

Разработка метода компенсации момента сухого трения в системе управления электроприводами радиотелескопа на основе прогнозирующего регулятора

Ч. Х. Фьонг¹, М. П. Белов², Н. В. Лань³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

¹tranhphuong83@gmail.com, ²milesa58@mail.ru, ³lanhnavy@gmail.com

Аннотация. Рассматривается подход к компенсации момента сухого трения в следящих системах управления электропривода радиотелескопа на инфранизких скоростях, использующий прогнозирующий регулятор в контуре скорости. Описывается способ аппроксимации момента сухого трения, использующего непрерывные тригонометрические функции. Результаты моделирования показывают, что метод компенсации момента сухого трения на основе прогнозирующего управления по моделям позволяет обрабатывать заданное перемещение электропривода радиотелескопа с минимальной ошибкой.

Ключевые слова: следящий электропривод; радиотелескоп; сухое трение; прогнозирующий регулятор

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей автоматизированных систем управления электроприводами (АСУ ЭП) радиотелескопа, как объекта управления, является наличие значительных моментов трения в движущихся частях конструкции, имеющей большие размеры, вес и сложную конфигурацию [2]. Момент трения, носящий нелинейное возмущающее воздействие, состоит из двух составляющих: момента сухого трения и момента вязкого трения. При слежении движения на инфранизких скоростях порядка угловых секунд в секунду можно пренебречь влиянием момента вязкого трения.

При математическом описании момента сухого трения наиболее широко используется метод Амонтона-Кулона, который называется моментом кулоновского или классического сухого трения. Данный момент сухого трения может быть записан в виде

$$M_{Ti} = M_{f0} \operatorname{sgn}(\omega_i); \quad (1)$$

где M_{f0} – коэффициент момента кулоновского трения, $M_{f0} = (0.1 \dots 0.3)M_d$; M_d – номинальный момент двигателя; ω_i – скорость исполнительного органа. Кулоновское сухое трение, представляющееся релейной

функцией с нелинейной характеристикой силы сопротивления, зависящей от скорости, изображено на рис. 1, а.

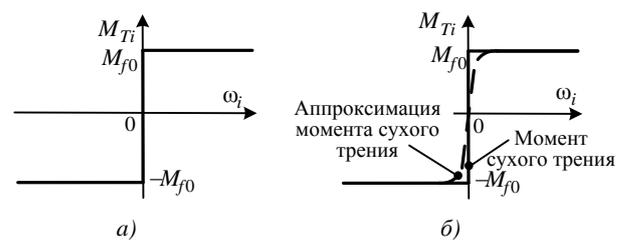


Рис. 1. Модели момента сухого трения

Анализируя поведение момента сухого трения, изображенного на рис. 1, а, отметим, что его характер описывается релейным звеном при скорости, равной нулю. Этот характер вызывает явление гистерезиса при скорости исполнительного органа, близкой к нулю, приводящее к циклическим ошибкам положения. Одним из способов компенсации этого явления является непрерывная аппроксимация релейной функции методом линеаризации. При этом функция $\operatorname{sgn}(x)$ аппроксимируется гладкой, непрерывной и дифференцируемой функцией с конечным наклоном [4]. В частности, тригонометрическая функция $\tanh(x)$ рассматривается как наиболее подходящая функция для формирования аппроксимации релейной функции $\operatorname{sgn}(x)$. При этом выражение (1) может быть переписано как

$$M_{Ti} = M_{f0} \tanh(\sigma\omega_i); \quad (2)$$

где σ – положительный коэффициент, характеризующий наклон функции, который может быть свободно выбран. При увеличении коэффициента σ реакция функции $\tanh(\sigma\omega_i)$ сходится с реакцией функции $\operatorname{sgn}(\omega_i)$.

Графики, сравнивающие аппроксимацию $\tanh(\sigma\omega_i)$ поведения сухого трения с функцией $\text{sgn}(\omega_i)$, представлены на рис. 1, б, где $\sigma=10$. Эта аппроксимация момента сухого трения будет использоваться в задаче построения системы управления электроприводами радиотелескопа с применением алгоритма прогнозирующего управления по моделям.

II. МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ МОМЕНТА СУХОГО ТРЕНИЯ

Структурная схема следящей системы азимутальной оси электропривода радиотелескопа приведена на рис. 2. Здесь система управления электропривода построена по каскадному принципу регулирования.

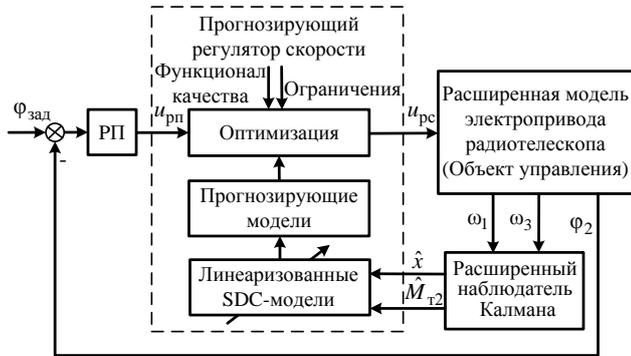


Рис. 2. Структурная схема АСУ ЭП радиотелескопа

Рассматриваемый электропривод радиотелескопа, как объект управления, представляет собой четырехмассовую упруго-вязкую механическую конструкцию [1]. Его расширенную математическую модель можно записать в виде

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = J_{13}^{-1} (M_d - M_{21}); \\ \dot{M}_{21} = c_{213} (\omega_1 - \omega_2); \\ \dot{\omega}_2 = J_2^{-1} (M_{21} - M_{32} - M_{42} - M_{т2}); \\ \dot{M}_{32} = c_{32} (\omega_2 - \omega_3); \\ \dot{\omega}_3 = J_3^{-1} M_{32}; \\ \dot{M}_{42} = c_{42} (\omega_2 - \omega_4); \\ \dot{\omega}_4 = J_4^{-1} M_{42}; \\ M_d = 2k_{дт}^{-1} c_d u_{рс}, \end{cases} \quad (3)$$

где первая масса – двигатель (J_{13}), двухдвигательный привод заменен на эквивалентный однодвигательный; вторая масса – платформа (J_2), на которой смонтирован привод поворота главного зеркала; третья масса – главное параболическое зеркало (J_3); четвертая масса – противовесы (J_4), уравнивающие зеркало при

перемещении его по углу места; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – скорости каждой массы; $M_d, M_{21}, M_{32}, M_{42}$ – момент двигателя и моменты упругих связей между массами; c_{213}, c_{32}, c_{42} – коэффициенты жесткости механической части; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – скорости каждой массы; $k_{дт}$ – коэффициент передачи токового регулирования, представляющегося пропорциональным регулятором; c_d – конструктивный коэффициент двигателя; $u_{рс}$ – оптимальный управляющий сигнал на выходе прогнозирующего регулятора скорости, действующий на объект управления.

Здесь прогнозирующим регулятором является контур регулирования скорости, замыкающийся по вектору состояния объекта управления с помощью расширенного наблюдателя Калмана. Внешним по отношению к контуру скорости является контур регулирования положения (РП), замыкающийся по угловому положению платформы (Φ_2). Регулирование положения представлено пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором, настроенным на оптимум по модулю. Выходной сигнал регулятора положения представляет собой сигнал задания скорости ($u_{рс} = \omega_{зад}$). На входе регулятора положения сравниваются задающий сигнал положения ($\Phi_{зад}$) и истинное значение углового положения (Φ_2), определенного с использованием датчика положения на платформе.

В системе уравнений (3) учтен нелинейный характер типа момента сухого трения $M_{т2}$, как возмущающее воздействие, где $M_{т2} = M_{f0} \tanh(\sigma\omega_2)$. Исключение влияния момента сухого трения в кинематической цепи привода приводится с помощью закона прогнозирующего управления по моделям при синтезе контура регулирования скорости. Предположим, что параметры переменных состояния объекта управления оцениваются с помощью расширенного наблюдателя Калмана. На рис. 2 видно, что прогнозирующий регулятор состоит из трех блоков: блок расширенной линеаризации, блок прогнозирующих моделей, блок оптимизации для поиска оптимального управляющего воздействия по алгоритму квадратичного программирования. Математический подход к синтезу дискретного прогнозирующего управления по моделям был представлен в работах [3, 5].

Получим линеаризованную дискретную модель состояния объекта, представленную в виде

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k); \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k), \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{x}(k) = [\omega_1 \ M_{21} \ \omega_2 \ M_{32} \ \omega_3 \ M_{42} \ \omega_4]^T$;

$$\mathbf{B}(k) = \left[2T_s J_{13}^{-1} c_d k_{дт}^{-1} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T;$$

$C(k) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$; T_s – период дискретности;

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & -T_s J_1^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_s c_{213} & 1 & -T_s c_{213} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_s J_2^{-1} & a_{33} & -T_s J_2^{-1} & 0 & -T_s J_2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & T_s c_{32} & 1 & -T_s c_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -T_s J_3^{-1} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_s c_{42} & 0 & 0 & 1 & T_s c_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_s J_4^{-1} & 1 \end{bmatrix};$$

$$a_{33} = 1 - T_s J_2^{-1} M_{f0} \sigma (1 - \tanh^2(\sigma \omega_2)).$$

Функционал качества объекта управления может быть записан в форме

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} (\omega_{зад}(k+i) - \omega_3(k+i))^T Q_i (\omega_{зад}(k+i) - \omega_3(k+i)) + \sum_{j=0}^{N_c-1} \Delta u_{pc}(k+j)^T R_j \Delta u_{pc}(k+j); \quad (5)$$

где N_p – горизонт предсказания, для которого формируются прогнозирующие модели; N_c – горизонт управления, который представляется фиксированными значениями управляющего воздействия; $\Delta u_{pc}(k+j) = u_{pc}(k+j) - u_{pc}(k+j-1)$ – приращение оптимального управляющего сигнала; $Q_i \geq 0, R_j > 0$ – весовые диагональные матрицы.

Чтобы рассмотреть влияние момента сухого трения на работу электропривода радиотелескопа, ограничение на скорость главного зеркала (третьей массы) выбрано в диапазоне инфранизких скоростей, т.е. $|\omega_3(k+i)| \leq \omega_{3max}$ при $i = 1, 2, \dots, N_p$.

После процесса минимизации функционала качества (5) с помощью алгоритма квадратичного программирования получим оптимальный управляющий сигнал $u_{pc}^*(k)$, определяемый в виде

$$u_{pc}^*(k) = u_{pc}(k-1) + \Delta u_{pc}^*(k|k); \quad (6)$$

где $\Delta u_{pc}^*(k|k)$ – первый элемент вектора приращения оптимального управляющего сигнала.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

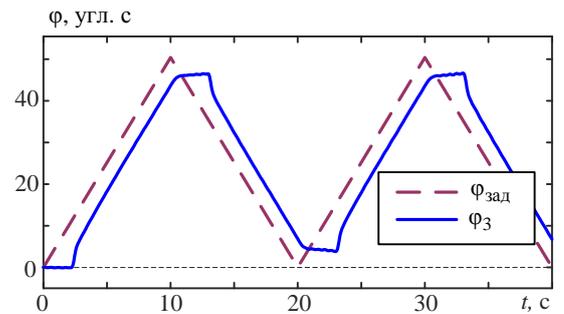
Моделирование работы АСУ ЭП наведения радиотелескопа типа РТ-70 разработано в среде MATLAB/Simulink с параметрами прогнозирующего регулятора, представленными в табл. 1.

Электромеханические параметры электропривода радиотелескопа РТ-70 подробно представлены в [5]. В данной статье проводится исследование влияния момента сухого трения в режиме инфранизких скоростей порядка угловых секунд в секунду, соответствующих диапазону движения "медленно" АСУ ЭП радиотелескопа РТ-70.

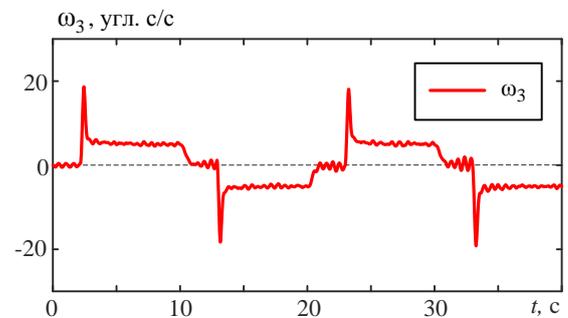
Таблица 1

Параметр	Обозначение	Величина
Период дискретности, с	T_s	0.001
Горизонт предсказания	N_p	15
Горизонт управления	N_c	10
Весовая матрица состояний	$diag[Q_i]$	2.45
Весовая матрица управления	$diag[R_j]$	0.07
Ограничения на скорость зеркала, угл. с/с	$\omega_{3 \min}$	-20
	$\omega_{3 \max}$	20
Коэффициент момента кулоновского трения, Н·м	M_{f0}	1500

Моделирование следящей системы электропривода производится в контуре регулирования положения (см. рис. 2). На входе регулятора положения подается задающий треугольный сигнал угла, линейно изменяющее значение со скоростью равной 5 угл. с/с. Результаты моделирования АСУ ЭП радиотелескопа без компенсации и с компенсацией момента сухого трения приведены на рис. 3, рис. 4.

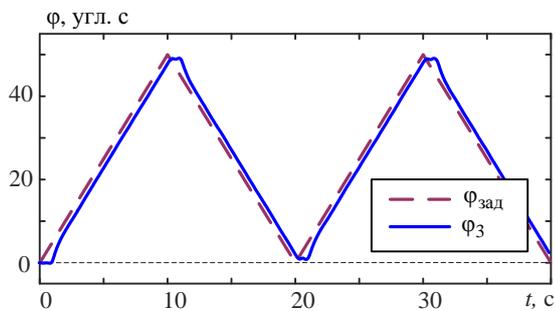


а) Оциллограммы углового перемещения главного зеркала

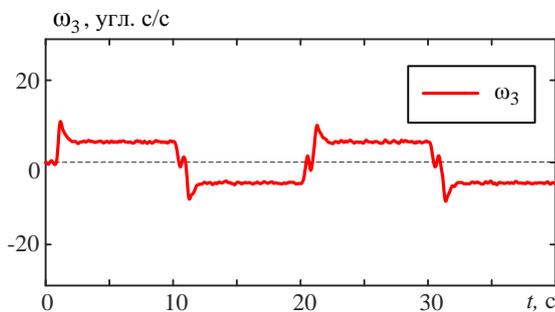


б) Оциллограмма скорости главного зеркала

Рис. 3. Реакция электропривода без компенсации момента сухого трения



а) Осциллограммы углового перемещения главного зеркала



б) Осциллограмма скорости главного зеркала

Рис. 4. Реакция электропривода с компенсацией момента сухого трения

На рис. 3 и рис. 4 изображены временные осциллограммы реакции следящей системы электропривода главного зеркала без компенсации (см. рис. 3, а, б) и с компенсацией момента сухого трения (см. рис. 4, а, б). Проводя анализ результатов следящей системы положения, представленных на рис. 3, а и рис. 4, а, видно, что компенсация момента сухого трения

позволяет обрабатывать заданное перемещение электропривода главного зеркала с минимальной ошибкой.

При анализе временных осциллограмм следящей системы скорости главного зеркала (ω_3), представленных на рис. 3, б и рис. 4, б, видно, что при компенсации момента сухого трения уменьшается время переходного процесса и компенсируется явление гистерезиса при скорости главного зеркала, близкой к нулю.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрен метод компенсации момента сухого трения в следящих системах управления электропривода радиотелескопа на основе прогнозирующего управления по моделям. Результаты данной работы показали, что компенсация момента сухого трения позволяет повысить точность обработки заданных координат осей объекта управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. СПб.: Академия, 2006. 272 с.
- [2] Gawronski W.K., Parvin B. Radiotelescope Low Rate Tracking Using Dither//AIAA Journal of Guidance Control and Dynamics. Vol. 21. 1998. P. 1111-1128.
- [3] Cychowski M.T., Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Constrained Model Predictive Control of the Drive System with Mechanical Elasticity//IEEE Trans. on Industrial Electronics. Vol. 56. 2009. P. 1963-1973.
- [4] Scholing I., Orlik. B. Control of a nonlinear two-mass system with uncertain parameters and unknown states// In Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 2000. P. 1096-1103.
- [5] Tran Huu Phuong, Belov M.P., Doan Van Thuy. Adaptive Model Predictive Control for Nonlinear Elastic Electrical Transmission Servo Drives //In 2019 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW). 2019. P. 704-708.