
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.11
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1066-1077

СИНТЕЗ ПОДЧИНЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ЗАДАННЫМ ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОСИ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

И. В. Шустов, В. А. Толмачев, С. Ю. Ловлин

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: od@mail.ifmo.ru*

С развитием техники непрерывно повышаются требования к точности воспроизведения машинами и механизмами заданных законов движения. Особенно отчетливо эта тенденция проявляется в следящих электроприводах исполнительных осей квантово-оптических систем. В условиях инфранизких скоростей движения, жесткости механизмов и воздействия на их массы переменных возмущающих моментов обеспечение высокой точности позиционирования исполнительных осей возлагается на систему управления. Представлена аналитическая методика настройки системы управления: рассмотрены ее вывод, графическая интерпретация и условия корректной работы. Методика позволяет одновременно повысить точность позиционирования исполнительных осей и сохранить такие достоинства подчиненной структуры системы управления, как удобство ограничения внутренних координат системы и возможность компенсации неидеальностей электродвигателя и силового преобразователя. Повышение точности позиционирования исполнительных осей достигается за счет увеличения полосы пропускания внутреннего контура регулирования скорости. Максимальная полоса пропускания последнего ограничивается на уровне, при котором величина перерегулирования его переходной характеристики не превышает некоторого заданного значения. Еще одним достоинством предлагаемой методики является более полный учет свойств объекта управления, в частности, внутреннего вязкого трения механизмов исполнительных осей. Приведенные результаты имитационного моделирования системы управления следящего электропривода угломестной оси квантово-оптического комплекса „Стажер-2 ОПУ ЛИК“ подтверждают правильность и эффективность методики.

Ключевые слова: *квантово-оптическая система, опорно-поворотное устройство, моментный электродвигатель, угломестная ось, двухмассовая система, сухое трение, демпфирование, следящий электропривод, подчиненная структура, диаграмма Вышнеградского, ПИД-регулятор*

Введение. Сложнейшим направлением прецизионного приборостроения является разработка следящего электропривода (СЭП) квантово-оптических систем (КОС) [1].

Основные элементы КОС, передающий импульсный лазер и принимающий оптический телескоп устанавливаются на общее опорно-поворотное устройство (ОПУ) альт-азимутального типа [2, 3]. Наведение оптической оси КОС осуществляется СЭП, встроенными в исполнительные оси (ИО) ОПУ. Получаемые при помощи КОС данные используются для об-

нарушения, контроля и прогнозирования движения космических объектов, координатно-временного обеспечения глобальных навигационных систем, а также мониторинга движения тектонических плит, в том числе с целью предсказания землетрясений и цунами [4—8].

Основным требованием к прецизионному электроприводу в рамках перечисленных задач является точное позиционирование ИО КОС, которое в условиях воздействия на массы ИО переменных ветровых нагрузок и моментов типа сухого трения система управления (СУ) СЭП возможно при высоком быстродействии. Однако на практике полоса пропускания устойчивой СУ СЭП ограничена наличием упругих связей между массами механизмов ИО.

Аналізу и синтезу подчиненных СУ СЭП ИО посвящены работы [9—12]. Достоинством таких СУ являются простота методик расчета коэффициентов регуляторов и возможность введения ограничения на изменение координат СЭП. Наличие внутреннего контура регулирования момента позволяет компенсировать влияние „мертвого времени“ транзисторов силового преобразователя и зубцовых пульсаций момента двигателя [8].

Требования к точности позиционирования ИО КОС нового поколения более жестки. Традиционные методики синтеза СУ с подчиненной структурой и обратной связью по координатам двигателя зачастую не отвечают этим требованиям. Повысить точность позиционирования ИО КОС можно за счет введения дополнительных обратных связей по измеряемым или наблюдаемым координатам [13—15]. Однако конструктивные особенности механизмов ИО в ряде случаев не позволяют устанавливать дополнительные датчики и построить точную модель наблюдателя. При использовании регулятора состояния [16—18] возникает сложность введения ограничения на изменение координат и компенсации неидеальностей электропривода. Исправить этот недостаток можно в системе с полиномиальным регулятором и предварительным фильтром [19—21], т.е. каскадной системе управления, настройка которой идентична настройке модального регулятора.

Синтез СУ также может выполняться с использованием нечеткой логики и нейронных сетей [22—24], осложняет этот подход отсутствие строгой методики определения параметров регуляторов.

Повысить точность позиционирования ИО можно не только за счет введения дополнительных обратных связей и применения новых алгоритмов управления. Основной недостаток методики синтеза трехконтурной СУ [11, 25] — отсутствие учета внутреннего вязкого трения механизмов ИО. Исправление этих недостатков позволит повысить точность позиционирования в системах, синтезированных с ее использованием.

Структура системы. Трехконтурная подчиненная СУ (рис. 1) состоит из контура регулирования момента, контура регулирования скорости, который условно можно разделить на внутренний (выделен цветом) и внешний, и контура регулирования угла поворота.

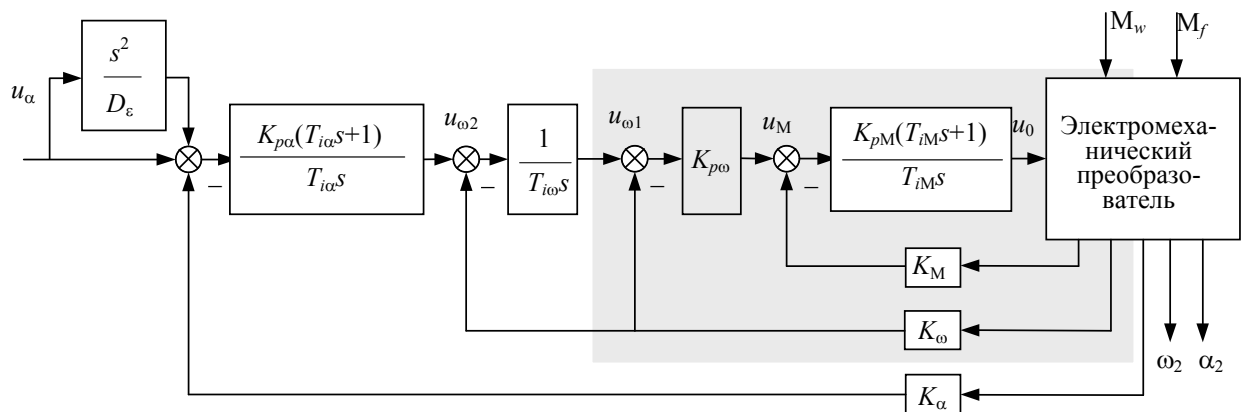


Рис. 1

На рис. 1 введены следующие обозначения: u_α — заданный угол поворота, u_{ω_1} , u_{ω_2} , u_M — сигналы задания для внутреннего и внешнего контуров регулирования скорости и контура регулирования момента, u_0 — сигнал задания на широтно-импульсный преобразователь, K_{pM} и T_{iM} , $K_{p\omega}$ и $T_{i\omega}$, $K_{p\alpha}$ и $T_{i\alpha}$ — коэффициенты передачи и постоянные интегрирования регуляторов момента, скорости и угла поворота соответственно, K_M , K_ω , K_α — коэффициенты датчиков момента, скорости и угла, M , M_w , M_f — моменты двигателя, ветровой нагрузки и сухого трения, ω_1 , α_1 и ω_2 , α_2 — скорости и углы поворота звеньев ИО, s — оператор Лапласа.

Разбиение скоростной подсистемы на два контура необходимо для придания системе астатизма первого порядка по возмущению. Для повышения порядка астатизма по заданию в СУ вводится разомкнутый канал.

Все контуры регулирования СУ настраиваются по методу последовательной коррекции [9]. Исключение составляет внутренний контур регулирования скорости. Объектом управления для него являются контур регулирования момента и механизм ИО. Как правило, механизмы ИО КОС могут быть с высокой точностью представлены двухмассовыми кинематическими схемами (рис. 2, J_1 и J_2 — моменты инерции двигателя и трубы телескопа, c_{12} и k_{12} — коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкой связи) [26].

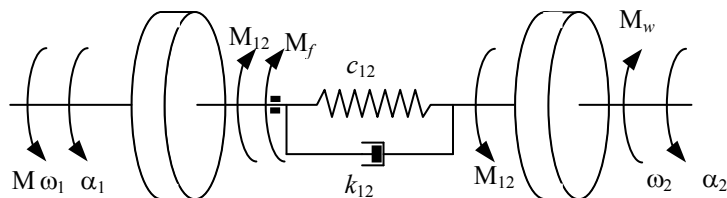


Рис. 2

Передаточные функции (ПФ), связывающие момент и скорости масс механизма ИО, имеют вид [10]:

$$\frac{\omega_1(s)}{M(s)} = \frac{1}{J_\Sigma s} \frac{\gamma T_y^2 s^2 + T_d s + 1}{(T_y^2 s^2 + T_d s + 1)}, \quad (1)$$

$$\frac{\omega_2(s)}{\omega_1(s)} = \frac{T_d s + 1}{\gamma T_y^2 s^2 + T_d s + 1}, \quad (2)$$

где $T_y = \sqrt{\frac{J_2}{c_{12}\gamma}}$, $T_d = \frac{k_{12}}{c_{12}}$ — постоянные времени упругих колебаний и демпфирования,

$\gamma = \frac{J_\Sigma}{J_1} = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$ — коэффициент соотношения масс.

С учетом ПФ (1), (2) структурную схему энергетической подсистемы СЭП ИО можно представить, как показано на рис. 3 (U_{DC} — напряжение звена постоянного тока (ЗПТ), R , T_e , C_e и C_m — сопротивление, электромагнитная постоянная, константа противо-ЭДС и константа момента двигателя соответственно; пунктиром обозначена электромеханическая связь). В системах управления СЭП ИО пренебрежение электромеханической связью, как правило, не приводит к большим погрешностям [10].

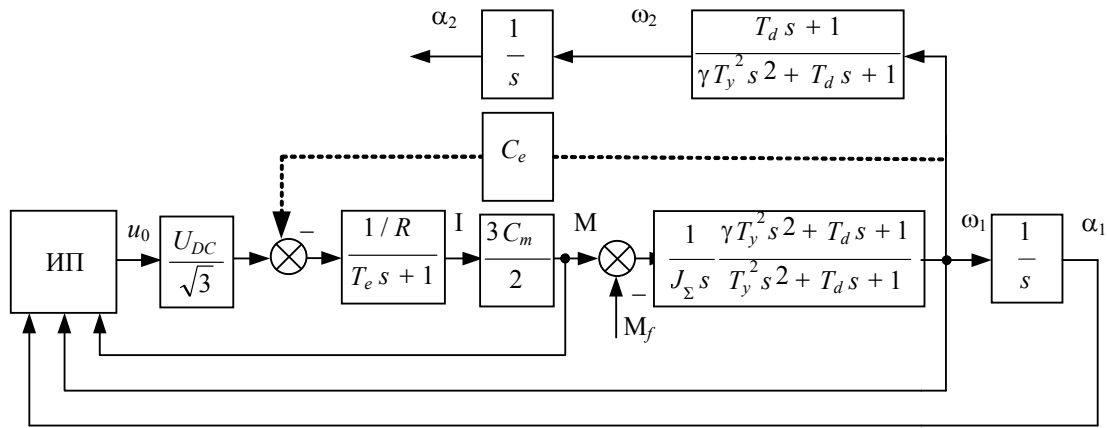


Рис. 3

Методика синтеза. Контур регулирования момента настраивается на так называемый линейный оптимум при помощи пропорционально-интегрального регулятора [8]. Параметры регулятора определяются как

$$T_{iM} = T_e, \quad K_{pM} = \frac{T_e R}{T_{\mu M} K_M \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}} \frac{3C_m}{2}},$$

где $T_{\mu M}$ — постоянная времени, определяющая полосу пропускания замкнутого контура регулирования момента.

Структурная схема внутреннего контура регулирования скорости приведена на рис. 4.

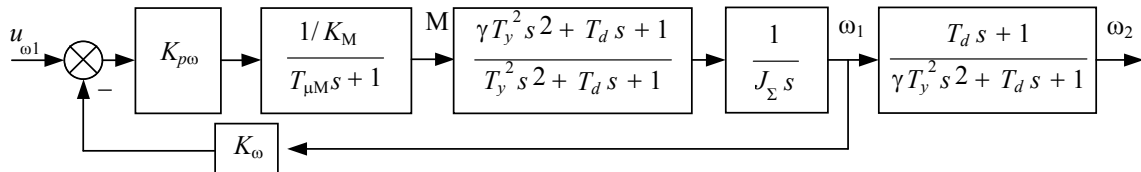


Рис. 4

В подчиненных СУ при настройке каждого внешнего контура регулирования внутренние контуры аппроксимируются эквивалентными апериодическими звеньями [9, 27], если внутренний контур регулирования устойчив и хорошо демпфирован.

В качестве характеристики колебательных свойств внутреннего контура регулирования скорости удобно использовать перерегуливание. Чтобы перерегуливание внутреннего контура регулирования скорости было приемлемым для аппроксимации, необходимо существенно сокращать полосу пропускания регулирования скорости по сравнению с СУ с абсолютно жестким механизмом. Вследствие этого быстродействие всей СУ определяется именно полосой пропускания внутреннего контура регулирования скорости.

ПФ замкнутого контура регулирования скорости без учета динамики контура регулирования момента можно представить как

$$\frac{\omega_1(s)}{u_{\omega 1}(s)} = \frac{\gamma T_y^2 s^2 + T_d s + 1}{\frac{J_\Sigma T_y^2 K_M}{K_{p\omega} K_\omega} s^3 + \frac{T_d J_\Sigma K_M + K_{p\omega} T_y^2 K_\omega \gamma}{K_{p\omega} K_\omega} s^2 + \frac{J_\Sigma K_M + T_d K_{p\omega} K_\omega}{K_{p\omega} K_\omega} s + 1}. \quad (3)$$

Если в (3) ввести $s = \omega_0 \tilde{s}$, где ω_0 — среднегеометрический корень

$$\omega_0 = \sqrt[3]{\frac{K_{p\omega} K_\omega}{J_\Sigma T_y^2 K_M}}, \quad (4)$$

то соответствующее ПФ (3) характеристическое уравнение (ХУ) примет вид

$$D(\tilde{s}) = \tilde{s}^3 + a_1\tilde{s}^2 + a_2\tilde{s} + 1, \quad (5)$$

где

$$a_1 = \frac{K_M T_d J_\Sigma + \gamma K_\omega T_y^2 K_{p\omega}}{K_\omega K_{p\omega}} \left(\frac{K_\omega K_{p\omega}}{K_M J_\Sigma T_y^2} \right)^{\frac{2}{3}} = \gamma \left(\frac{K_M J_\Sigma}{K_\omega K_{p\omega} T_y} \right)^{-\frac{2}{3}} + T_d \left(\frac{K_M J_\Sigma}{K_\omega K_{p\omega} T_y^4} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

$$a_2 = \frac{K_M J_\Sigma + K_\omega T_d K_{p\omega}}{K_\omega K_{p\omega}} \left(\frac{K_\omega K_{p\omega}}{K_M J_\Sigma T_y^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{K_M J_\Sigma}{K_\omega K_{p\omega} T_y} \right)^{\frac{2}{3}} + T_d \left(\frac{K_M K_{p\omega}}{K_\omega J_\Sigma T_y^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (7)$$

Зависимость между перерегулированием σ и коэффициентом $K_{p\omega}$ ХУ (5) определяется разложением (5) на множители:

$$\tilde{s}^3 + a_1\tilde{s}^2 + a_2\tilde{s} + 1 = (\tilde{s} + \alpha)(\tilde{s} + \beta + j\omega)(\tilde{s} + \beta - j\omega), \quad (8)$$

где α и $\beta \pm j\omega$ — вещественный и комплексно-сопряженный корни ХУ.

Введя понятие степени колебательности $\mu = \omega/\beta$, преобразуем уравнение (8):

$$\tilde{s}^3 + a_1\tilde{s}^2 + a_2\tilde{s} + 1 = (\tilde{s} + \alpha)(\tilde{s} + \beta + j\beta\mu)(\tilde{s} + \beta - j\beta\mu). \quad (9)$$

Раскрыв скобки в уравнении (9) и приравняв коэффициенты при одинаковых степенях \tilde{s} , можно получить систему уравнений:

$$\begin{cases} a_1 = 2\beta + \alpha, \\ 1 = \alpha\beta^2(1 + \mu^2), \\ a_2 = 2\alpha\beta + \beta^2(1 + \mu^2). \end{cases} \quad (10)$$

Из системы (10) можно исключить вещественный корень α :

$$\begin{cases} a_1 = 2\beta + \frac{1}{\beta^2(1 + \mu^2)}, \\ a_2 = \frac{2\beta}{\beta^2(1 + \mu^2)} + \beta^2(1 + \mu^2). \end{cases} \quad (11)$$

При помощи замены $\mu = -\pi/\ln(\sigma)$ система уравнений (11) может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} a_1 = 2\beta + \frac{\ln^2 \sigma}{\beta^2(\ln^2 \sigma + \pi^2)}, \\ a_2 = \frac{2 \ln^2 \sigma}{\beta(\ln^2 \sigma + \pi^2)} + \frac{\beta^2(\ln^2 \sigma + \pi^2)}{\ln^2 \sigma}. \end{cases} \quad (12)$$

С учетом выражений (6), (7) итоговая система примет вид:

$$\begin{cases} \gamma \left(\frac{K_M J_\Sigma}{K_\omega K_{p\omega} T_y} \right)^{-\frac{2}{3}} + T_d \left(\frac{K_M J_\Sigma}{K_\omega K_{p\omega} T_y^4} \right)^{\frac{1}{3}} = 2\beta + \frac{\ln^2 \sigma}{\beta^2(\ln^2 \sigma + \pi^2)}, \\ \left(\frac{K_M J_\Sigma}{K_\omega K_{p\omega} T_y} \right)^{\frac{2}{3}} + T_d \left(\frac{K_M K_{p\omega}}{K_\omega J_\Sigma T_y^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{2 \ln^2 \sigma}{\beta(\ln^2 \sigma + \pi^2)} + \frac{\beta^2(\ln^2 \sigma + \pi^2)}{\ln^2 \sigma}. \end{cases} \quad (13)$$

Система (13) позволяет по известным параметрам энергоподсистемы СЭП ИО $J_1, J_2, K_M, K_\omega, c_{12}, k_{12}$ и по заданному перерегулированию σ рассчитывать коэффициент передачи П-регулятора внутреннего контура скорости $K_{p\omega}$. Поскольку полоса пропускания внутреннего

контура регулирования скорости пропорциональна $K_{p\omega}$, при настройке СУ используется наибольшее значение, полученное при решении системы уравнений (13).

Считается, что контур регулирования хорошо демпфирован, если его показатель колебательности не превосходит 1,1—1,5 [28], что приблизительно соответствует значениям перерегулирования 10—30 %. Настройка внутреннего контура скорости с перерегулированием в заданном диапазоне позволяет аппроксимировать его эквивалентным аperiодическим звеном с постоянной времени $T_{\mu\omega} = \frac{K_M J_\Sigma}{K_\omega K_{p\omega}}$.

Система уравнений (13) не учитывает динамики внутреннего контура регулирования момента. Такое допущение справедливо, если запас по фазе на частоте среза не превышает 50—60° [10]. Ниже приведены аналитические соотношения, которые позволяют производить оценку выполнения данного условия при $T_{\mu M} < T_y$:

$$T_{\mu M} < \frac{T_{\mu\omega}}{\gamma} \text{ при } \omega_{c\omega} = \frac{\gamma}{T_{\mu\omega}}, \quad (14)$$

$$\frac{T_{\mu\omega}}{\gamma} < T_{\mu M} < T_y \text{ при } \omega_{c\omega} = \sqrt{\frac{\gamma}{T_{\mu M} T_{\mu\omega}}}. \quad (15)$$

При $k_{12} \neq 0$ условие корректности настройки описывается как

$$T_{\mu M} < \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{1}{\omega_{c\omega}},$$

при $k_{12} > 0$

$$\arctg(\omega_{c\omega} T_{\mu M}) + \arctg\left(\frac{T_d \omega_{c\omega}}{1 - \omega_{c\omega}^2 T_y^2}\right) < 30^\circ. \quad (16)$$

При $T_{\mu M} > T_y$ пренебрегать динамикой контура регулирования момента некорректно. Следовательно, контур момента должен иметь высокое быстродействие.

Внешний контур регулирования скорости настраивается на технический оптимум за счет И-регулятора: $T_{iM} = 2T_{\mu\omega 1} = T_{\mu\omega 2}$.

Контур регулирования угла поворота настраивается на симметричный оптимум ПИ-регулятором с параметрами

$$T_{i\alpha} = 4T_{\mu\omega 2} = T_{\mu 4} \text{ и } K_{p3\alpha} = \frac{K_\omega}{2T_{\mu\omega 2} K_\alpha}.$$

Добротность системы по ускорению определяется как $D_\varepsilon = \frac{K_{p\alpha} K_\alpha}{T_{i\omega 2} K_\omega}$.

Графическая интерпретация методики. Графическую интерпретацию описанного способа настройки внутреннего контура регулирования скорости можно дать при помощи диаграммы Вышнеградского, представленной на рис. 5.

Характеристическая кривая (жирная) построена по выражениям (6), (7) при следующих параметрах СЭП ИО.

Параметры угломестной оси КОС „Стажер-2 ОПУ ЛИК“: $J_1=3 \text{ кгм}^2$; $J_2=520 \text{ кгм}^2$; $c_{12}=4,4 \cdot 10^8 \text{ Нм/рад}$; $k_{12}=7 \cdot 10^4 \text{ Нмс/рад}$; $M_f=260 \text{ Нм}$; $M_{w,\max}=130 \text{ Нм}$.

Параметры двигателя RM36 401-50BS и ЗПТ: $R_\phi=1,9 \text{ Ом}$; $T_e=6,8 \text{ мс}$; $C_m=36 \text{ Нм/А}$; $C_e=29,4 \text{ В/рад/с}$; $U_{DC}=72 \text{ В}$.

Коэффициенты датчиков $K_M=0,024 \text{ Нм/В}$; $K_\omega=114,492 \text{ рад/(сВ)}$; $K_\alpha=1,592 \text{ рад/В}$.

Линии равного перерегулирования (пунктир) построены по выражениям (12).

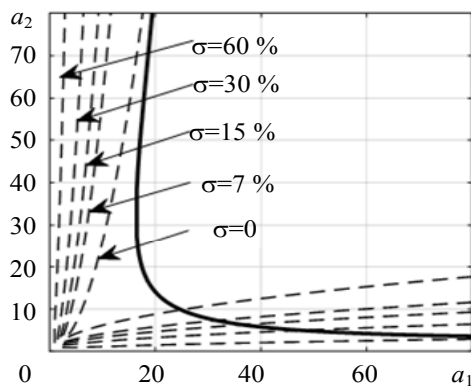


Рис. 5

По диаграмме можно определить коэффициент передачи П-регулятора внутреннего контура скорости $K_{p\omega}$. Для этого необходимо найти точку пересечения характеристической кривой и линии требуемого перерегулирования. По координатам точки пересечения (a_1 и a_2) при помощи формул (6), (7) можно найти коэффициент $K_{p\omega}$. Характеристическая кривая может пересекать линии равного перерегулирования в нескольких точках. Большому значению коэффициента передачи $K_{p\omega}$, следовательно и большей полосе пропускания, соответствуют точки пересечения, лежащие в правом нижнем углу диаграммы [10].

Имитационное моделирование. В качестве исходных данных для имитационного моделирования принято техническое задание на разработку СЭП угломестной оси КОС „Старжер-2 ОПУ ЛИК“.

- Максимальная скорость вращения, °/с5
- Максимальное ускорение, °/с²3
- Нижняя граница скоростей плавного слежения, "/с5
- СКО при скоростях слежения ниже 5"/с, "2

Параметры регуляторов, вычисленные при $\sigma=7\%$: $K_{pM}=23,90$; $T_{iM}=6,8$; $K_{p\omega}=79,79$; $T_{i\omega}=2,74$; $K_{p\alpha}=13\ 120$; $T_{i\alpha}=11$; $D_\epsilon=16\ 620$.

Некомпенсируемые постоянные времени контуров: $T_{\mu M}=10$ мкс; $T_{\mu\omega 1}=1,37$ мс; $T_{\mu\omega 2}=2,74$ мс; $T_{\mu\alpha}=11$ мс; $t_{пп}=33$ мс.

При заданных параметрах выполняются условия (15) и (16), следовательно, предлагаемая настройка корректна.

На рис. 6 представлены переходные характеристики внутреннего контура регулирования скорости. Пунктир соответствует внутреннему контуру регулирования скорости, настроенному по методике [11], эта переходная характеристика является апериодической. Предлагаемая методика позволяет настроить контур с критической либо с колебательной переходной характеристикой с predetermined перерегулированием и большей полосой пропускания (сплошные кривые на рис. 6).

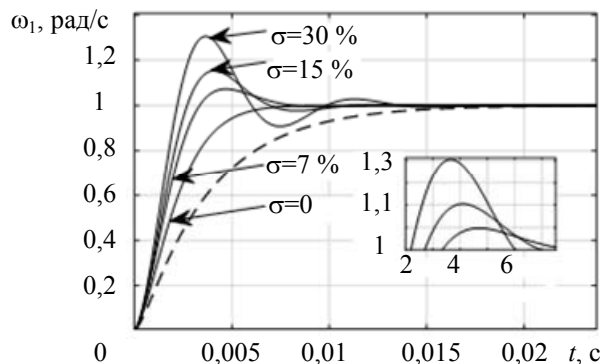


Рис. 6

На рис. 7 представлены логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) разомкнутого внутреннего контура регулирования скорости.

Сплошная ЛЧХ построена для внутреннего контура регулирования скорости при величине перегуливания $\sigma=7\%$ и коэффициенте демпфирования $k_{12}=7 \cdot 10^4$, пунктир — при $\sigma=7\%$ и $k_{12}=0$. ЛЧХ, во-первых, служат графическим отображением условий корректности методики, а во-вторых, показывают, что с ростом коэффициента демпфирования механизма в контуре регулирования увеличивается запас устойчивости по фазе.

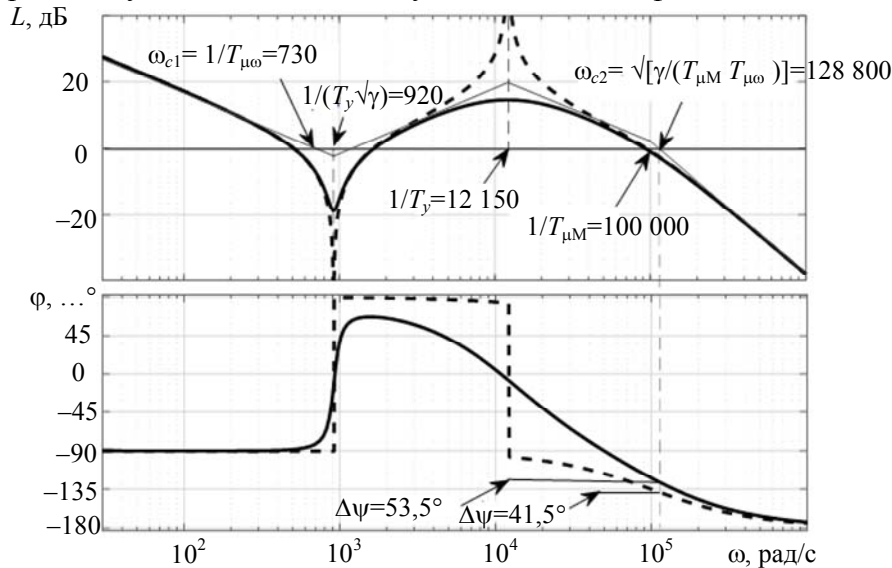


Рис. 7

Повышение быстродействия внутреннего контура регулирования скорости приводит к повышению быстродействия СУ в целом, что должно позволить уменьшить ошибки слежения в типовых режимах работы СЭП ИО.

На рис. 8, а представлен график ошибки ε слежения в режиме стояния, на рис. 8, б — график угла α поворота трубы телескопа в режиме равномерной заводки со скоростью $5''/с$.

Сплошные кривые получены в системе, настроенной по предложенной методике при $\sigma = 7\%$, пунктир — в системе, настроенной по методике [11]. В режиме стояния среднеквадратическую ошибку (СКО) удалось уменьшить более чем в 8 раз (рис. 8, а) до $0,3''$. Нижний предел скоростей плавного движения удалось снизить в четыре раза до $5''/с$ (рис. 8, б). Все это позволило выполнить требования, предъявляемые к СЭП угломестной оси КОС „Стажер-2 ОПУ ЛИК“.

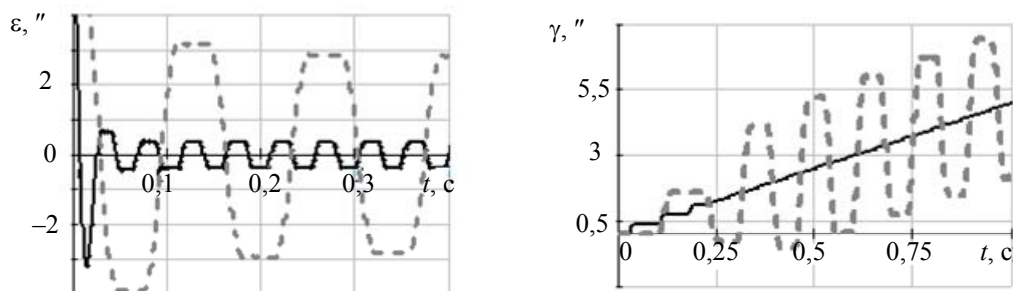


Рис. 8

Заключение. В настоящей статье описана методика синтеза подчиненной СУ СЭП ИО. Повышение точности позиционирования ИО достигается за счет расширения полосы пропускания внутреннего контура регулирования скорости. Полоса пропускания последнего ограничивается значениями частот, при которых внешний контур регулирования скорости можно аппроксимировать аperiodическим звеном. Кроме того, предлагаемая методика выгодно отличается от других более полным учетом свойств объекта управления, в частности, учетом

внутреннего вязкого трения механизмов исполнительных осей. Имитационное моделирование СУ СЭП угломестной оси КОС „Стажер-2 ОПУ ЛИК“ подтверждает эффективность методики и принципиальную возможность удовлетворения с ее помощью требований технического задания.

Предложенная методика может быть рекомендована к применению для синтеза СУ СЭП ИО, наибольшая точность позиционирования будет достигнута при сочетании описанного метода настройки внутреннего контура регулирования скорости и методов настройки внешних контуров регулирования с использованием дополнительных обратных связей [13—15] либо принципов нечеткой логики и нейронных сетей [19—21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. Н., Томасов В. С., Шаргородский В. Д., Садовников М. А. Состояние и перспективы развития систем прецизионного электропривода комплексов высокоточных наблюдений космических объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 5—12.
2. Park C. H., Son Y. S., and Kim B. I. Preliminary design of tracking mount for movable SLR // J. of Astronomy and Space Science. 2010. Vol. 27, N 2. P. 135—144.
3. Bely P. Y. The Design and Construction of Large Optical Telescopes. NY, USA: Springer-Verlag, Inc., 2003. 505 p.
4. Seeber G. Satellite Geodesy. 2nd ed. Berlin, Germany: Walter de Gruyter GmbH & Co., 2003. 603 p. ISBN 3-11-017549-5.
5. Vasilyev V. P., Shargorodsky V. D. Current state of high-precision satellite laser distance measurement // Photonics. 2017. Vol. 66, N 6.
6. [Электронный ресурс]: <<http://www.npk-spp.ru>>.
7. [Электронный ресурс]: <<https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov>>.
8. Ловлин С. Ю. Разработка алгоритмов эффективного управления прецизионными электроприводами комплексов высокоточных наблюдений. Дис. ...канд. техн. наук. СПб, 2013.
9. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
10. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
11. Толмачев В. А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 6. С. 68—72.
12. Park C. H., Son Y. S., Ham S. Y., B. I. Kim, Lim S. W., Lim H. C. Controller Design and Experiment for Tracking Mount of Movable SLR, ARGO-M // J. of Systemics, Cybernetics and Informatics. 2012. Vol. 10, N 2.
13. Ильина А. Г., Ловлин С. Ю., Тушев С. А. Синтез ЛКГ-регулятора прецизионного следящего электропривода оси телескопа траекторных измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. № 6. С. 86—91.
14. Абдуллин А. А., Толмачев В. А. Система регулирования скорости двухмассового механизма с использованием наблюдателя // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 5. С. 66—71.
15. Griбанov P. S., Lovlin S. Y., Lukichev D. V. Realization of acceleration feedback to improve accuracy of servo drive with mechanical elasticity // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2018. 2018. P. 872—877.
16. Gawronski W. Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures. NY, USA: Springer-Verlag, Inc., 2004. 396 p.
17. Gawronski W. Modeling and Control of Antennas and Telescopes. NY, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. 235 p.
18. Abdullin A. A., Drozdov V. N., Plotitsyn A. A. Optimal Control System with Guaranteed Degree of Stability for Precision Electric Drive // Advances in Automatic Control: Proc. of the 16th Intern. Conf. on Automatic Control, Modeling & Simulation (ACMOS '14). 2014. P. 22—26.

19. Тарарыкин С. В., Тютиков С. С., Салахутдинов Н. В., Анисимов А. А. Методика проектирования цифровых полиномиальных регуляторов электромеханических систем // Вестн. ИГЭУ. 2005. С. 24—35.
20. Тютиков В. В., Тарарыкин С. В. Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2006. 256 с.
21. Арановский С. В., Ловлин С. Ю., Смирнов Н. А., Цветкова М. Х. Сравнение различных подходов к построению линейных систем управления прецизионными электроприводами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 3. С. 31—38.
22. Demidova G. L., Lukichev D. V., Kuzin A. Y. A Genetic Approach for Auto-Tuning of Adaptive Fuzzy PID Control of a Telescope's Tracking System // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 150. P. 495—502.
23. Lukichev D. V., Demidova G. L., Kuzin A. I., Saushev A. V. Application of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Controller in Servodrive with Multi-Mass Object // 25th Intern. Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives, IWED 2018. 2018. P. 1—6.
24. Лукичев Д. В., Кузин А. Ю., Демидова Г. Л., Ловлин С. Ю., Жданов И. Н. Применение нечетких и нейронечетких регуляторов в системе управления двухмассовым объектом с нелинейными возмущениями // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 1. С. 32—39.
25. Шустов И. В., Толмачев В. А. Синтез четырехконтурной системы управления следящего электропривода системы наведения телескопов траекторных измерений // Матер. XX конф. молодых ученых с междунар. участием „Навигация и управление движением“. 2018. С. 205—207.
26. Исупов А. Н., Исупов К. С., Храмов С. Н. Определение амплитудно-частотных характеристик альт-азимутального опорно-поворотного устройства крупногабаритного наземного телескопа // Изв. вузов. Приборостроение 2008. Т. 51, № 6. С. 30—37.
27. [Электронный ресурс]: <http://model.exponenta.ru/epivod/glv_070.htm>.
28. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1996. 992 с.

Сведения об авторах

- Илья Владимирович Шустов** — магистр; Университет ИТМО; Мегафакультет компьютерных технологий и управления, факультет систем управления и робототехники; E-mail: ivshustov7394@gmail.com
- Валерий Александрович Толмачев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; Мегафакультет компьютерных технологий и управления, факультет систем управления и робототехники; E-mail: va-tolmachev@mail.com
- Сергей Юрьевич Ловлин** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; Мегафакультет компьютерных технологий и управления, факультет систем управления и робототехники; E-mail: seri-l@yandex.ru

Поступила в редакцию
13.09.19 г.

Ссылка для цитирования: Шустов И. В., Толмачев В. А., Ловлин С. Ю. Синтез подчиненной системы управления с заданным перерегулированием для электропривода исполнительной оси квантово-оптического комплекса // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 12. С. 1066—1077.

SYNTHESIS OF A SUBORDINATE CONTROL SYSTEM WITH PREDETERMINED OVERSHOOT OF SERVO AXLE ELECTRIC DRIVE OF QUANTUM-OPTICAL COMPLEX

I. V. Shustov, V. A. Tolmachev, S. Yu. Lovlin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: od@mail.ifmo.ru

With the development of technology, the requirements for the accuracy of reproduction by machines and mechanisms of the given laws of motion are constantly increasing. This trend is particularly evident in the case of electric drives of servo axis of quantum-optical systems. In the conditions of infra-low speeds of movement, non-rigidity of mechanisms and influence of variable disturbing moments on their masses, the task of ensuring high accuracy of servo axes positioning is assigned to control systems. A new analytical method of control system configuration is presented: its output, graphical interpretation

and conditions of correct operation are considered. The technique allows to increase simultaneously accuracy of positioning of the servo axes and to keep such advantages of the subordinate structure of control system as convenience of restriction of internal coordinates of system and possibility of compensation of imperfections of the electric motor and the power converter. Improving the positioning accuracy of the servo axes is achieved by increasing the bandwidth of the internal speed control circuit. The maximum bandwidth of the latter is limited at a level at which the value of the overshoot of its transient characteristics does not exceed a certain predetermined value. Another advantage of the proposed method is a more complete account of the properties of the control object, including the internal viscous friction of servo axes mechanisms. The results of simulation of the control system of the tracking electric drive of the angular axis of the quantum optical complex Stager-2 OPU LIK confirm the correctness and effectiveness of the developed technique.

Keywords: quantum-optical system, support-rotary device, torque motor, elevation angle axis, two-mass system, dry friction, damping factor, servo drive, subordinate structure, Vyshnegradsky diagram, PID regulator

REFERENCES

1. Vasil'yev V.N., Tomasov V.S., Shargorodskiy V.D., Sadovnikov M.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 6(51), pp. 5–12. (in Russ.)
2. Park C.H., Son Y.S., and Kim B.I. *Journal of Astronomy and Space Science*, 2010, no. 2(27), pp. 135–144.
3. Bely P.Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*, NY, USA, Springer-Verlag, 2003, 505 p.
4. Seeber G. *Satellite Geodesy*, Berlin, Walter de Gruyter GmbH & Co., 2003, 603 p. ISBN 3-11-017549-5
5. Vasilyev V.P., Shargorodsky V.D. *Photonics*, 2017, no. 6 (66).
6. <http://www.npk-spp.ru>. (in Russ.)
7. <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov>. (in Russ.)
8. Lovlin S.Yu. *Razrabotka algoritmov effektivnogo upravleniya pretsizionnymi elektroprivodami kompleksov vysokotochnykh nablyudeniy* (Development of Algorithms for the Effective Control of Precision Electric Drives of High-Precision Observation Systems), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2013. (in Russ.)
9. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* (Electric Drive Theory), Moscow, 2001, 704 p. (in Russ.)
10. Bortsov Yu.A., Sokolovskiy G.G. *Avtomatizirovannyy elektroprivod s uprugimi svyazyami* (Automatic Drive with Elastic Connections), St. Petersburg, 1992, 288 p. (in Russ.)
11. Tolmachev V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 6(51), pp. 68–72 (in Russ.)
12. Park C.H., Son Y.S., Ham S.Y., Kim B.I., Lim S.W., Lim H.C. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2012, no. 2(10).
13. Il'ina A.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 6, pp. 86–91. (in Russ.)
14. Abdullin A.A., Tolmachev V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 5(54), pp. 66–71. (in Russ.)
15. Gribanov P.S., Lovlin S.Y., Lukichev D.V. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, EIConRus 2018, 2018, pp. 872–877.
16. Gawronski W. *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*. NY, USA, Springer-Verlag, 2004, 396 p.
17. Gawronski W. *Modeling and Control of Antennas and Telescopes*, NY, USA, Springer Science+Business Media, LCC, 2008, 235 p.
18. Abdullin A.A., Drozdov V.N., Plotitsyn A.A. *Advances in Automatic Control: Proceedings of the 16th International Conference on Automatic Control, Modeling & Simulation (ACMOS '14)*, 2014, pp. 22–26.
19. Tararykin S.V., Tyutikov S.S., Salakhutdinov N.V., Anisimov A.A. *Vestnik IGEU*, 2005, pp. 24–35.
20. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. *Robastnoye modal'noye upravleniye tekhnologicheskimi ob'yektami* (Robust Modal Process Facility Management), 2006, 256 p. (in Russ.)
21. Aranovskiy S.V., Lovlin S.Yu., Smirnov N.A., Tsvetkova M.Kh. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2013, no. 3, pp. 31–38. (in Russ.)
22. Demidova G.L., Lukichev D.V., Kuzin A.Y. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 150, pp. 495–502.
23. Lukichev D.V., Demidova G.L., Kuzin A.I., Saushev A.V. *25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives*, IWED 2018 – Proceedings, 2018, pp. 1–6.
24. Lukichev D.V., Kuzin A.Yu., Demidova G.L., Lovlin S.Yu., Zhdanov I.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 1(62), pp. 32–39. (in Russ.)
25. Shustov I.V., Tolmachev V.A. *Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem* (Navigation and Traffic Control), Materials of the XX Conference of Young Scientists with International Participation, 2018, pp. 205–207. (in Russ.)
26. Isupov A.N., Isupov K.S., Khramov S.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 6(51), pp. 30–37. (in Russ.)
27. http://model.exponenta.ru/epivod/glv_070.htm.
28. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (The Theory of Automatic Control Systems), Moscow, 1972, 768 p. (in Russ.)

Data on authors

- Ilya V. Shustov** — MSC; ITMO University, School of Computer Technologies and Control, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ivshustov7394@gmail.com
- Valery A. Tolmachev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, School of Computer Technologies and Control, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: va-tolmachev@mail.com
- Sergey Yu. Lovlin** — PhD, Associate Professor; ITMO University, School of Computer Technologies and Control, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: seri-l@yandex.ru

For citation: Shustov I. V., Tolmachev V. A., Lovlin S. Yu. Synthesis of a subordinate control system with predetermined overshoot of servo axle electric drive of quantum-optical complex. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 12. P. 1066—1077 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1066-1077