

УДК 681.5

Способ гашения автоколебаний в приводах мехатронных устройств

В.А. Калядин, М.М. Стебулянин

Рассмотрены условия возникновения автоколебаний в приводе перемещения с учетом упругости и люфта в механической передаче. Предложен способ борьбы с автоколебаниями в мехатронной системе.

Ключевые слова: мехатронный модуль, автоколебательный процесс, механическая передача, упругий элемент.

Method for oscillations damping in drives of mechatronic devices

V.A. Kalyadin, M.M. Stebulyanin

The conditions to arise auto-oscillations are considered for the servo drive having an elastic object characteristic and a backlash in the mechanical transmission. The method for auto-oscillation damping is suggested.

Keywords: mechatronic module, auto-oscillation, mechanical transmission, elastic object.

Для решения различных технических задач все большее распространение получают модульные мехатронные системы. Актуальные проблемы мехатронных систем, принципы их построения и тенденции развития, в том числе в конкретных технологических приложениях, достаточно полно освещены в работах [1–5]. В настоящее время принципы мехатроники, такие, как, миниатюризация и агрегатирование, распространяются в смежные области техники, например, в робототехнику.

В робототехнических системах следящие приводы (СП) строятся на основе обратной связи (ОС) с вала двигателя. Структура такого СП представлена на рис. 1. Однако, при данной структуре существует не-регулируемая статическая ошибка между заданным и реальным по-



КАЛЯДИН
Владимир Анатольевич
аспирант



СТЕБУЛЯНИН
Михаил Михайлович
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Робототехника и мехатроника»
(ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин»)
e-mail:
vladimirkaliadin@gmail.com

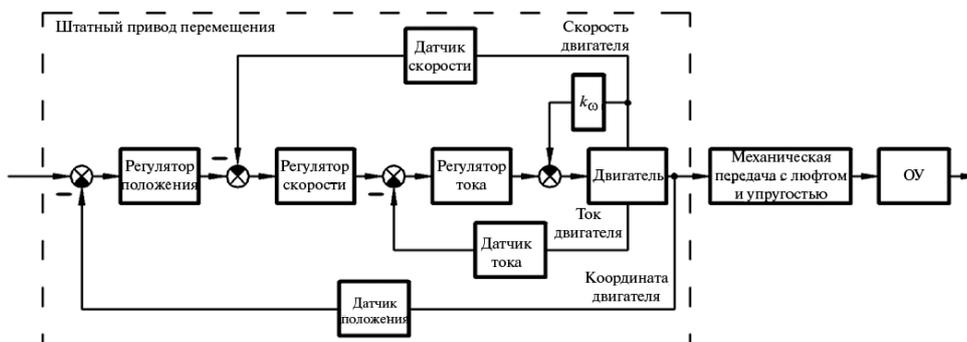


Рис. 1. Структурная схема следящего привода



Рис. 2. Следящий привод с дополнительным контуром управления

ложением вала объекта управления (ОУ) вследствие наличия зазора в механической передаче.

Согласно [1], для построения прецизионного СП технологического робота можно использовать охваченный внешним контуром ОС по положению вала ОУ пропорционально-интегральный регулятор и люфтовыбирающее устройство (рис. 2).

Применение данных средств повышает точность исполнения движений и существенно уменьшает влияние нелинейных свойств механической передачи. Однако, реализация средств коррекции не всегда возможна, например, в типовом мехатронном модуле мотор-редуктор двигатель с механической передачей находятся в едином корпусе и представляют собой единое устройство для реализации движения, поэтому в данном случае ОС возможно осуществлять только по выходному валу.

Для оценки возможности появления автоколебаний в мехатронной системе, построим модель привода однокоординатного перемещения, в котором мехатронный модуль охвачен системой последовательных корректирующих устройств. Главная ОС замыкается при помощи датчика положения вала ОУ (рис. 3).

На рисунке 4 представлена соответствующая структурная схема системы автоматического управления (САУ) движением ОУ, где регуляторы скорости и положения реализованы П-регуляторами, регулятор тока — ПИ-регулятором.

Передаточные функции $W_{p.п}$, $W_{p.с}$, $W_{p.т}$ регуляторов положения, скорости и тока соответственно равны:

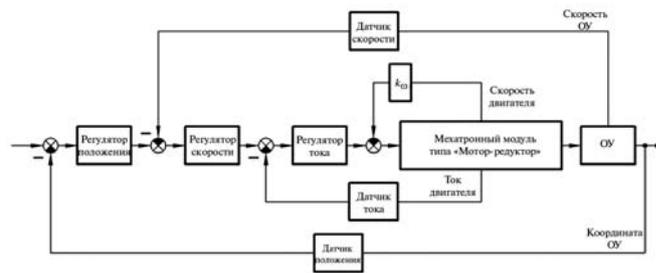


Рис. 3. Мехатронный модуль в составе следящего привода

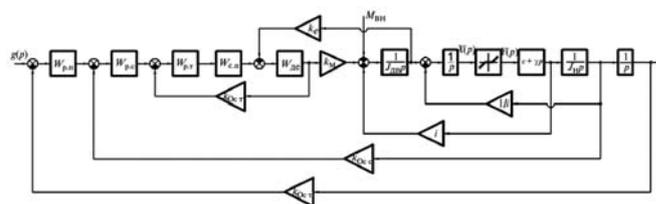


Рис. 4. Структурная схема САУ

$$W_{p.п} = k_{p.п}; W_{p.с} = k_{p.с}; W_{p.т} = k_{p.т} \frac{T_{p.т} p + 1}{T_{p.т} p},$$

где $T_{p.т} = T_e = \frac{L_{я}}{R_{я}}$; $L_{я}$ — индуктивность обмотки якоря; $R_{я}$ — сопротивление обмотки якоря.

Передаточные функции силового преобразователя и двигателя имеют вид

$$W_{c.п} = \frac{k_{c.п}}{T_{c.п} p + 1}; W_{дв} = \frac{1}{R_{я}(T_e p + 1)},$$

где $T_{c.п} = \frac{1}{f_{шим}}$; $k_{c.п} = \frac{U_{я}}{U_{вх}}$, $T_e = \frac{L_{я}}{R_{я}}$ — напряжение обмотки якоря двигателя; $U_{вх}$ — входное напряжение силового преобразователя.

Механические элементы характеризуются следующими величинами:

$J_{дв}$ — момент инерции вала двигателя;

$J_{н}$ — момент инерции ОУ;

c, χ — коэффициенты упругости и демпфирования упругого элемента;

i — передаточное отношение редуктора.

Для примера примем следующие значения параметров:

$$k_e = k_m = 0,0814; L_{я} = 0,0005 \text{ Гн}; R_{я} = 0,5 \text{ Ом};$$

$$U_{я} = 36 \text{ В}; I_{ном} = 7 \text{ А}; J_{д} = 0,000277 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{н} = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; i = 2; c = 10\,000 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}};$$

$$\chi = 10 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

Величины коэффициентов и постоянных времени рассчитываем по стандартной методике построения корректирующих устройств [2]:

$$W_{p.c} = 44,17; W_{p.п} = 0,06; W_{p.т} = 60 \left(\frac{0,001p + 1}{p} \right);$$

$$W_{дв} = \frac{2}{0,001p + 1}; W_{c.п} = \frac{3,6}{0,00005p + 1};$$

$$k_{oc.п} = 318,32; k_{oc.c} = 0,017; k_{oc.т} = 1,43.$$

Обозначив

$$W_1(p) = 1 + k_{oc.т} W_{p.т}(p) W_{c.п}(p) W_{дв}(p);$$

$$W_2(p) = \frac{W_1(p)}{W_1(p) + k_e k_m W_{дв}(p)};$$

$$W_3(p) = (1 - W_1(p))^{-1} W_{p.c}(p) \frac{k_m}{k_{oc.т}} W_2(p) \frac{1}{J_{дв} p},$$

преобразуем структурную схему к виду, изображенному на рис. 5.

Запишем уравнения в изображениях входного сигнала $X(p)$ и выходного сигнала $Y(p)$ нелинейного элемента:

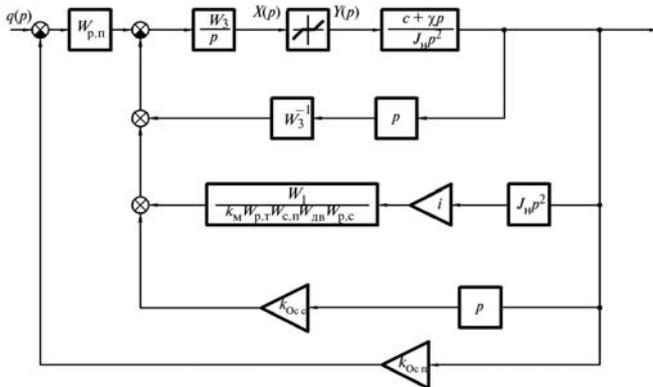


Рис. 5. Преобразованная структурная схема

$$X(p) = -Y(p) \frac{c + \chi p}{J_{н} p^2} \times$$

$$\times \left(\frac{k_{oc.п}}{p} W_3(p) W_{p.п}(p) + k_{oc.c} W_3(p) + \frac{J_{н} i}{J_{дв}} W_2(p) + 1 \right);$$

$$Y(p) = W_{нэ}(p) X(p).$$

Для анализа устойчивости положим $g(p) = 0$, $M_{вн} = 0$ и представим данную систему в комбинированном виде, изображенном на рис. 6.

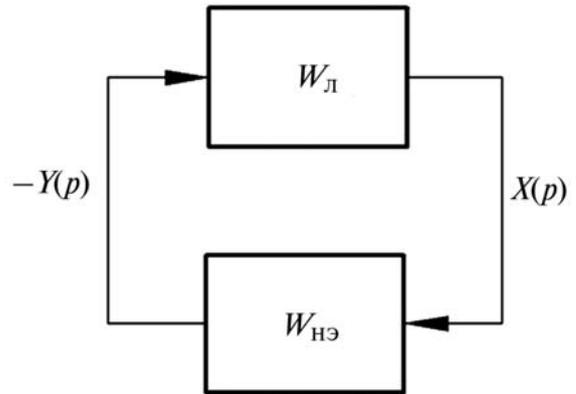


Рис. 6. Комбинированная система

Для определения возможности периодического цикла применим метод Гольдфарба. Записав уравнение гармонического баланса комбинированной системы $W_{л}(j\omega) = -\frac{1}{W_{нэ}(A)}$, выделим действительную и мнимую части частотной передаточной функции $W_{л}(j\omega)$ линейной части. Для рассматриваемого примера

$$U(\omega) = \text{Re } W_{л}(j\omega) =$$

$$= 144,4 \frac{\chi}{\omega} B(\omega) - 1764 \frac{\chi}{\omega^2} A(\omega) -$$

$$- 1799 \frac{c}{\omega^3} B(\omega) - 144,4 \frac{c}{\omega^4} A(\omega) - \frac{c}{\omega^2};$$

$$V(\omega) = \text{Im } W_{л}(j\omega) =$$

$$= -1799 \frac{\chi}{\omega^2} B(\omega) - 144,4 \frac{\chi}{\omega} A(\omega) - \frac{\chi}{\omega} -$$

$$- 144,4 \frac{c}{\omega^2} A(\omega) + 1764 \frac{\chi}{\omega^2} A(\omega), \quad (1)$$

где

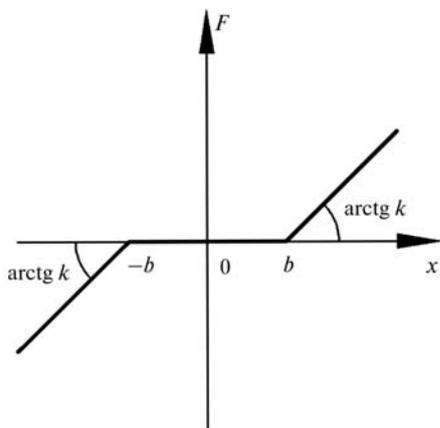


Рис. 7. Вид нелинейной характеристики звена «зона нечувствительности»

$$A(\omega) = \frac{[(-0,0015\omega^2 + 617,8)(-0,001524\omega^2 + 617,8) - (-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,62\omega^2)(-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,644\omega) - (-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,62\omega^2)(-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,644\omega)]}{\sqrt{[(-0,001524\omega^2 + 617,8)^2 + (-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,644\omega)^2]}}$$

$$B(\omega) = \frac{[(-0,0015\omega^2 + 617,8)(-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,644\omega^2) - (-0,001524\omega^2 + 617,8)(-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,62\omega)]}{\sqrt{[(-0,001524\omega^2 + 617,8)^2 + (-5 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 1,644\omega)^2]}}$$

Коэффициенты гармонической линеаризации нелинейного элемента (НЭ) (рис. 7) типа «зона нечувствительности» представлены ниже:

$$q(a) = k - \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{b}{a} + \frac{b}{a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \right);$$

$$q'(A) = 0, k = 1. \tag{2}$$

Построим годографы линейной (1) и нелинейной части системы (2) для различных коэффициентов регулятора положения соответственно в диапазонах: $\omega = 10 \dots 100$ при $W_{p.n} = k_{p.n}$, $\omega = 20 \dots 200$ при $W_{p.n} = 4k$ (рис. 8, 9).

На построенных АФЧХ (см. рис. 8, 9) видно, что в широком диапазоне изменения $k_{p.n}$, вплоть до границы устойчивости линейной час-

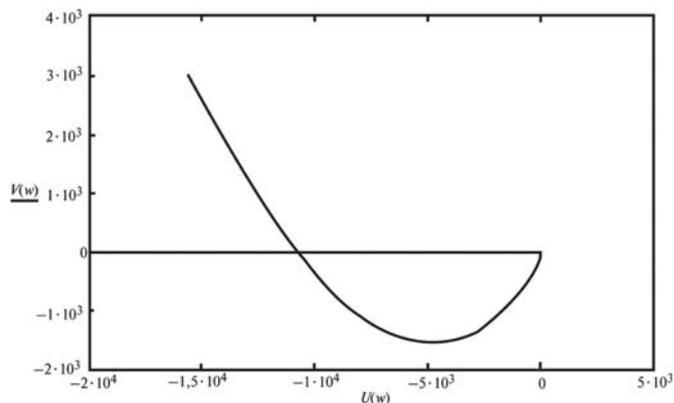


Рис. 8. АФЧХ линейной и нелинейно части системы $W_{p.n} = k_{p.n}$

ти системы, не удастся избежать пересечения годографов линейной и нелинейной частей системы; отсюда вывод — невозможность устранения автоколебаний средствами корректирующих устройств.

Для гашения автоколебаний введем в систему тормозную муфту. Данный блок создает воздействие на ОУ в соответствии с выбранной логикой.

Примем следующий закон изменения тормозного момента M_{top} :

$$M_{top} = \begin{cases} k_{top} \dot{\alpha}_n & \text{при } |i\dot{\alpha}_n| > |\dot{\alpha}_{дв}| \text{ и } |\alpha_3 - \alpha_n| \ge \delta, \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \tag{3}$$

где α_n — угловые перемещения ОУ; $\dot{\alpha}_n$ — скорость вращения ОУ; $\dot{\alpha}_{дв}$ — скорость вращения вала двигателя; α_3 — требуемый угол поворота ОУ; i — передаточное отношение редуктора; k_{top} — коэффициент.

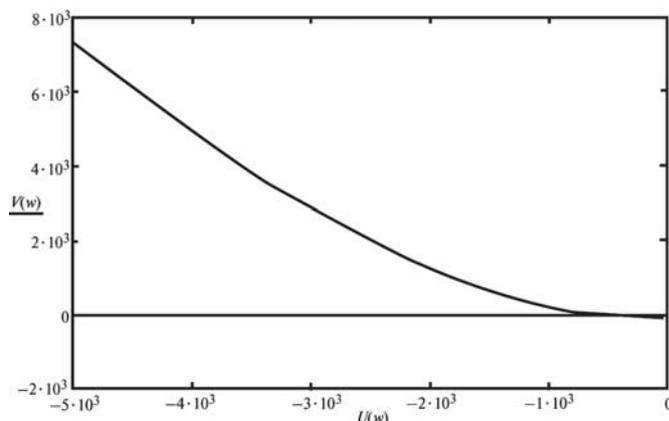


Рис. 9. АФЧХ линейной и нелинейной части системы при $W_{p.n} = 4k$

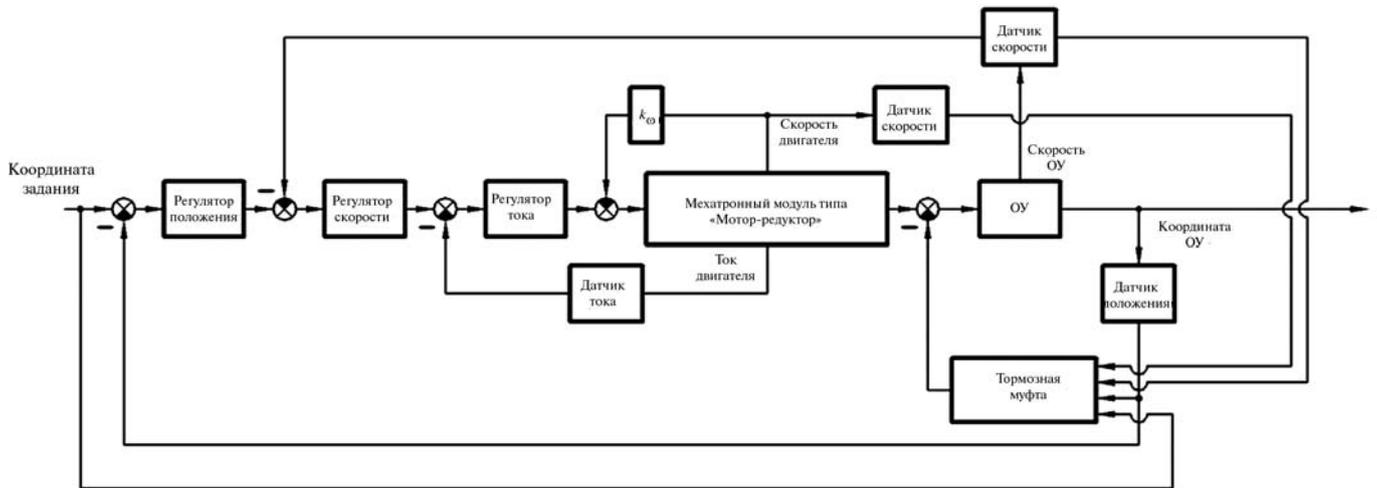


Рис. 10. Структура привода с тормозной муфтой

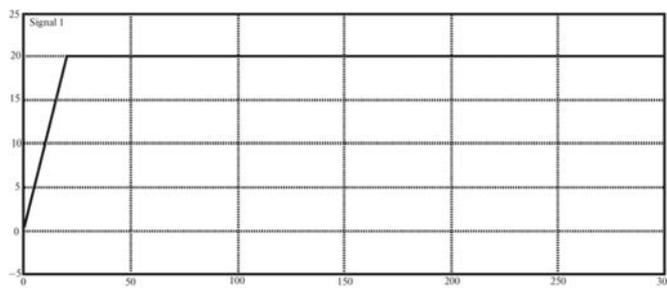


Рис. 11. Сигнал задания требуемого перемещения

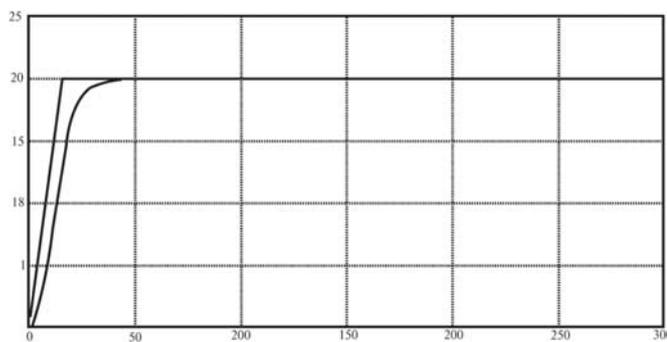


Рис. 12. Обработка сигнала задания традиционным приводом

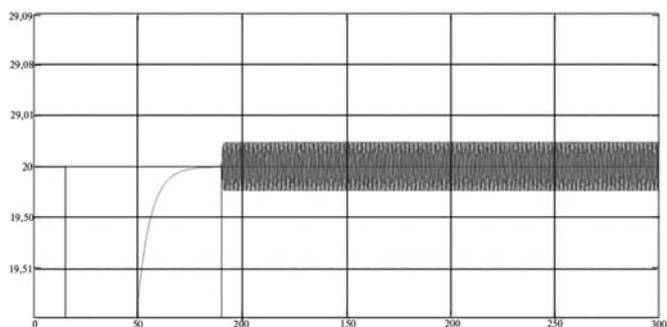


Рис. 13. Обработка сигнала задания традиционным приводом (увеличено)

Структура привода с коррекцией движения на основе тормозной муфты представлена на рис. 10.

Сравним результаты обработки перемещения традиционным приводом и приводом с блоком коррекции движения на основе тор-

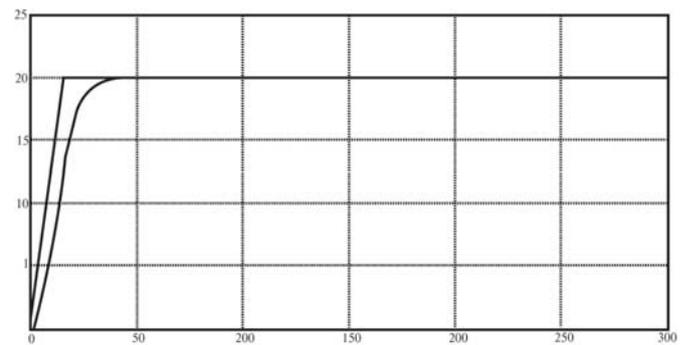


Рис. 14. Обработка сигнала задания приводом с включенной тормозной муфтой

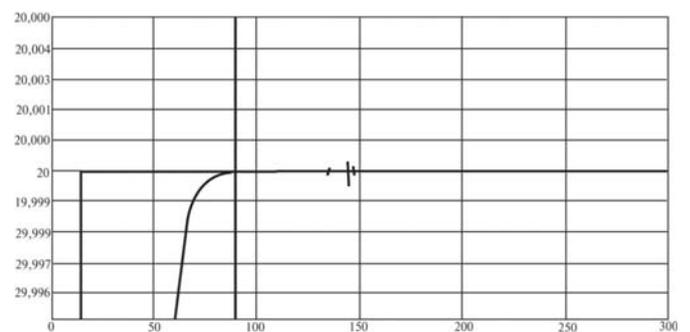


Рис. 15. Обработка сигнала задания приводом с включенной тормозной муфтой (увеличено)

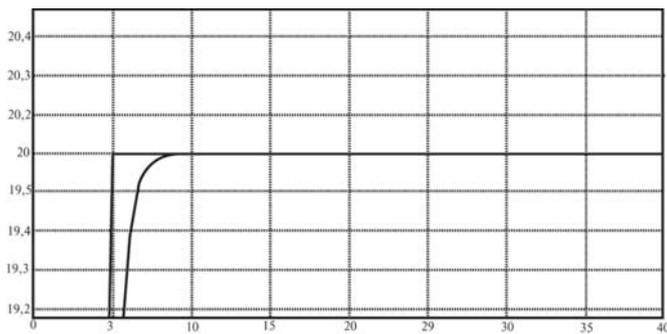


Рис. 16. Гашение автоколебаний при $T = 0,02$ с

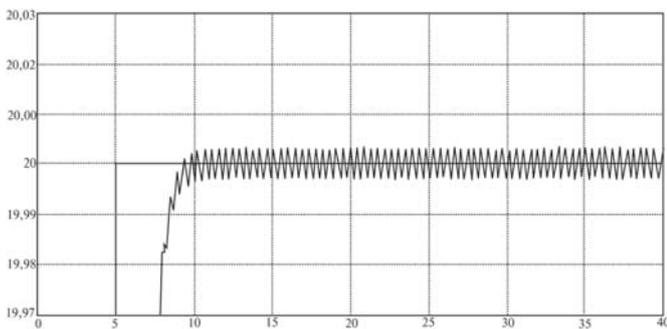


Рис. 17. Автоколебания при $T = 0,05$ с

мозной муфты. Моделирование проводилось в системе Matlab Simulink, результаты представлены на рис. 11–18.

Результаты моделирования показывают, что в однокоординатном приводе без блока коррекции в состоянии равновесия ОУ возникают автоколебания. В приводе с тормозной муфтой данные автоколебания отсутствуют.

Для учета динамики формирования тормозного момента введем апериодический формирователь усиления

$$W(p) = \frac{1}{Tp + 1}$$

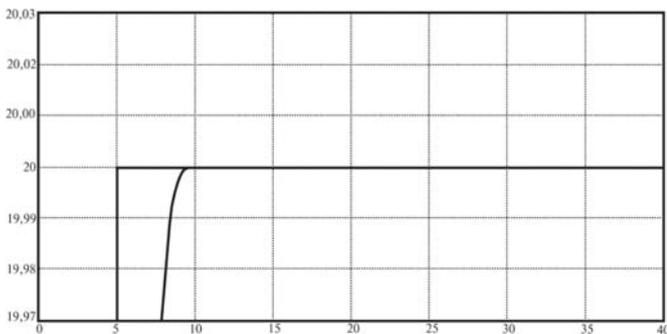


Рис. 18. Гашение автоколебаний при $T = 0,05$ с, $k_{\text{top}} = 1$

В результате моделирования установлено, что работоспособность блока коррекции на основе тормозной муфты сохраняется в узком диапазоне малых постоянных T (см. рис. 16, 17).

Однако, изменением коэффициента k_{top} можно добиться расширения данного диапазона значений (рис. 18).

Для проверки влияния момента тормозной муфты на отработку сложного задания на вход привода подавали гармонический сигнал разной частоты.

На рисунке 19, а изображена ЛАЧХ традиционного привода и привода с тормозной муфтой. Усиление, представленное на рис. 19, б, показывает,

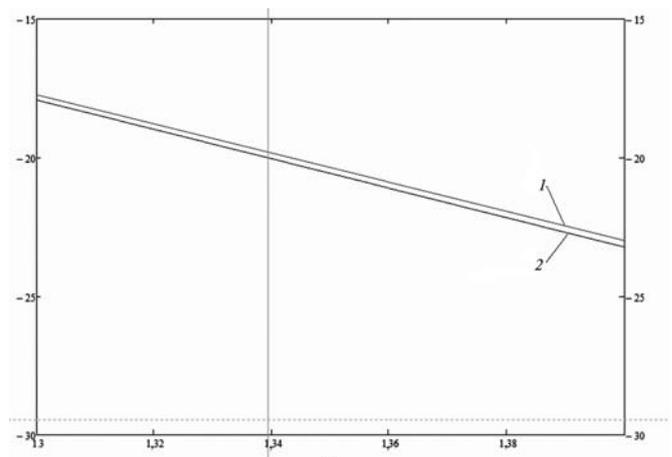
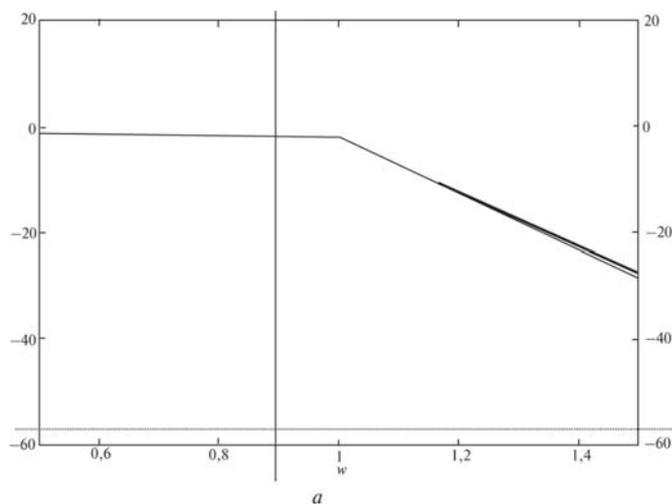


Рис. 19. ЛАЧХ приводов (увеличено):

- 1 — ЛАЧХ традиционного привода;
- 2 — ЛАЧХ привода с тормозной муфтой

что графики идут эквидистантно с расхождением $\approx 0,5$ Дб. Это означает, что муфта с логикой включения (3) практически не изменяет полосу пропускания привода.

Вывод

Для гашения автоколебательных циклов в приводах с люфтом и упругостью эффективно использование тормозной муфты, логика включения которой описана в работе. На примере моделирования показано, что при использовании тормозной муфты полоса пропускания не изменяется до частоты среза СП.

Литература

1. *Илюхин Ю.В.* Синергетический (мехатронный) подход к проектированию систем технологических роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2000. № 2. С. 7–12.
2. *Илюхин Ю.В.* Реализация мехатронного подхода при построении систем компьютерного управления

комплексов лазерной и плазменной резки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 10. С. 45–50.

3. *Подураев Ю.В.* Актуальные проблемы мехатронники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 50–53.

4. *Кулешов В.С., Подураев Ю.В.* Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5–10.

5. *Подураев Ю.В.* Анализ и проектирование мехатронных систем на основе критериев функционально-структурной интеграции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 4. С. 6.

6. *Илюхин Ю.В.* Создание высокоэффективных систем управления исполнительными движениями роботов и мехатронных устройств на основе технологически обусловленного метода синтеза: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. С. 198.

7. *Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.* Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 392 с.

Статья поступила в редакцию 12.09.2012