

УДК 629.78.0

# АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СБОРКЕ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

**В.М. Глумов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [vglum@ipu.ru](mailto:vglum@ipu.ru)

**В.Ю. Рутковский**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [rutkov@ipu.ru](mailto:rutkov@ipu.ru)

**Ключевые слова:** космическая конструкция, космический манипуляционный робот, система управления, адаптивное управление, алгоритм.

**Аннотация:** Рассматриваются режимы функционирования систем управления свободно летающим космическим роботом и большой космической конструкции в процессе ее сборки, при выполнении которых необходимо использовать принципы адаптивного управления динамическими объектами. Предлагаются структуры систем управления рассматриваемых космических объектов, в которых используются алгоритмы адаптации.

## 1. Введение

Разработка проектов освоения космического пространства, требует для своей реализации создания нового типа космических аппаратов, которые получили название больших космических конструкций (БКК) [1]. Одной из основных причин, затрудняющих практическую реализацию проектов, является невозможность выведения на орбиту современными средствами окончательно собранных объектов космической техники требуемого размера. Отсутствуют также технологии поэтапной сборки БКК непосредственно на орбите. Недостаточно уделяется внимания вопросам стабилизации и управления ориентацией БКК как многомерной механической системы с дискретно изменяющейся в процессе ее сборки структурой. Практически единственным способом поэтапной сборки БКК в космосе является использование свободнолетающих космических манипуляционных роботов (КМР) [1, 2]. Таким образом, существует необходимость рассмотрения вопросов, связанных с разработкой специализированной механической структуры КМР, пригодной для выполнения транспортных и сборочных работ в космосе, а также решения непростых задач синтеза алгоритмов многосвязного управления подобным многорежимным роботизированным устройством, которое одновременно должно удовлетворять требованиям безопасного и экономичного функционирования в процессе сборки БКК. Движение БКК и КМР описывается нестационарными математическими моделями (ММ), параметры которых могут изменяться в процессе сборки неопределенным образом. Для сохранения быстродействия и точности алго-

ритмов управления динамическими объектами рассматриваемого типа (БКК и КМР) при наличии структурной и параметрической неопределенностей их ММ необходимо использовать теорию адаптивного управления.

## 2. Адаптивные алгоритмы в системе управления БКК

Плохая определенность моделей БКК вызвана невозможностью провести испытания в наземных условиях полностью собранной конструкции, позволяющие уточнить коэффициенты ММ. Решение этой проблемы традиционно ищется на пути использования различных методов идентификации и последующей коррекции неточно заданных параметров модели БКК по результатам экспериментов на орбите. Используя результаты идентификации параметров дискретно развивающейся БКК на последовательности этапов ее развития, можно осуществлять соответствующую настройку регулятора, реализуя тем самым те или иные методы адаптивного управления [3], что нередко позволяет обеспечить в системе свойства робастности.

В процессе сборки БКК возникают колебания упругих элементов конструкции и панелей солнечных батарей, которые вызываются при переориентации или в моменты стыковки. Эти колебания содержат частоты, близкие к частотам в системе стабилизации и угловой ориентации, что может спровоцировать потерю устойчивости движения БКК. Рассматривается случай, когда исполнительным органом является двигатель-маховик, способный формировать как релейные, так и непрерывные управляющие моменты, поддерживающие требуемую ориентацию собранной части БКК. Предполагается, что собственное демпфирование колебаний конструкции отсутствует. Для простоты изложения рассматривается плоское движение упругого БКК. Динамика плоского углового движения БКК, управляемого двигателем-маховиком, описывается с помощью модально-физической модели [3]. Использование двигателя-маховика в качестве исполнительного органа системы ориентации БКК приносит в уравнения ММ некоторый эффект демпфирования движений, определяемый зависимостью момента, создаваемого двигателем, вращающим маховик, от угловой скорости маховика. Однако это демпфирование незначительно и при использовании релейных алгоритмов управления система может оказаться неустойчивой. Таким образом, для обеспечения достаточного запаса устойчивости необходимо сформировать дополнительное управление, которое в случае переменной или неточной модели БКК должно быть адаптивным.

Формирование дополнительного управления осуществляется с применением алгоритма адаптации с эталонной моделью, гасящего колебания конструкции как переменное возмущение с неизвестными параметрами [4]. Этот алгоритм обладает способностью снижать влияние неизмеряемых внешних возмущений на качество функционирования линейной системы. Предполагается, что стабилизация колебаний с помощью дополнительного управления  $M(u_\varepsilon)$  осуществляется только тогда, когда изображающая точка на фазовой плоскости  $x, \dot{x}$  движется внутри -зоны, где двигатель-маховик может функционировать как исполнительный орган непрерывного типа. Управляющий сигнал на входе двигателя-маховика, формирующий дополнительный момент  $M(u_\varepsilon)$  при движении ДКА в -зоне, запишем в дискретном (с периодом  $T_0$ ) виде:

$$(1) \quad u_\varepsilon[n] = k_0 S[n],$$

где  $k_0$  – постоянный коэффициент,  $S[n]$  является выходным сигналом адаптивной подсистемы, предназначенной для стабилизации упругих колебаний конструкции и, как следствие, для увеличения запаса устойчивости системы и повышения точности ориентации ДКА.

$$(2) \quad S[n] = S[n-1] + T_0[-\chi(p_{21}e[n] + p_{22}\Delta e[n]) - K \operatorname{sign}(c_1 e[n] + c_2 \Delta e[n] + \Delta^2 e[n])],$$

где  $e[n] = x[n] - x_m[n]$ ,  $\Delta e[n] = T_0^{-1}(\Delta x[n] - \Delta x_m[n])$ ,  $x$  – стабилизируемая угловая координата БКК,  $x_m$  – выходная координата эталонной модели,  $\Delta^2 e[n] = \Delta e[n] - \Delta e[n-1]$ ,  $\chi, K, p_{21}, p_{22}, c_1, c_2$  – постоянные коэффициенты. В качестве эталонной модели выбирается ММ движения БКК при отсутствии колебаний.

Результаты, полученные в данном разделе работы, позволяют представить рассматриваемую систему адаптивного управления ориентацией БКК в виде следующей схемы (рис. 1), Sw – функциональное звено, подключающее дополнительное управление (1) с адаптивным алгоритмом (2).

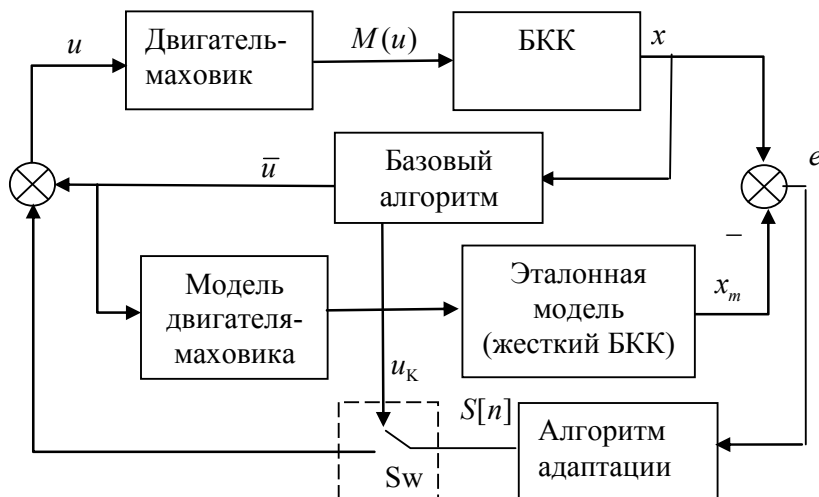


Рис. 1.

Работоспособность адаптивного алгоритма демпфирования упругих колебаний БКК в -зоне была проверена методами математического моделирования.

### 3. Адаптивные алгоритмы в системе управления КМР

Адаптивные алгоритмы целесообразно использовать при двух режимах функционирования свободно летающего КМР: во-первых, при транспортировке нежестких элементов к месту установки на БКК, во-вторых, при манипуляционных операциях в рабочей зоне КМР [2].

При отсутствии или плохой определенности характеристик транспортируемого нежесткого груза, а также при вариациях координаты точки захвата  $r_5$  и удержания груза, параметры модели КМР с грузом являются либо переменными, либо плохо заданными. В этом случае текущая точка захвата не будет соответствовать точке, в которой колебания груза сопровождаются минимальным возбуждением упругих колебаний. Указанное несоответствие нарушает работу системы вплоть до потери устойчивости из-за нарастания интенсивности колебаний при попадании в резонансную область. В данном случае система управления КМР должна быть дополнена контуром активного подавления упругих колебаний. Подобного вида система, содержащая настраиваемую модель (НМ), расширенный наблюдатель, бортовое экспертное устройство (БЭУ) и дополнительный контур стабилизации перевозбужденной моды, используется при решении задачи управления угловой стабилизацией БКК. Взятая за основу и дополненная конту-

ром адаптивной настройки параметра захвата упругого груза  $r_s$ , расширенная система, структурная реализация которой представлена на рис. 2, используется для решения проблемы транспортировки упругого груза с неизвестными характеристиками.

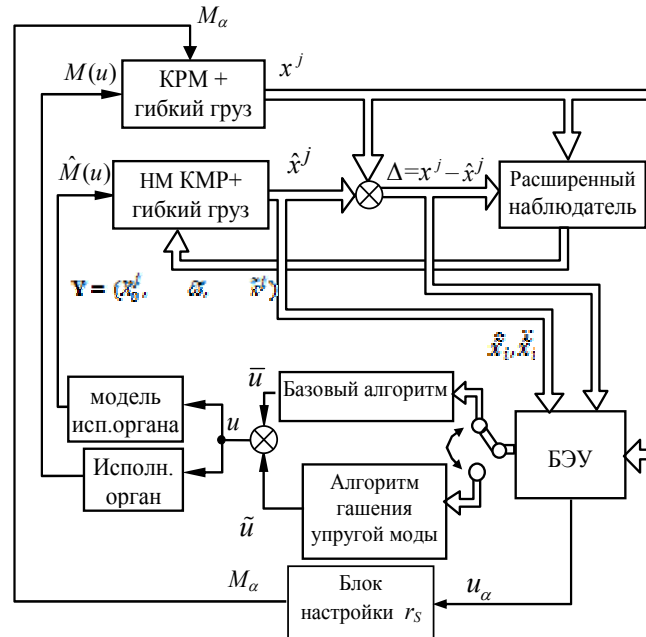


Рис. 2.

БЭУ помимо функции принятия решения в выборе базового  $\bar{u}$  или дополнительного  $\tilde{u}$  управления, используя оценки  $\hat{x}_i, \dot{\hat{x}}_i$ , вычисляет фактическую амплитуду биений и в соответствии с принятым алгоритмом настройки вырабатывает сигналы управления  $u_\alpha$ , которые, воздействуя на приводы манипулятора, смещают точку захвата упругого груза в направлении, приводящем в итоге к снижению вероятности возбуждения упругих колебаний груза.

В процессе манипуляционного функционирования свободно летающего КМР в рабочей зоне могут возникать состояния, при которых коэффициенты ММ меняют знак, провоцируя неустойчивость движения по регулируемым координатам. Движение координат механической системы КМР с грузом в рабочей зоне происходит с достаточно малыми скоростями, что позволяет использовать для анализа и синтеза алгоритмов линейные ММ. Управление манипулятором осуществляется на основе принципа обратной связи с использованием сигналов углового положения корпуса робота и оценок отклонения концевой точки манипулятора от целевой точки. В уравнениях динамики учитывается специфика использования самотормозящихся приводов манипулятора, связанная с «омертвлением» тех суставов, на входах приводов которых отсутствуют сигналы управления. В качестве первичного источника информации рассматривается система технического зрения, содержащая шарнирно связанную с корпусом робота следящую видеокамеру со встроенным дальномером, которые в совокупности поддерживают направление линии визирования на цель и измеряют расстояние до нее.

Рассматривается плоское движение манипулятора с неподвижным концевым звеном, который держит груз. Регулируемыми координатами приняты отклонения точки  $a$  (посадочного места элемента конструкции) от целевой точки  $A$   $X_\varepsilon = X_A - X_a$  и  $Y_\varepsilon = Y_A - Y_a$ , для которых справедливы уравнения

$$(3) \quad \ddot{X}_\varepsilon = d_{11}(q)M_{\alpha 1} + d_{12}(q)M_{\alpha 2}, \quad \ddot{Y}_\varepsilon = d_{21}(q)M_{\alpha 1} + d_{22}(q)M_{\alpha 2},$$

где  $M_{\alpha 1} = k_{0x}(k_{1x}X_{\varepsilon} + k_{2x}\dot{X}_{\varepsilon})$ ,  $M_{\alpha 2} = k_{0y}(k_{1y}Y_{\varepsilon} + k_{2y}\dot{Y}_{\varepsilon})$ ,  $q$  – вектор обобщенных координат.

Анализ условий устойчивости нулевого решения уравнений (3) показывает, что при изменении знаков и значений коэффициентов  $d_{ij}(q)$ , ( $i, j = \overline{1,2}$ ) система может стать неустойчивой при постоянных коэффициентах в алгоритмах управления  $M_{\alpha 1}$  и  $M_{\alpha 2}$ . Если изменение  $d_{ij}(q)$  не нарушает неравенства  $\Delta d = d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21} > 0$ , то выполнение условий устойчивости обеспечивается изменением значений коэффициентов в  $M_{\alpha 1}$  и  $M_{\alpha 2}$ . Поскольку при управлении КМР угловые координаты, как правило, являются измеряемыми, то переменные коэффициенты  $d_{ij}(q)$  могут вычисляться во времени, что позволяет прогнозировать динамику процессов управления КМР, контролируя условия устойчивости и осуществляя в соответствующие моменты времени адаптивную перестройку параметров алгоритмов управления  $M_{\alpha 1}$  и  $M_{\alpha 2}$ . Предлагается структура адаптивной системы управления КМР, которая содержит блоки расчета коэффициентов  $d_{ij}(q)$ , проверки условий устойчивости и блок адаптивной коррекции, алгоритмы которого корректируют знаки и величины коэффициентов в (3).

### 3. Заключение

Преимуществом алгоритма адаптации (2), в отличие от хорошо известных работ по адаптивным системам с моделью, можно считать, что в качестве информации для организации процесса адаптации используется не реакция системы на управляющее воздействие или измеряемое внешнее возмущение, а результат проявления неучтенной динамики в математической модели объекта.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (17-08-01708).

### Список литературы

1. Moosavian S.A.A., Papadopoulos E. Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control // *Robotica*. 2007. Vol. 25, No. 5. P. 537-547.
2. Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Некоторые вопросы управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом // *Автоматика и телемеханика*. 2013. № 11. С. 62-83.
3. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Оценка ненаблюдаемых координат упругих колебаний больших космических конструкций с гиросиловым приводом // *Автоматика и телемеханика*. 2013. № 9. С. 143-156.
4. Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Суханов В.М. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // *Автоматика и телемеханика*. 2011. № 8. С. 96-108.