

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 629.7

## АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ МНОГОЗВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.А. Гусев  
В.П. Ходненко  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Описан алгоритм создания прецизионных многозвенных конструкций (ПМК) для бортовых радиолокационных комплексов с антенно-фидерным устройством на основе антенной решётки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Приведена методика моделирования ПМК с различной детализацией и на различных этапах разработки с рекомендациями по настройке и уточнению математических моделей ПМК.

**Ключевые слова:** механическая система, прецизионная многозвенная конструкция, математическое моделирование, контактное взаимодействие, методика моделирования, алгоритм создания.

Прецизионная многозвенная конструкция (ПМК) – это такая трансформируемая конструкция, состоящая из более чем одного подвижного звена, к которой предъявляются требования по обеспечению её геометрических характеристик в процессе и (или) после осуществления движения, при этом допуск на геометрические характеристики в соответствии с ГОСТ 25348-82 соответствует качеству 10 и ниже, а также содержащая прецизионные элементы (привода, упоры, люфтовыбиратели и т. д.).

Наиболее распространённым применением ПМК является использование в качестве силовой конструкции для крупногабаритных антенно-фидерных устройств (АФУ) бортовых радиолокационных комплексов (БРЛК). Главной особенностью ПМК является жёсткое требование по точности, обусловленное несущей частотой зондирующего сигнала БРЛК.

Для БРЛК, предназначенных для мониторинга ледовой обстановки, работающих преимущественно в X-диапазоне, допуск на отклонение точек физической апертуры от расчётной может составлять 2 мм, при том, что размеры АФУ могут достигать десятков метров.

Современные БРЛК широко используют принцип синтезирования апертуры, а также многолучевые антенны для увеличения разрешающей способности. При этом для увеличения полосы обзора необходимо увеличивать горизонтальный размер антенны [1], поэтому АФУ БРЛК часто представляют собой крупногабаритные антенны, вытянутые вдоль вектора скорости космического аппарата (КА). Для размещения вышеописанных АФУ на КА в транспортном положении под обтекателем ракеты-носителя (РН) их складывают обычно в виде гармошки (рис. 1).

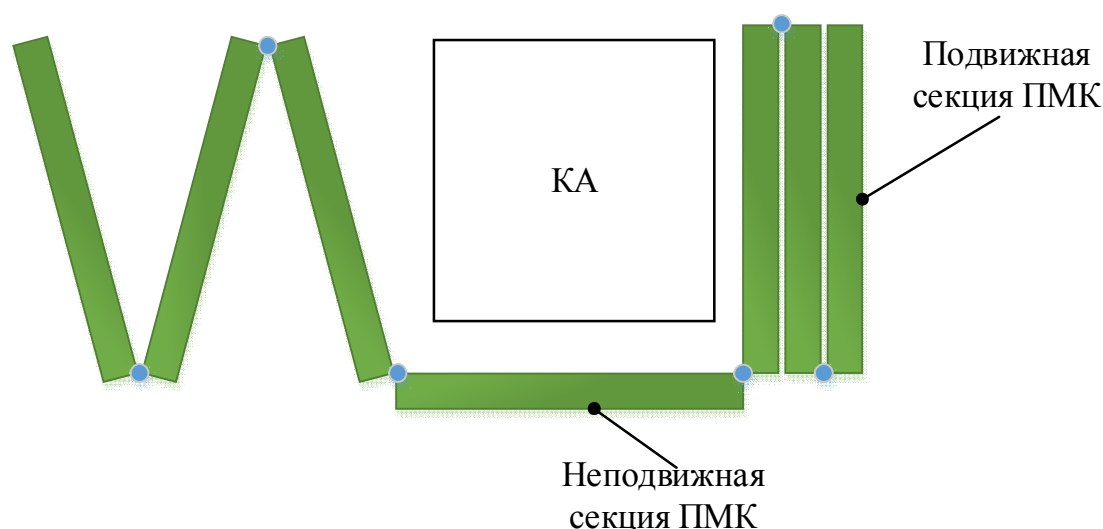


Рис. 1. Кинематическая схема ПМК

Процесс создания ПМК, как и любой другой космической техники, включает следующие этапы:

1. Синтез и формирование проектного облика ПМК.
2. Конструирование и выпуск рабочей документации.
3. Изготовление. Включает изготовление составных частей и общую сборку ПМК.

4. Отработка. Включает как наземную экспериментальную отработку, так и отработку в натуральных условиях.

Укрупнённо алгоритм создания ПМК можно представить в виде последовательного прохождения указанных выше этапов, основные задачи, исходные данные и результаты работы по этапам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основная информация об этапах создания ПМК

Этап создания	Задачи этапа	Исходные данные	Подэтапы	Результаты
Синтез и формирование проектного облика ПМК	Формирование общего проектного облика ПМК Формулировка требований к антенным устройствам (АУ) Формулировка требований к ПМК Формулировка требований к СО КА	Предварительные размеры АУ Характеристики АУ Требования по размещению АУ на КА	Рассмотрение рабочей конфигурации ПМК Рассмотрение транспортной конфигурации ПМК Предварительное моделирование	Габариты в транспортной и рабочей конфигурациях Число звеньев ПМК, способ раскрытия Тип механизма раскрытия Жёсткости звеньев и сочленений Допустимые погрешности и люфты Тип и способ зачекочки, количество пиростроительств ТЗ на ПМК
Конструирование ПМК	Декомпозиция конструкции ПМК Разработка составляющих ПМК Выпуск рабочей документации на ПМК	Параметры транспортной и рабочей конфигураций ПМК Тип механизма раскрытия Жёсткости звеньев и сочленений Требования по точности	Декомпозиция Выбор основных элементов ПМК Моделирование раскрытия ПМК Композиция Выпуск рабочей документации	Конструкция составляющих элементов ПМК Нагрузки в ПМК в процессе раскрытия Способы обеспечения точности ПМК Состав макетов для отработки Комплект рабочей документации
Изготовление ПМК	Выбор схемы сборки ПМК Проектирование и изготовление технологической оснастки, приспособлений и стендов Сборка и сдача ПМК	Рабочая документация на ПМК	Технологическая подготовка производства Изготовление технологической оснастки, приспособлений и стендов Изготовление составных частей и макетов ПМК Сборка ПМК Приёмо-сдаточные испытания	Комплект технологической документации Рабочая документация на оснастку, приспособления и стенды Технологическая оснастка и стенды Макеты и отработочные образцы ПМК
Наземная экспериментальная отработка ПМК	Отработка конструкции с целью подтверждения требованиям ТЗ	Рабочая документация на ПМК Макеты и отработочные образцы ПМК	Отработка на воздействие внешних воздействующих факторов (ВВФ) Отработка точности ПМК Отработка раскрытия	Отработанная конструкторская документация на ПМК Отчёт по наземно-экспериментальной отработке (НЭО)

При создании ПМК необходимо выбирать конструктивные решения самой ПМК, наземного испытательного оборудования и технологической оснастки, позволяющие обеспечить заданную точность с учётом всех влияющих факторов.

Основные факторы, влияющие на точность ПМК, приведены в табл. 2.

Одним из путей предсказания поведения проектируемых систем является путь создания математических моделей и последующего проведения исследования систем на этих моделях. Построение

или проектирование систем, удовлетворяющих заранее заданным свойствам, можно осуществить, когда имеются управляющие переменные, при помощи которых можно влиять на поведение проектируемой системы [2].

На этапах синтеза и конструирования необходимо провести математическое моделирование ПМК. В табл. 3 отражена методика моделирования ПМК. Наиболее подробно рассмотрим этап предварительного моделирования, так как работы на этом этапе носят универсальный характер для

Таблица 2

Факторы, влияющие на точность ПМК

Наименование фактора	Когда определяется	Чем обеспечивается
Динамическая стабилизация КА	Предварительное моделирование	Параметрами системы ориентации, выбором жёсткости ПМК
Конструктивные люфты ПМК	Этап синтеза	Конструктивными особенностями составных частей ПМК, наличием люфтоввыбирателей
Тепловое воздействие	Разработка составляющих элементов ПМК	Выбором материалов, покрытий и элементов терморегулирования, конструктивной развязкой АУ и ПМК, ПМК и КА
Динамические воздействия в процессе раскрытия ПМК	Моделирование раскрытия, уточнённое моделирование	Выбором схемы раскрытия, установкой демпферов
Динамические и статические воздействия на этапе выведения	Этап разработки рабочей документации (РД)	Конструкцией ПМК и зачекочки
Погрешности изготовления и сборки ПМК	Этап разработки РД, изготовление	Конструкцией, технологией, схемой сборки
Погрешности измерений	Этап разработки РД, изготовление, отработка	Выбором средств и методиками измерений

Таблица 3

Методика моделирования ПМК

Этап моделирования	Результат моделирования	Среда моделирования
Предварительное моделирование	Жёсткость ПМК в рабочем положении, величина люфтов, необходимые усилия удержания элементов в раскрытом положении, нагрузки в сочленениях при нештатных ситуациях	Matlab Simulink или Easy
Моделирование раскрытия ПМК	Конструктивные параметры составляющих ПМК, нагрузки в процессе раскрытия, схема раскрытия	SolidWorks Motion или NX или Adams
Уточнённое моделирование	Проверка конструктивных решений, уточнённые нагрузки в процессе раскрытия с учётом влияния системы ориентации и податливостей и нелинейностей ПМК	Matlab Simulink + Adams или Matlab Simulink + NX или Easy + Adams

большинства ПМК. Задачей предварительного моделирования является формулировка требований к ПМК в целом, а также к системе ориентации КА. Как следует из названия предварительное моделирование не учитывает конструктивные нюансы ПМК. ПМК сводится к некой эталонной модели, которой могут пользоваться разработчики других систем КА, в том числе системы ориентации.

Ввиду того, что модель ПМК будет использоваться при разработке не только механических, но также электромеханических и электронных систем, имеет смысл вести разработку предварительной модели в пакете, позволяющем моделировать все вышеуказанные системы. В качестве расчётной схемы ПМК в рабочем положении представляется в виде балки, удовлетворяющей гипотезе плоских сечений без учёта сдвигов, поперечное перемещение оси которой характеризуется функцией  $v(x, t)$ . При распределённой массе балки  $m(x)$  поперечные колебания описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Таким образом можно построить простую модель с конечным числом степеней

свободы путём разбиения балки поперечными сечениями на конечное число элементов, а в качестве неизвестных рассматриваются перемещения  $v_k(t)$  и углы поворота в сечениях  $\theta_k(t)$ . В конечном счёте балка заменяется системой упругосвязанных сосредоточенных масс  $\mu_k$  [3] (рис. 2).

Проведём исследование влияния количества элементов разбиения на точность модели. В качестве модели для исследования возьмём балку прямоугольного сечения  $40 \times 100$  мм и длиной 2 м. За эталонные значения возьмём величину прогиба такой балки, закреплённой консольно, и первую собственную частоту, рассчитанные методом конечных элементов. На рис. 3 показан график зависимости относительной погрешности от количества элементов разбиения балки. Очевидно, что погрешность асимптотически стремится к нулю при увеличении числа элементов до бесконечности. На практике допустимые погрешности составляют от 10 до 5%, следовательно, наиболее оптимальными числами разбиения балки будут являться от 12 до 18 элементов.

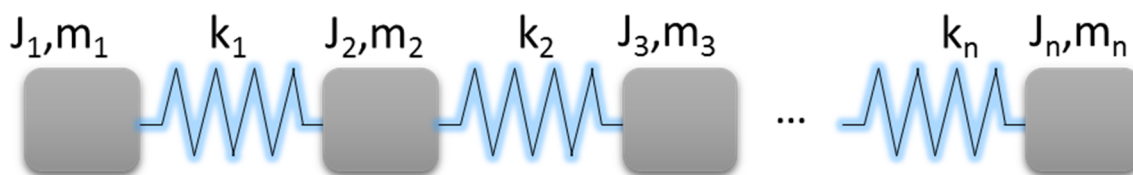


Рис. 2. Гибкая модель ПМК

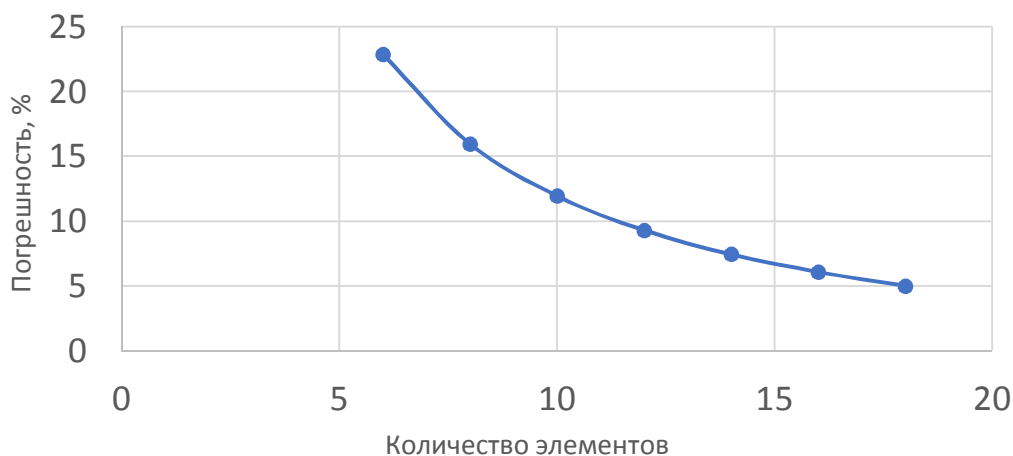


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности моделирования от количества элементов разбиения

При  $n$  более 18 получаем малый прирост в точности, но увеличиваем сложность модели, а при  $n$  менее 12 получаем большую погрешность моделирования.

Общее число степеней свободы системы при последовательной кинематической схеме

$$n_{\Sigma} = s_c k (n - 1) + m s_{ш},$$

где  $k$  – число секций;  $n$  – число тел, из которых состоит секция;  $m$  – число шарниров;  $s_c$  и  $s_{ш}$  – число направлений, в которых могут двигаться тела секций и шарниры.

В общем виде упругая связь состоит из шести степеней свободы (3 вращательных и 3 поступательных). В большинстве случаев можно уменьшить число степеней свободы, например, для протяжённых ПМК, состоящих из конечного числа секций малого поперечного сечения, число степеней свободы можно свести к двум изгибам, а закручиванием, растяжением и поперечными сдвигами пренебречь. В системе из  $n_{\Sigma}$  масс число собственных частот равно  $n_{\Sigma}$ , поэтому число  $n$  не имеет смысла делать большим. Так, в системе из трёх секций, каждая из которых представлена двумя массами, которые допускают изгибы по двум направлениям, будет 12 собственных частот. В большинстве случаев для крупных ПМК наиболее критичными являются низшие собственные частоты первой и второй форм.

Реакция упругой связи может быть представлена на выражением:

$$R_i = k_i q_i + c_i \dot{q}_i,$$

где  $R_i$  – реакция (сила или момент) по  $i$ -й оси,  $k_i$  – жёсткость по  $i$ -й оси;  $c_i$  – коэффициент демпфирования по  $i$ -й оси;  $q_i$  – обобщённая координата по  $i$ -й оси. Жёсткости связей выбираются таким образом, чтобы собственные частоты ПМК соответствовали расчётным по методу конечных элементов, коэффициент демпфирования вычисляется и корректируется по результатам наземной обработки:

$$c = \sqrt{\frac{4mk\gamma^2}{4 + \gamma^2}}, \quad c = \sqrt{\frac{4mk\psi^2}{16\pi^2 + \psi^2}},$$

где коэффициент  $c$  зависит от коэффициента неупругого сопротивления  $\gamma$  или коэффициента по-

глощения  $\psi$  (см. табл. 4), которые различаются для различных материалов. Величины  $m$  и  $k$  – соответственно масса и жёсткость упругого тела. При проведении предварительного моделирования ПМК разбивается на набор жёстких тел, последовательно соединённых упругими связями.

Таблица 4

Значения коэффициентов поглощения и неупругого сопротивления для различных материалов [4]

Материал	$\psi$	$\gamma$
Алюминий	0,02–0,04	0,003–0,006
Латунь	0,01	0,002
Медь	0,33	0,053
Резина	0,20–1,20	0,032–0,190
Сталь	0,01–0,03	0,002–0,005
Стеклопластик	0,20–0,40	0,032–0,064
Серый чугун	0,23	0,036

При предварительном моделировании КА можно представить в виде жёсткого тела с заданными массой и матрицей инерции. КА закреплён при помощи трёхстепенного шарнира в центре масс. Управляющие моменты системы ориентации прикладываются как внешние моменты к шарнирному соединению. ПМК представляется как набор из  $n_{\Sigma}$  жёстких тел, соединённых упругими связями. Одно из тел жёстко крепится к КА.

Моделирование раскрытия ПМК осуществляется для определения основных параметров составных частей ПМК, таких как шарниры, упоры, демпферы и т. д. При таком моделировании требуется часто изменять конструкцию ПМК и повторять моделирование, поэтому процесс внесения изменений в модель и само моделирование должны требовать минимум времени и сил. Для этих целей наиболее подходящими пакетами моделирования являются встроенные в САПР модули. При моделировании подвижные тела зачастую представляются в виде твёрдых.

В процессе раскрытия неизбежно происходят контактные взаимодействия. Обобщённая модель контакта, учитывающая потери на гистерезисное, вязкое и фрикционное демпфирование, выглядит следующим образом:

$$F = F_K + F_T - c\dot{x},$$

где  $F_k$  – контактное взаимодействие, соответствующее модели удара Ханта и Кроссли, при котором контактная сила взаимодействия двух тел:

$$F = -K_p x^n - D\dot{x} \quad [5],$$

где  $K_p$  – контактная жёсткость. При этом контактная жёсткость  $K_p$  зависит от формы и материала контактирующих тел, например, для удара двух сферических тел радиусами  $R_1$  и  $R_2$  контактная жёсткость:

$$K_p = \frac{4}{3\pi(k_1 + k_2)} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad [6]. \quad (1)$$

Показатель  $n$  зависит от формы контактируемых тел. Для плоских тел он равен 1, для других упругих взаимодействий его берут равным 1,5, при учёте пластических деформаций он выбирается более 2. Величину контактной жёсткости при моделировании ПМК нельзя определять как зависимость только формы и материала контактных тел. Если провести моделирование с расчётной контактной жёсткостью, то можно получить контактное усилие, превышающее реальное на несколько порядков. Выражение (1) справедливо только в случае, если два шара либо не закреплены вообще, либо один из них закреплён за центр. В случае раскрытия ПМК удар происходит по линии, не проходящей через шарнир, поэтому необходимо учитывать жёсткость секций относительно шарнира  $k_{ш}$ . При этом жёсткость относительно шарнира как правило на порядок, а то и два меньше контактной. Общая жёсткость относительно шарнира определяется из выражения:

$$\frac{1}{k_{\Sigma}} = \frac{1}{K_p} + \frac{1}{k_{ш}},$$

Откуда следует, что при  $K_p \gg k_{ш}$  контактной жёсткостью можно пренебречь. Коэффициент демпфирования определяется из выражения

$$D = \mu_D x^n \quad [5].$$

Коэффициент гистерезисного демпфирования  $\mu_D$  зависит от коэффициента восстановления  $\lambda$  и определяется по формуле

$$\mu_D = \frac{3k(1-\lambda)}{4\dot{x}^{(-)}} \quad [5].$$

Величина коэффициента гистерезисного демпфирования зависит от множества факторов и чаще всего определяется экспериментально. Потери на фрикционное демпфирование выражаются следующим образом:

$$F_T = c_T \dot{x} |\dot{x}|^{-1} \quad [7],$$

где  $c_T = fN$  – коэффициент фрикционного демпфирования, причём коэффициент трения  $f$  нелинейно зависит от скорости. Простейшая модель трения приведена на рис. 4.

Для наиболее распространённых материалов коэффициенты трения можно подбирать из табл. 5. Уточнённое математическое моделирование следует проводить, когда основная конструкция уже спроектирована и необходимо проверить ПМК с учётом жёсткостей несущей конструкции, а также учесть влияние внешних факторов и системы ориентации КА. Для этих целей необходимо использовать связку двух пакетов, например, Matlab и Adams или NX и Matlab. В Matlab моделируется общая модель внешних факторов, системы ориентации, а данные из Adams в режиме реального времени передаются в модель Matlab для учёта работы механической системы ПМК.

Уточнённая модель ПМК для КА «Метеор-М» №1 приведена на рис. 5. Блок КА\_BRLK моделирует КА с закреплённой на нём ПМК в пакете фи-

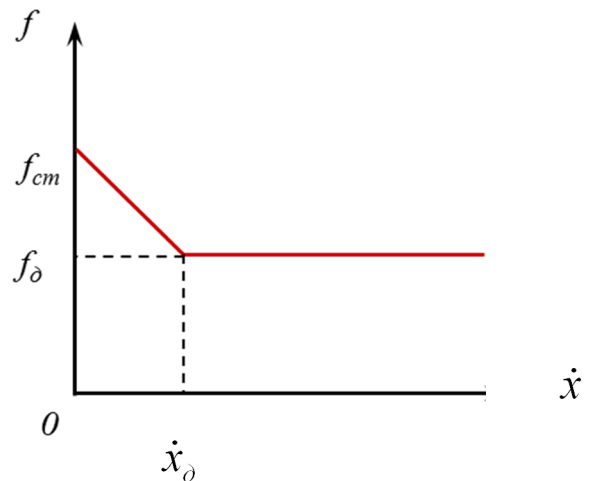


Рис. 4. Простейшая модель трения

Таблица 5

Коэффициенты трения покоя и скольжения для наиболее распространённых материалов [8]

Комбинация материалов		Коэффициенты трения	
		Сухие и чистые поверхности	Смазанные или жирные поверхности
Алюминий	Алюминий	1,05–1,35	0,3
Алюминиевая бронза	Сталь	0,45	–
Фосфористая бронза	Сталь	0,35	–
Алюминий	Низкоуглеродистая сталь	0,61 0,47*	–
Бронза	Сталь	–	0,16
Латунь	Сталь	0,35	0,19
Сталь	Сталь	0,8	0,16

\* Обозначены коэффициенты трения скольжения.

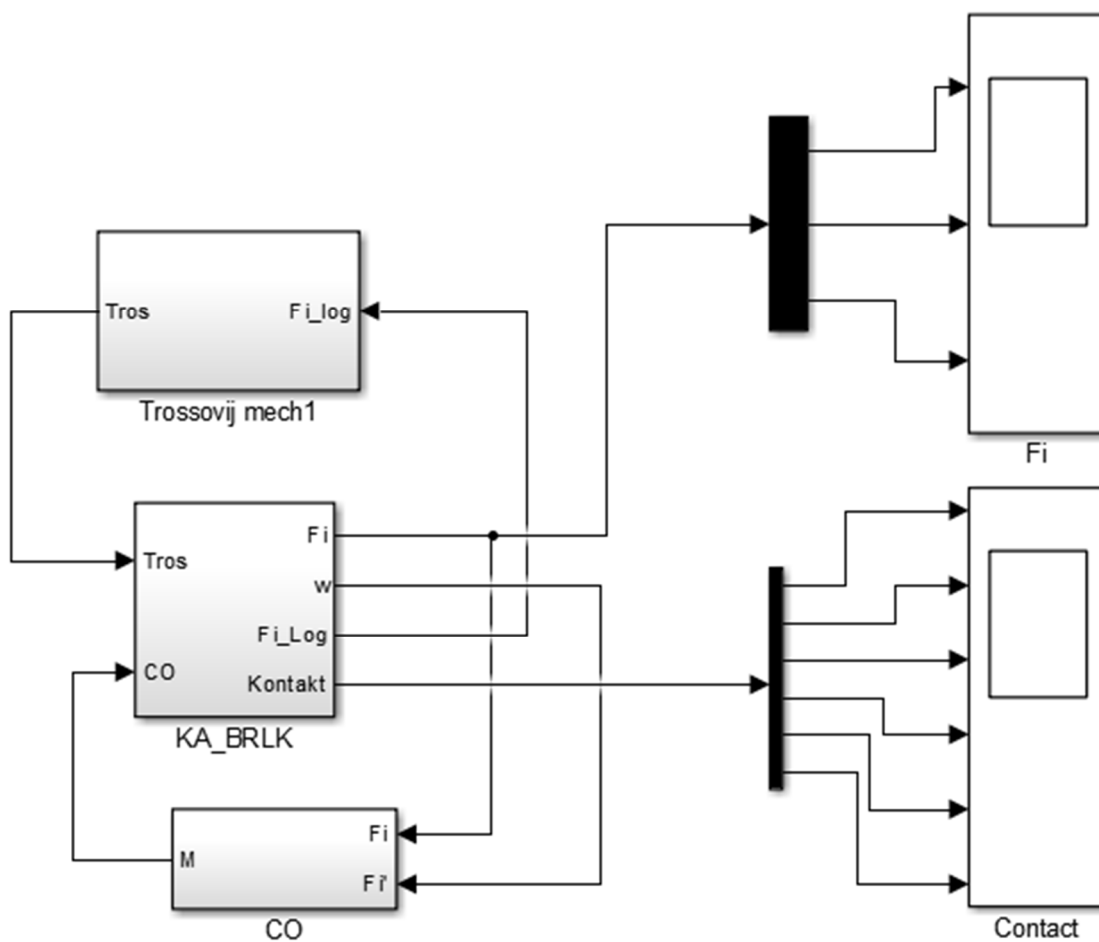


Рис. 5. Уточнённая модель ПМК

зического моделирования. Блок СО моделирует управляющее воздействие системы ориентации по трём осям КА. Блок Trossovij mech1 моделирует влияние на ПМК механизма раскрытия.

По окончании моделирования имеем подробную модель ПМК, заранее отработав штатные и нештатные ситуации. Данная методика применима, если в состав ПМК входит электромеханический привод. При этом на втором этапе необходимо вести параллельное моделирование как механической, так и электромеханической систем.

### Литература

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г. С. Кондратенкова. – М. : Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Андронов С. А. Методы оптимального проектирования: Текст лекций. – СПб. : СПб ГУАП, 2001. – 169 с.
3. Образцов И. Ф., Булычев Л. А., Васильев В. В., Елпатьевский А. Н. Строительная механика летательных аппаратов: Учебник для авиационных специальностей вузов. – М. : Машиностроение, 1986. – 536 с.

4. Тарануха Н. А., Журбин О. В., Журбина И. Н. Исследование колебаний судовых стержневых конструкций с учётом сопротивления внешней среды различной плотности // Материалы третьей Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. – Южно-Сахалинск. – 2011, февраль. – С. 82 – 94.
5. Movahedi-Lankarani H. Canonical equations of motion and estimation of parameters in the analysis of impact problems. – 1988. – 258 p.
6. Gonthier. Contact Dynamics Modelling for Robotic Task Simulation. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Systems Design Engineering. Waterloo. – 2007. – 241 p.
7. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – 3-е изд. / Я. Г. Пановко. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-е), 1976. – 320 с.
8. Инженерный справочник. Таблицы DPVA.info: [сайт]. [2015]. – URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/FrictionToVariousPairs/> (дата обращения: 25 января 2015).

Поступила в редакцию 17.12.2014

*Андрей Александрович Гусев, начальник сектора,  
т. (495) 623-41-08, e-mail: count\_rochester@mail.ru.*

*Владимир Павлович Ходненко, д-р техн. наук, профессор,  
т. (495) 624-94-98, e-mail: vniiem@orc.ru.*