

## УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ТРЁХМАССОВОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА НА ОСНОВЕ МОДАЛЬНОГО И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Абрахим А. А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» Россия (197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5), e-mail: inkeedo83@mail.ru*

Много-массовая система с упругими связями является одной из самых сложных динамических систем. Сложность в подобных системах заключается в упругости механических связей и влияние зазора, а также внешние возмущения (ветер), из-за которых возникает непрерывные автоколебания в переходном процессе. В этой статье предполагается решение для подобных систем, алгоритм регулятора совмещает модальное управление и адаптивное управление с эталонной моделью. В качестве объекта исследуется радиотелескоп RT70 с трёхмассовым математическим описанием. Результаты, полученные в среде MATLAB-SIMULINK, показывают, что модально-адаптивным управлением двигателя платформы успешно достигается большое быстродействие, исключение влияния зазора и эффективное подавление ветровых возмущений на радиотелескоп<sup>2</sup>.

Ключевые слова: трехмассовая система, модальное управление, адаптивное управление, электропривод с упругими связями.

## SPEED CONTROL SYSTEM FOR THREE-MASS RADIO TELESCOPE USING MODAL CONTROL AND MRAC

Abraheem A. A.

*Saint-Petersburg State Electrotechnical "LETI", Saint-Petersburg, Russia (197376, Saint-Petersburg, Prof. Popova str. 5), e-mail: inkeedo83@mail.ru*

Multi-mass system with elastic coupling is one of the most complex dynamical systems. Complexity in such systems is the elastic mechanical coupling and the effect of the backlash as well as the external disturbances (wind), because of which there is a continuous self-oscillation in the transient response. This article suggests a solution for such systems, the controller algorithm combines the modal control and adaptive control with reference model. The three-mass radio telescope RT70 model is used as an object of study. The results obtained in the environment of MATLAB-SIMULINK, show that the modal-adaptive control of the drive successfully achieved great performance, excluding the effect of the backlash and the effective suppression of the wind loads on the telescope. The description of the radio telescope used in this article, excluding the fourth weight –the counterweight.

The keywords: three-mass system, modal control, adaptive control, electrical drive with elastic coupling.

Практические задачи управления многими промышленными механизмами предполагают регулирование скорости и положения исполнительного механизма, соединенного с электроприводом через упругую кинематическую передачу, содержащую зазор. К такого рода объектам управления относят опорно-поворотные устройства различного назначения, металлообрабатывающие станки, механизмы металлургического производства и т.п. Системы регулирования для них рационально строить по принципу электромеханической выборки зазора на основе реверсивных многодвигательных электроприводов, с индивидуальными силовыми преобразователями, с учетом упругих механических передач от электродвигателей к общей массе.

<sup>2</sup> Описание радиотелескопа приведено в этой статей без учета четвёртой массы – противовеса [2].

К числу основных требований, предъявляемых к указанным электроприводам, относятся высокие показатели надежности работы, а также точности и быстродействия при управлении движением общей массы [1].

Известны способы управления двухдвигательным электроприводом с зазорами в кинематических передачах по принципам электромеханического торсиона (распора), как указано в литературе [2–4], и подчиненного регулирования координат (тока и скорости), основанные на раздельном формировании управляющих воздействий на каждый электродвигатель, в зависимости от разности заданного и действительного значений скорости общей массы, применении корректирующих воздействий на электродвигатели по сумме их скоростей таким образом, что в определенном диапазоне скоростей и моментов нагрузки общей массы электродвигатели развивают моменты разного знака (направления), исключая тем самым влияние зазоров на динамику системы, а за пределами этого диапазона работают в тандеме, развивая одинаковые по величине и знаку моменты и обеспечивая тем самым максимальную перегрузочную способность объединенного электропривода [1].

Математическое описание трехмассового объекта радиотелескопа включает в себя: инерционность первой массы – двигателя; упругая механическая связь с зазором между первой и второй массой; инерционность второй массы – платформы; упругая механическая связь между второй и третьей массой; инерционность третьей массы – главного зеркала [2].

На рисунке 1 показана общая структурная схема объекта с регулятором скоростью, где управление по контуру скорости включает в себя модальный регулятор и адаптивное управление с эталонной моделью.

Для радиотелескопа характерно наличие таких внешних и внутренних возмущений как влияние зазора, упругости и ветра, из-за которых возникают колебательные процессы в электрической и механической частях электропривода, что приводит к их повышенному износу, снижению надежности системы и ухудшению качества управления движением рабочего органа. При этом в системах упругие звенья в кинематических передачах приводят к еще более значительному ухудшению показателей качества и надежности работы САУ.

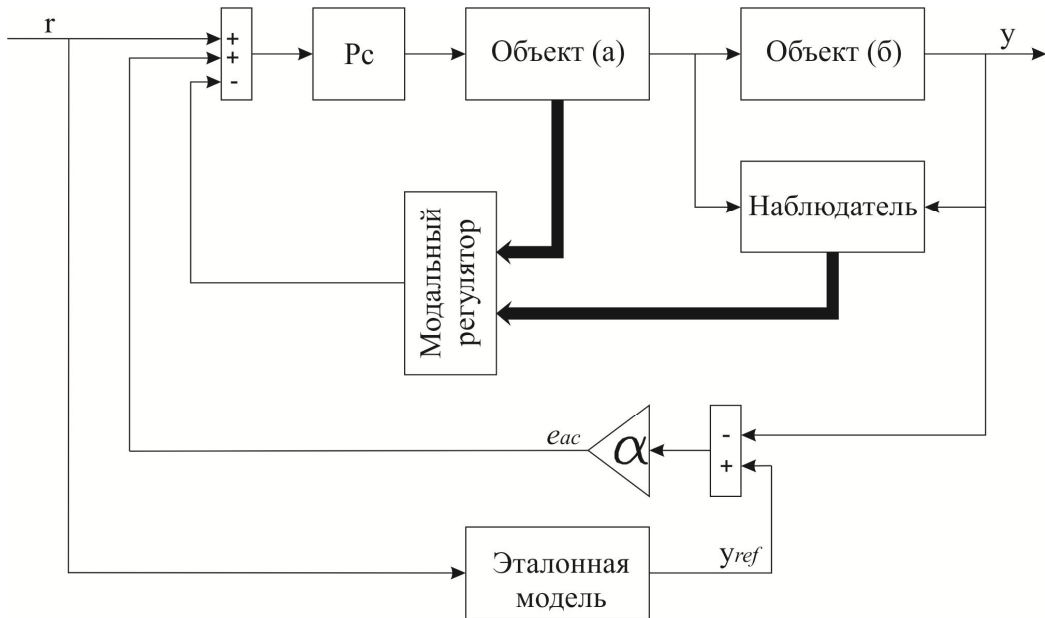


Рис. 1. Структурная схема системы управления радиотелескопа с модально-адаптивным регулятором  
Составленные дифференциальные уравнения объекта:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = \frac{1}{J_1}(r - M_{21}); \\ \dot{M}_{21} = c_{21}(\omega_1 - \omega_2); \\ \dot{\omega}_2 = \frac{1}{J_2}(M_{21} - M_{32}); \\ \dot{M}_{32} = c_{32}(\omega_2 - \omega_3); \\ \dot{\omega}_3 = \frac{1}{J_3}(M_{32} - M_c); \end{cases}$$

Исходя дифференциальных уравнений, составляется векторно-матричное описание радиотелескопа:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du, \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{J_1} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & 0 & -c_{21} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & \frac{-1}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & c_{32} & 0 & -c_{32} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_3} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1], D = 0,$$

где  $x = [\omega_1 \ M_{21} \ \omega_2 \ M_{32} \ \omega_3]$ .

Для расчета модального регулятора объект управления разбивается на две части:

– объект (а) с непосредственными обратными связями, поскольку скорости двигателя  $\omega_1$  и платформы  $\omega_2$  и момент упругости  $M_{21}$  измеряются датчиками (см. рисунок 2 (а)).

– объект (б) с обратными связями по идентифицированным переменным от наблюдателя (см. рисунок 2 (б)). По всем, таким образом, полученным обратным связям рассчитывается модальный регулятор для управления объектом пятого порядка.

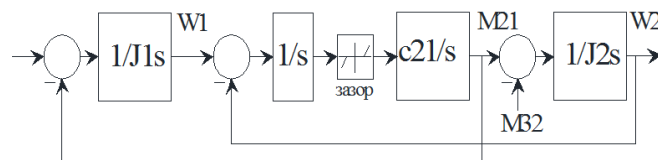
Для определения коэффициентов модального регулятора принято распределение корней характеристического уравнения по стандартной форме Баттерворта [3], доставляющего минимум интеграла от квадрата ошибки. Среднегеометрический корень для трехмассовой модели равен  $\omega_0 = 24\text{c}^{-1}$ .

При расчетах модального регулятора на основе трехмассовой модели использованы матрицы пятого порядка. Расчеты выполнены по команде PLACE – «Желаемое размещение полюсов системы», MATLAB. Кроме того, в регулятор контура скорости, замкнутого по скоростям двигателя и второй и третьей масс, добавлен коэффициент [4]:

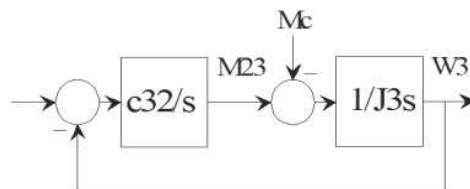
$$k_{p,c} = k_1 + k_2 + k_3 = 70.4 + 131.685 + 10.834 = 212.919,$$

а коэффициенты обратных связей модального регулятора по скоростям поделены на этот коэффициент, т.е. определяются как  $k_i' = k_i / k_{p,c}$  при  $i = 1, 3, 5$ . С учетом сказанного получены значения коэффициентов модального регулятора для трехмассовой модели:

$$K = [0.33 \quad 61.217 \quad 0.615 \quad -11.694 \quad 0.051]$$



а) объект а – включает в себя: двигатель –  $J_1$ ; платформа –  $J_2$ ; коэффициент упругости механической связи –  $c_{21}$ ; зазор



б) объект б – включает в себя: главное зеркало –  $J_3$ ; коэффициент упругости механической связи –  $c_{32}$ ; возмущение ветра –  $M_c$

Рис. 2

Поскольку наблюдатель построен по описанию объекта (б), уравнения наблюдателя будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{32} &= c_{32}(\hat{r} - \hat{\omega}_3) + l_1 \hat{\omega}_3, \\ \dot{\hat{\omega}}_3 &= \frac{M_{32}}{J_3} + l_2 \hat{\omega}_3, \end{aligned} \quad \text{где } \hat{r} = \omega_2,$$

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$y = Cx + Du,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & l_1 - c_{32} \\ \frac{1}{J_3} & l_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} c_{32} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \quad 1], \quad D = 0,$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix},$$

где  $L$  – коэффициенты наблюдателя, значения коэффициентов при  $\omega_0 = 100 \text{ с}^{-1}$  таковы  $L = [4807.4 \quad 210]^T$ .

Такой подход в синтезе модального регулятора обеспечивает устранение влияния упругости и зазора [5] на объекте. Таким образом, система наведения радиотелескопа сохраняет качество управления, в случае изменения параметров объекта во времени на 200–300 %.

Для устранения влияния ветра на объект используется адаптивное управление с эталонной моделью [6]. Ошибка между значениями на выходе объекта и эталонной модели поставляется в контур скорости с коэффициентом усиления, см. рисунок 1. Эталонная модель является передаточной функцией первого порядка  $1/s+1$ .

Ошибка адаптации равна  $e_{ac} = \alpha (y_{ref} - y)$ , где  $e_{ac}$  – ошибка на выходе эталонной модели и объект,  $\alpha$  – коэффициент усиления,  $y_{ref}$  – выходной сигнал эталонной модели,  $y$  – выходной сигнал объекта.

На рисунке 3 результаты получены в среде MATLAB-SIMULINK, в виде переходных процессов скоростей при задании скорости 5 рад/с, с адаптацией (withMR) и без адаптации (withoutMR). Сигнал возмущения приложен на 10 секунде и составляет 10 % от номинального значения двигателя, т.е.  $M_c = 0.1 \cdot 356 = 35.6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

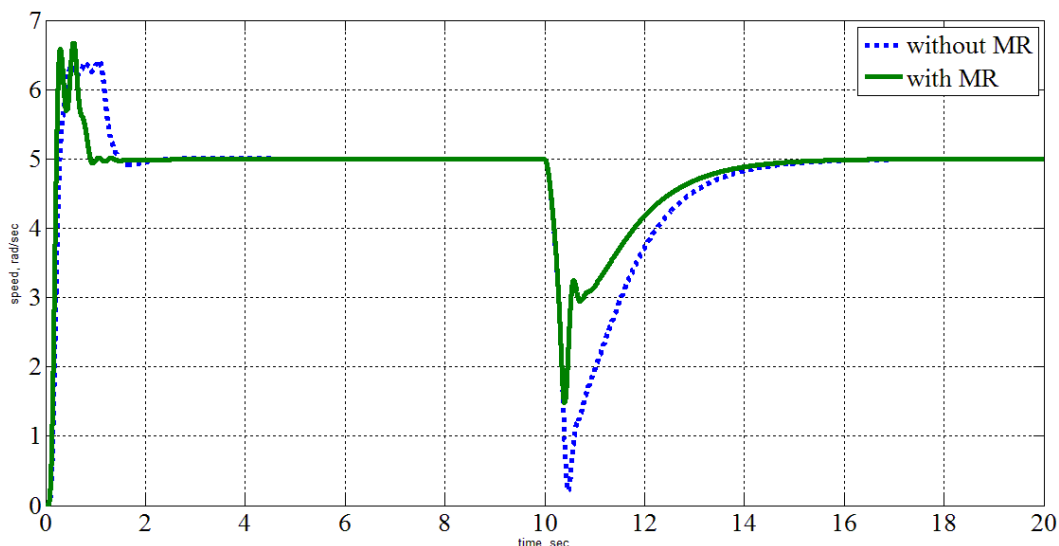


Рис. 3. Переходный процесс скорости главного зеркала при задании 5 рад/с и задания возмущения 35,6 Н.м в 10 секунд

Адаптивное управление обеспечивает больше быстродействия объекту, также система успешно устраняет действие ветра на объекте. Подобный подход даст высокую точность наведения и робастность против различных возмущений или изменения параметров объекта.

#### Список литературы

1. Иванков В. А., Тарарыкин С. В., Тютиков В. В., Красильникъянц Е. В. Модальное управление взаимосвязанными электроприводами с упругими звеньями и зазорами в кинематических передачах // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново: Вестник ИГЭУ, 2006. – № 3 – С. 43–48.
2. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Академия, 2006. – 272 с. ISBN 5-7695-2306-9.
3. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. Машиностроение. – 1976. – 184 с.
4. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями // Энергия. – 1992. – 288 с. ISBN 5-283-04544-7.
5. Avinash Taware and Gang Tao, Control of sandwich nonlinear systems. – 2003. – Springer. – 238 p. ISBN 3-540-44115-8.
6. Gang Tao, Adaptive control: Design and Analysis // John Wiley & Sons. – 2003. – 640 p. ISBN 0-471-27452-6.

#### Рецензенты:

Поляхов Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Зубков Василий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.