

**Ван Ч., Заболотнов Ю. М., Ишков С. А., Ли А.**

## **ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ**

Рассматриваются структура и принципы управления испытательным стендом для моделирования процесса развёртывания орбитальной тросовой системы (ОТС). Стенд предназначен для отработки и тестирования программ развёртывания и технических устройств ОТС. Стенд создаётся при тесном взаимодействии и сотрудничестве специалистов Самарского государственного аэрокосмического университета (кафедра космического машиностроения) и Северо-западного политехнического университета (институт автоматики).

### **Общая характеристика стенда**

Проведённый анализ работ и собственные исследования в области ОТС показали, что разработка специального стендового оборудования является актуальной задачей, позволяющей ускорить реализацию на борту космического аппарата (КА) эксперимента с использованием ОТС.

Основные функциональные характеристики создаваемого испытательного стенда:

1. Испытательный стенд предназначен для отработки в земных условиях экспериментов с ОТС, состоящей из базового космического аппарата (БКА) и малого космического аппарата (МКА), соединённых тросом.
2. Система управления ОТС располагается на борту БКА. Доступной для измерения является информация о длине и скорости движения троса.
3. Исполнительным устройством бортовой системы управления является тормозной механизм, управляемый микропроцессором.
4. Все процессы на стенде моделируются в реальном масштабе времени.
5. Разностное гравитационное ускорение, диссипативные, инерциальные, а также внешние возмущающие силы, влияющие на силу натяжения троса, моделируются специальным устройством (имитатором среды) с использованием цифрового моделирования.
6. Направление движения троса на стенде остается постоянным, боковое и продольное отклонения не моделируются.

### **Принципиальная схема стенда**

Схема стенда изображена на рисунке 1.

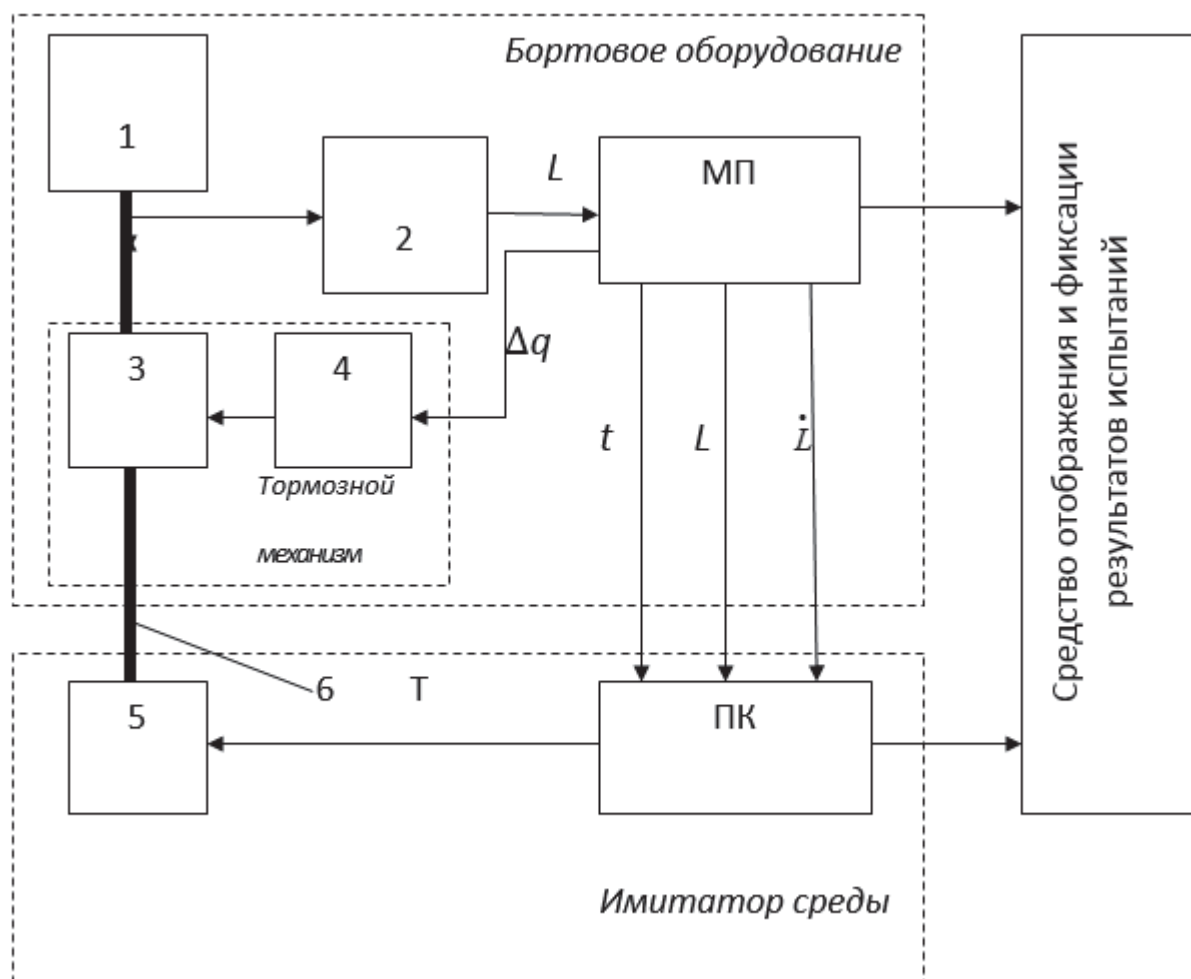


Рисунок 1

На рисунке 1 блоки 1, 2, 3, 4, 5, 6 – механическая часть стенда; бортовой микропроцессор (МП) и персональный компьютер (ПК) – информационная часть стенда; 1 – отматы- вающая катушка; 2 – измеритель длины отмотанного троса; 3 – исполнительное устройство тормозного механизма (тормозной барабан); 4 – привод механизма торможения; 5 – устрой- ство для создания заданного натяжения в тросе; 6 – трос.

На рисунке 1 используются следующие обозначения:  $L$  – длина выпущенного троса,  $\dot{L}$  – скорость выпущенного троса,  $\Delta q$  – обобщённое перемещение механизма управления торможением,  $T$  – задаваемое натяжение троса,  $t$  – текущее время.

### Принципы управления стендом

Управление стендом осуществляется на основе взаимодействия двух основных под- систем (рис. 1): 1) подсистемы, состоящей из реального бортового оборудования; 2) под- системы, имитирующей воздействие окружающей среды. Причём взаимодействие этих подсистем осуществляется посредством специального программного и математического обеспечения, реализованного в ПК.

Микропроцессор, входящий в состав бортового оборудования, реализует следующие функции:

1. Хранит номинальную программу развёртывания тросовой системы в виде программных функций времени  $L_p(t)$  и  $\dot{L}_p(t)$ .

2. Оценивает значение производной  $\dot{L}(t) \approx [L(t) - L(t - \Delta t)] / \Delta t$ , где  $\Delta t$  - интервал квантования.

3. Формирует сигнал для работы тормозного механизма  $\Delta q \approx K_1(L - L_p) + K_2(\dot{L} - \dot{L}_p)$ , где  $K_1, K_2$  - коэффициенты обратной связи,  $L$  и  $\dot{L}$  - результаты измерений длины и скорости выпуска троса.

Компьютер (ПК), входящий в подсистему имитации среды, реализует следующие функции:

1. Моделирует динамику ОТС с учётом заданного набора возмущающих факторов.

2. Определяет текущее значение натяжения в тросе  $T(t)$  по рассчитанным координатам ОТС и длине выпущенного троса системы.

3. Отображает в реальном масштабе времени все динамические параметры работающего стенда.

### Элементы конструкции стенда

Конструктивно стенд состоит из: 1) основания; 2) механизма торможения выпускаемого троса; 3) механизма измерения длины выпущенного троса; 4) узла измерения натяжения троса; 4) механизма (привода) вытягивания троса; 5) узла разворота направления движения троса; 6) механизма демпфирования колебаний троса.

Механизм выпуска троса работает только на торможение. Для торможения троса применяется механизм, использующий силы трения. Сила трения регулируется посредством изменения длины троса, контактирующего с поверхностью трения. В качестве поверхности трения используется цилиндр. Изменение длины троса, контактирующего с цилиндром, выполняется с помощью электрического привода, вращающего цилиндр вокруг продольной оси и наматывающего трос на цилиндр.

Измерение длины выпущенного троса производится классическим методом путём подсчёта количества оборотов диска, на который намотан трос. Узел определения натяжения троса выполняется с использованием тензодатчика за счёт измерения реакции на контактирующие опоры при прохождении троса.

При изменении усилия в механизме торможения (при реализации кинематической схемы движения закольцованного троса) может происходить провисание троса на участке возвратного движения. Для устранения провисания троса и гашения колебаний провисающего участка троса применяется механизм демпфирования. Механизм демпфирования реализуется в виде коромысла с возможностью регулирования путём изменения его центра тяжести.

### **Программное и математическое обеспечение**

Для компьютера (ПК), управляющего процессом развертывания ОТС и отображающего динамические параметры стенда, реализовано специальное программное и математическое обеспечение, основанное на известной теории по динамике ОТС [1 - 3] и практическом опыте реального тросового космического эксперимента YES2, проведенного на КА «Фотон-М3» в 2007 году. Все номинальные программы развертывания ОТС разделяются на два класса: 1) программы развертывания ОТС, обеспечивающие вертикальное конечное положение троса; 2) программы развертывания ОТС с отклонением конечного положения троса от вертикали. Первый класс программ отличается относительно малыми скоростями выпуска троса (2-3м/с) и прежде всего может быть реализован на испытательном стенде. Второй класс программ развертывания характеризуется относительно большими скоростями выпуска троса (до 20-25м/с) и предъявляет повышенные требования к работе технических устройств стенда. Поэтому этот класс программ развертывания будет реализован на стенде во вторую очередь. При проведении тросового космического эксперимента YES2 именно на таких больших скоростях развертывания троса произошла нештатная ситуация, приведшая к потере полезного груза (спускаемой капсулы).

### **Библиографический список**

- 1 Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
- 2 Ишков С.А., Наумов С.А. Управление развертыванием орбитальной тросовой системы // Вестник СГАУ. 2006. Вып.1. С. 81-90.
- 3 Заболотнов Ю.М., Наумов О.Н. Движение спускаемой капсулы относительно центра масс при развертывании орбитальной тросовой системы // Космич. исслед. 2012. Т.50. №2. С. 177-187.