ - геометрические объекты, определенные в системе координат $\{S_1\}$, связанной с РН; $i = 2$ - геометрические объекты, определенные в системе координат $\{S_2\}$, связанной с фермой ЗДМ; λ_1 - кватернион $[I]$, определяющий ориентацию осей $\{S_1\}$ относительно инерциальной системы координат $\{I\}$, совпадающей с $\{S_1\}$ при времени $t = 0$; λ_2 - кватернион, определяющий ориентацию осей $\{S_2\}$ относительно системы $\{I\}$; $\vec{\omega}_i$ ($i = 1, 2$) - векторы угловой скорости РН и фермы; \vec{K}_i - векторы кинетического момента РН и фермы; \vec{M}_{i5} - векторы суммарных моментов, действующих на РН и ферму; \vec{L}_1 - вектор механического импульса РН;

$$\hat{L}_2 = \begin{bmatrix} L_{21} \\ L_{22} \\ L_{23} \end{bmatrix} \quad \hat{F}_{25} = \begin{bmatrix} F_{251} \\ F_{252} \\ F_{253} \end{bmatrix} \quad - \text{матрицы компонент механического импульса фермы и суммарной силы, действующей на ферму;}$$

\vec{V}_1 - вектор линейной скорости центра масс РН; X_1 - вектор координат центра масс РН;

$$\hat{V}_2 = \begin{bmatrix} V_{21} \\ V_{22} \\ V_{23} \end{bmatrix} \quad - \text{матрица компонент вектора линейной скорости фермы;}$$

$$\hat{X}_2 = \begin{bmatrix} X_{21} \\ X_{22} \\ X_{23} \end{bmatrix} \quad - \text{матрица координат центра масс фермы;}$$

\vec{F}_{15} - вектор суммарной силы, действующей на РН (складывается из сил тяги маршевых двигателей РН и сил аэродинамического сопротивления и газодинамического воздействия при отражении струй из двигателей от стартовых сооружений, динамики корпуса РН, динамических реакций от фермы ЗДМ);

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \quad - \text{ матрица коэффициентов рассеивания энергии упругих деформаций фермы.}$$

Уравнение (5) записано в соответствии с [3]. Уравнения (7)-(12) определяют состояние газа в пневмосистеме отвода, где в связи с малым временем процесса отвода пренебрегают теплообменом газа с внешней средой [2], при этом:

индекс j ($j = 1, 3$) означает принадлежность параметра к пневмосистемам обезвешивания и отвода ($j = 2, 3$ - индексы пневмосистемы двух пневмоцилиндров отвода), таким образом,

$P_{j1}, T_{j1}, W_{j1}, \ell_j, S_{nj}, V_{noj}$ - давления, температуры, расходы, длины штоков, площади поршней и начальные объемы подпоршневых пространств пневмоцилиндра обезвешивания и двух пневмоцилиндров отвода;

P_{j2}, T_{j2}, W_{j2} - давления, температуры и расходы в трубах между подпоршневыми пространствами и ресиверами соответствующих систем;

P_{j3}, T_{j3}, W_{j3} - давления, температуры и расходы в ресиверах;

$\alpha_{кр}$ - адиабатическая постоянная газа;

R - универсальная газовая постоянная;

$V_{труб}$ - объем трубы между подпоршневым пространством и ресивером;

$V_{рес}$ - объем ресивера;

$T_{труб}$ - температура газа в магистрали, связанной с ресиверами.

Расходы в соответствующих элементах пневмосистемы определяются в соответствии с соотношениями, полученными на основании [2]:

$$\varphi_{jk} = \begin{cases} 0, \beta_{jk} = 1; \\ \ln \sqrt{\frac{2\alpha_{кр} (\beta_{jk} - \beta_{jk})}{RT_{jk} (\alpha_{кр} - 1)}} \cdot \frac{2/\alpha_{кр} (\alpha_{кр} + 1) / \alpha_{кр}'}{\beta_{jk} < \alpha_{кр};} & (I3) \\ \ln \sqrt{2\alpha_{кр} \alpha_{кр} / (RT_{jk} (\alpha_{кр} + 1))}, \beta_{jk} > \alpha_{кр}; \\ \alpha_{кр} = 2 / (\alpha_{кр} + 1); \end{cases}$$

$$in = \text{Sign}(P_{jk} - P_{jk-1}); \quad (14)$$

$$\beta_{jk} = \begin{cases} P_{jk} / P_{jk-1}, & in > 0; \\ P_{jk-1} / P_{jk}, & in < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\omega_{jk} = \begin{cases} \mu_{jk} S_{jk} \varphi_{jk} P_{jk}, & in > 0; \\ -\mu_{jk} S_{jk} \varphi_{jk} P_{jk-1}, & in < 0, \end{cases} \quad (16)$$

где μ_{jk} - коэффициенты сопротивления расходящихся шайб; S_{jk} - площади поршней, продольных сечений труб между подпоршневыми пространствами и ресиверами.

К уравнениям (I)-(I6) необходимо также добавить уравнения для сил, развиваемых пружинными толкателями, установленными в углах фермы (рис. 2), и гидропорционерами, установленными в углах платя ПС (рис.2):

$$F_{птm} = -K_{птm} \Delta X_m, \quad (17)$$

где $K_{птm}$ - жесткость пружинного толкателя; ΔX_m - расстояние вдоль оси пружинного толкателя от m -го угла фермы до сопряжения толкателя с РН ($m = \overline{1,4}$).

Гидропорционер схематично показан на рис. 3. Усилия на его штоках, без учета сил диссипации, могут быть выражены следующими соотношениями:

$$F_{гпц, m} = P_r S_r / n, \quad (18)$$

где n - число соприкасающихся с РН штоков гидропорционера ($n \leq m, m = 4$).

Упругость конструкции мест крепления фермы к РН, шпильчных направляющих, расположенных в углах фермы, в местах установки пружинных толкателей (рис. 2), самой фермы, а также штуцерного соединения запорочно-дренажной магистрали определялась дифференциальными связями с жесткостями, оцененными конечноэлементным методом и подтвержденными экспериментально.

Система (I)-(I8) решалась численным интегрированием по времени на ЭВМ типа IBM-PC/AT-386 (33 МГц) и ЭВМ с процессором Motorola-80030

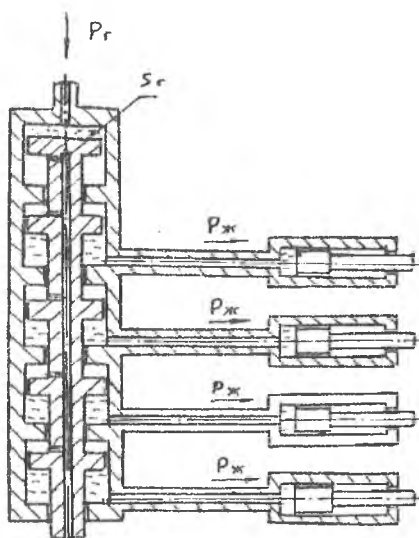
(33 мГц). В качестве метода интегрирования применялся метод Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом. Шаг интегрирования выбирался исходя из устойчивости системы (I)-(16) в целом. Устойчивость интегрирования системы оценивалась вариацией расчета системы по шагу интегрирования h от 0,1 с до 0,000001 с и сравнением результатов интегрирования по динамическим и кинематическим переменным на соседних решениях. Было установлено, что при времени отделения примерно 0,1 с расхождение результатов расчета на соседних вариациях шага интегрирования исчезает при $h < 0,000001$ с.

Дальнейшее исследование процесса отделения осуществлялось при вариациях данных по разбросу эксцентриситета центра масс фермы, давлений в пневмосистемах отвода и обезвешивания, динамическим и кинематическим условиям движения РН.

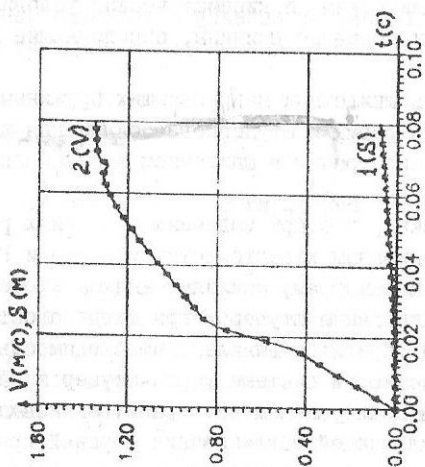
Были выявлены три основные причины, определяющие динамику и время отделения фермы:

- форма и жесткость шпилечных направляющих пружинных толкателей;
- угловая жесткость фермы и штуцерного соединения платы ПРС;
- наличие больших сил трения в шпилечном и штуцерном соединениях фермы с РН при отводе.

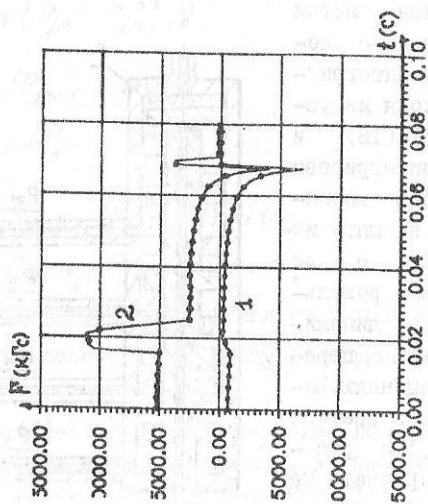
Было выявлено также, что при заданных значениях разбросов по масс-центровочно-инерционным характеристикам фермы и РН, динамическим и кинематическим параметрам, усилиям отвода и обезвешивания возникает эффект заклинивания штуцеров при сходе с остающихся элементов конструкции РН. При этом выявлена необходимость не превышения значения 10^5 кгс/м жесткости системы ферма-штуцер и наличия начальной газовой подушки в подпоршневом пространстве пневмосистем обезвешивания и отвода, исключающей заклинивание поршней при движении фермы на участке с большими силами трения.



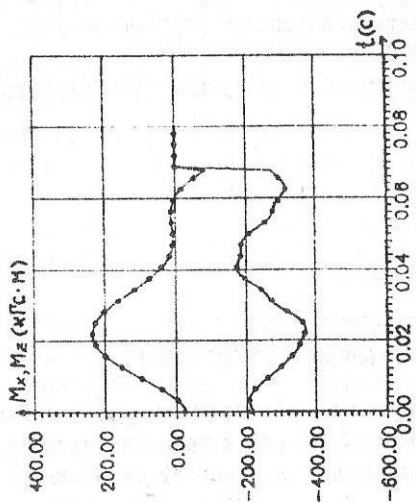
Р и с. 3. Схема гидроразделителя фермы ЗДМ



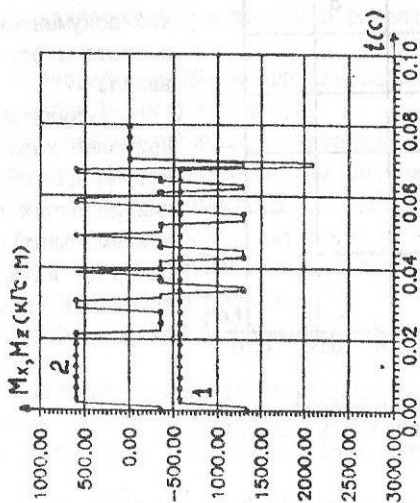
Р и с. 4. Перемещение (1) и скорость (2)



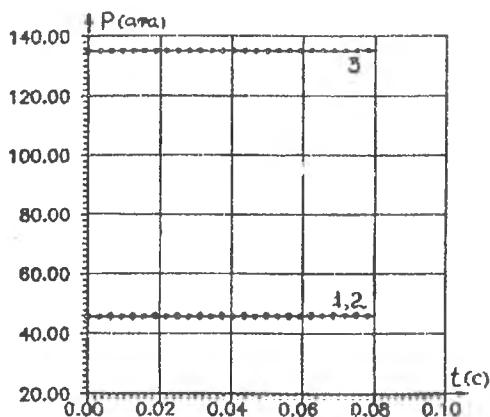
Р и с. 5. Сила трения (1) и суммарная сила (2)



Р и с. 6. Момент M_x (1) и момент M_z (2)



Р и с. 7. Моменты от порционных: 1 — момент M_x ; 2 — момент M_z



Р и с. 8. Давление в пневмоцилиндре отвода (1, 2) и давление в пневмоцилиндре обезвреживания (3)

Указанные рекомендации реализованы в конструкторской документации на ферму и системы отвода и обезвреживания.

Результаты расчета по наиболее характерным параметрам для штатной реализации исходных данных (одно из максимальных отклонений по разбросу начального вектора состояния системы) приведены на рис. 4-8.

Библиографический список

1. Бранец В.И., Шимлевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука, 1986. 368 с.
3. Гладкий В.Ф. Динамика конструкции летательного аппарата. М.: Наука, 1969. 496 с.

УДК 629.84.063.017.1

С.А.Петренко, Ю.Г.Кирсанов

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО БЛОКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ "ЭНЕРГИЯ"

Изложены основные проблемы обеспечения надежности центрального блока ракеты-носителя "Энергия" и показаны пути их решения на этапах изготовления, экспериментальной отработки и эксплуатации.

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.