

УДК 681.5.11

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АЗИМУТАЛЬНОЙ ОСИ АЛТАЙСКОГО ТЕЛЕСКОПА ТИ-3.12

В.А. Толмачев, М.В. Никитина, М.Е. Сергеева

Предложена методика синтеза системы управления силового следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства большого телескопа ТИ-3.12 Алтайского оптико-лазерного центра.

**Ключевые слова:** трехмассовая модель механизма, следящий электропривод, частота механического резонанса.

### Введение

Объектом исследования в данной работе является система управления следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства (ОПУ) большого телескопа ТИ-3.12 Алтайского оптико-лазерного центра.

Конструктивные особенности ОПУ азимутальной оси описаны в работе [1]. Азимутальная ось представляет собой многомассовую конструкцию с общей массой 55 т. Типовые требования к статическим и динамическим характеристикам следящих электроприводов современных комплексов, описание типовой функциональной схемы следящего электропривода оси ОПУ на основе трехфазного вентильного двигателя и назначение ее основных узлов приведены в работах [2, 3].

При синтезе системы управления рекомендовано в качестве расчетной использовать четырехконтурную систему регулирования угла поворота с трехмассовой моделью механизма [1], структурная схема которой представлена на рис. 1. Система управления содержит основной контур регулирования положения и подчиненные ему контуры регулирования скорости и электромагнитного момента двигателя.

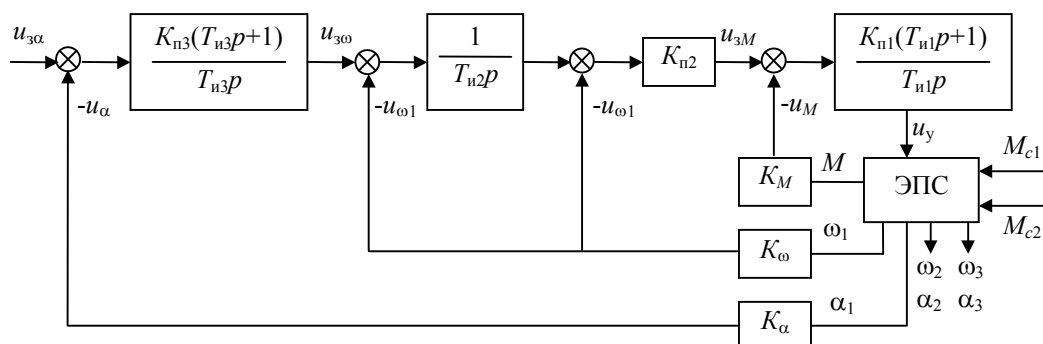


Рис. 1. Структурная схема четырехконтурной системы

Основной контур – контур регулирования угла – содержит ПИ-регулятор угла с коэффициентом передачи  $K_{п3}$  и постоянной времени интегрирования  $T_{и3}$ , на входе которого сравнивается напряжение  $u_{з\alpha}$ , пропорциональное заданному значению угла поворота входного конца исполнительный оси ОПУ, с напряжением  $u_{\alpha}$  датчика угла с коэффициентом передачи  $K_{\alpha}$ . Выходной сигнал регулятора  $u_{з\omega}$  является напряжением задания для внешнего контура регулирования скорости первой массы  $\omega_1$ .

Первый внешний контур регулирования скорости содержит И-регулятор с постоянной времени интегрирования  $T_{и2}$ , на входе которого напряжение  $u_{з\omega}$ , пропорциональное заданному значению скорости

входного конца исполнительной оси ОПУ, сравнивается с напряжением  $u_\omega$ , поставляемым датчиком скорости с коэффициентом передачи  $K_\omega$ . Выходной сигнал И-регулятора представляет напряжение задания для внутреннего контура скорости, содержащего П-регулятор с коэффициентом передачи  $K_{п2}$ . Такое построение скоростной подсистемы при настройке каждого из контуров на «технический оптимум» позволяет снизить перерегулирование при реакции на скачок сигнала задания до 4,3% относительно перерегулирования в одноконтурной скоростной подсистеме (43%) с ПИ-регулятором скорости и настройке на «симметричный оптимум» [4].

Выходной сигнал  $u_{3М}$  регулятора скорости внутреннего контура является сигналом задания для контура регулирования электромагнитного момента двигателя, содержащего ПИ-регулятор момента с коэффициентом передачи  $K_{п1}$  и постоянной  $T_{п1}$ . На входе регулятора сигнал  $u_{3М}$  сравнивается с сигналом  $u_M$  датчика момента с коэффициентом передачи  $K_M$ . Выходной сигнал  $u_y$  регулятора момента поступает на вход управляющего преобразователя электрической энергии энергетической подсистемы (ЭПС).

Цель исследования, проводимого в данной работе – разработка методики синтеза четырехконтурной системы регулирования угла поворота с трехмассовой моделью механизма.

### Математическая модель и обобщенная структурная схема ЭПС

В соответствии с [4, 5] процессы в ЭПС, содержащей трехфазный синхронный электромеханический преобразователь, транзисторный инвертор и трехмассовую модель механизма исполнительной оси можно описать системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{пр} \dot{\omega}_0 = K_{пр} U_y - \omega_0 \\ T_3 \dot{M} = \beta(\omega_0 - \omega_1) - M \\ J_1 \dot{\omega}_1 = M - M_{c1} - M_{12} - M_{13} \\ \dot{\alpha}_1 = \omega_1 \\ \dot{M}_{12} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2) \\ J_2 \dot{\omega}_2 = M_{12} - M_{c2} \\ \dot{\alpha}_2 = \omega_2 \\ \dot{M}_{13} = C_{13}(\omega_1 - \omega_3) \\ J_3 \dot{\omega}_3 = M_{13} \\ \dot{\alpha}_3 = \omega_3 \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $K_{пр} = K_{ШИП} / C'_e$  – статический коэффициент передачи обобщенного управляемого преобразователя электрической энергии с выходом в виде скорости холостого хода обобщенного двигателя  $\omega_0$ ;  $T_{пр}$  – зависит от вида широтно-импульсной модуляции и периода коммутации ключей  $T$  трехфазного инвертора;  $C'_e$  – приведенная конструктивная постоянная по ЭДС вращения;  $\beta$  – жесткость линеаризованной механической характеристики вентильного двигателя;  $T_3$  – электрическая постоянная времени фазной обмотки двигателя;  $K_{ШИП}$  – статический коэффициент передачи усилительно-преобразовательного устройства с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения в линейной зоне его регулировочной характеристики,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – угловая скорость первой, второй и третьей масс;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – угол поворота первой второй и третьей масс;  $M_{12}$  и  $M_{13}$  – моменты упругих связей;  $M$  – электромагнитный момент двигателя;  $C_{12}$  и  $C_{13}$  – коэффициенты упругих связей;  $J_1, J_2, J_3$  – моменты инерции;  $M_{c1}$  и  $M_{c2}$  – моменты нагрузок на опорах оси.

Системе уравнений (1) можно поставить в соответствие обобщенную структурную схему ЭПС, представленную на рис. 2.

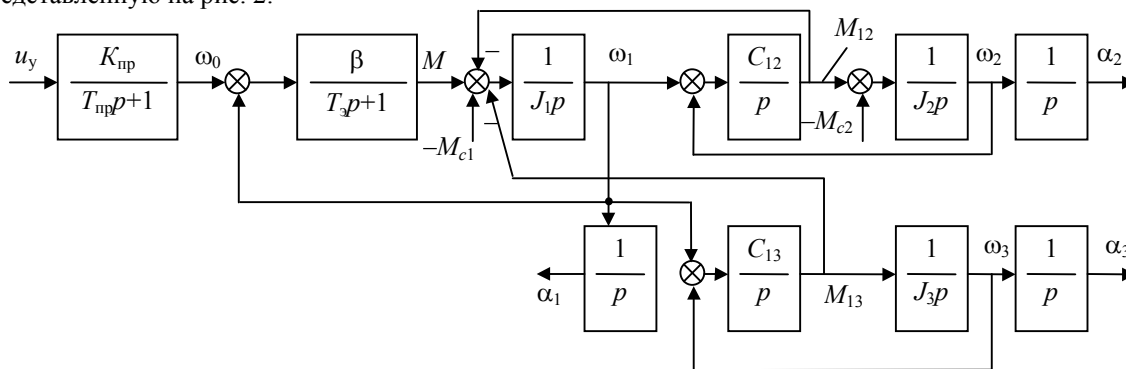


Рис. 2. Обобщенная структурная схема ЭПС

### Синтез и моделирование системы управления

В работе [6] предложена методика синтеза системы управления электропривода с четырехконтурной структурой и двухмассовой моделью механизма оси. Основу методики синтеза составляет определение частоты механического резонанса и коэффициента соотношения масс, устанавливающие предельную полосу пропускания скоростной подсистемы электропривода. В работе [7] для случая многомассового механизма оси предложено при синтезе скоростного контура ориентироваться на самую низкую из резонансных частот, которую, как правило, приходится определять экспериментально.

Для рассматриваемого случая трехмассового механизма со структурой (рис. 2) резонансные частоты могут быть получены расчетным путем.

$$\text{Для трехмассовой модели матрица } A = \begin{bmatrix} 0 & -1/J_1 & 0 & -1/J_1 & 0 \\ C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & 0 & 0 & 0 & -C_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_3 & 0 \end{bmatrix}, \text{ тогда характеристическое уравнение примет вид}$$

$$p(p^4 + bp^2 + c) = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } b = \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{13}J_2(J_1 + J_3)}{J_1J_2J_3}, \quad c = \frac{C_{12}C_{13}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}.$$

Решая (2), получим соотношения, определяющие угловые частоты механического резонанса:

$$\omega_{p1} = \sqrt{\left(1 - \sqrt{1 - 4\frac{c}{b^2}}\right) \frac{b}{2}}, \quad \omega_{p2} = \sqrt{\left(1 + \sqrt{1 - 4\frac{c}{b^2}}\right) \frac{b}{2}} \quad (3, a)$$

или

$$f_{p1} = \omega_{p1}/(2\pi), \quad f_{p2} = \omega_{p2}/(2\pi). \quad (3, б)$$

Оптимизация внутреннего контура регулирования момента осуществляется из условия обеспечения аperiodического переходного процесса с заданной постоянной времени  $T_T$  на основе соотношений

$$T_{и1} = T_3, \quad K_{п1} = T_3/(\beta K_{шип} K_M T_T). \quad (4)$$

Величина постоянной времени замкнутого контура регулирования момента  $T_T$  определяется периодом коммутации силовых ключей инвертора, формирующего фазные напряжения двигателя, и ограничивается на уровне  $T_1 = 2T$  [6].

Настройка внутреннего контура регулирования скорости на технический оптимум осуществляется из условия реализации полосы пропускания частот  $2 \cdot \omega_0^*$ , связанной с резонансной угловой частотой  $\omega_{p0}$  соотношением [7]

$$\omega_0^* < \omega_{p0} / \sqrt[4]{\gamma^3},$$

где  $\gamma = (J_1 + J_2 + J_3)/(J_1 + J_2)$  – коэффициент соотношения масс, а  $\omega_{p0}$  – наименьшая из угловых частот механического резонанса, определяемая по (3).

Настройка на технический оптимум внешнего и внутреннего контуров регулирования скорости достигается выбором параметров И- и П-регуляторов на основе соотношений

$$K_{п2} = (J_1 + J_2 + J_3) K_M / (2T_{T1} K_\omega), \quad T_{и2} = 4T_{T1}, \quad (5)$$

где  $T_{T1} = 1/(2 \cdot \omega_0^*)$ . При этом полоса пропускания внешнего контура равна  $\omega_0^*$ , а расчетное время реакции на скачок задающего воздействия –  $6/\omega_0^*$ .

Настройка контура регулирования угла на симметричный оптимум обеспечивается при выборе параметров регулятора угла на основе соотношений

$$K_{п3} = K_\omega / (8T_{T1} K_\alpha), \quad T_{и3} = 16T_{T1}. \quad (6)$$

При этом расчетное время реакции углового контура на задающие воздействия определяется величиной  $48T_{T1}$  или  $24/\omega_0^*$ , а полоса пропускания частот –  $\omega_0^*/4$ .

Соотношения (3)–(6) составляют основу методики синтеза системы управления рассматриваемой структуры с заданными ее параметрами  $K_{пр}$ ,  $T_{пр}$ ,  $T$ ,  $T_3$ ,  $\beta$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $K_M$ ,  $K_\omega$ ,  $K_\alpha$ .

Поставим перед собой задачу определения резонансных частот ЭПС с параметрами  $C_{12} = 1,35 \cdot 10^9$  Нм/рад,  $C_{13} = 8,62 \cdot 10^8$  Нм/рад,  $J_1 = 2120$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_2 = 4480$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_3 = 197300$  кг·м<sup>2</sup>. Согласно (3),  $\omega_{p1} = 318,6$  рад/с,  $\omega_{p2} = 1117$  рад/с,  $f_{p1} = 51$  Гц,  $f_{p2} = 178$  Гц.

На рис. 3 приведены результаты численного спектрального анализа контура регулирования момента. Как видно, резонансные частоты составляют 51 и 178 Гц, что совпадает с расчетными частотами, полученными по формулам (3) и подтверждает корректность полученных соотношений.

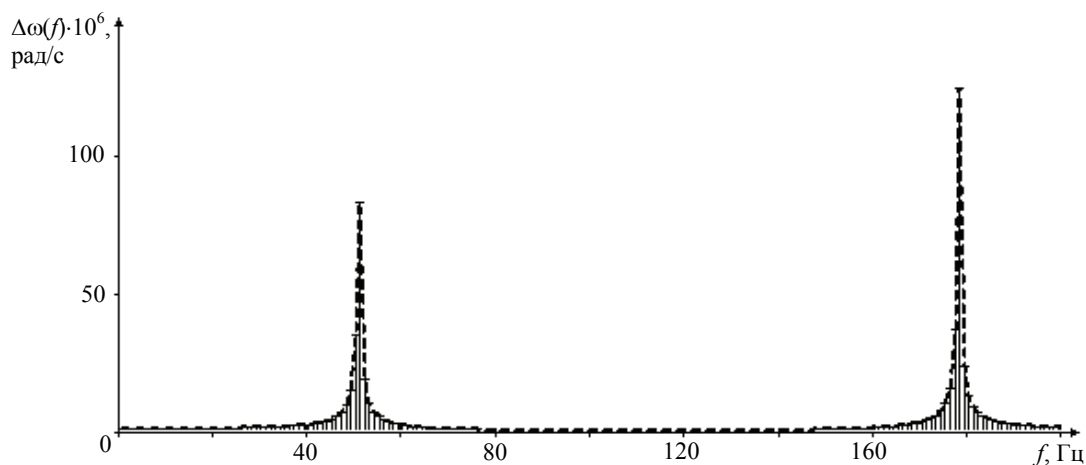


Рис. 3. Спектр контура регулирования момента

Синтезируем скоростную подсистему с параметрами приведенными выше и  $K_{пр}=0,0262$ ,  $T_{пр}=0,2$  мс,  $T=0,1$  мс,  $T_3=1,6$  мс,  $\beta=2,9 \cdot 10^4$ ,  $K_M=1,34 \cdot 10^{-4}$  В/Нм,  $K_\omega=38,1$  В·с/рад,  $K_\alpha=6,366$  В/рад. Согласно (4)–(6) параметры регуляторов –  $T_{п1}=1,6$  мс,  $K_{п1}=3,929$ ,  $T_{п2}=82$  мс,  $K_{п2}=174,346$ ,  $T_{п3}=0,328$  с,  $K_{п3}=36,375$ .

На рис. 4 представлены результаты моделирования реакции системы на линейно возрастающее задающее воздействие, где кривая 1 – электромагнитный момент двигателя в масштабе 1:100000; кривая 2 – угловые скорости первой, второй и третьей масс; кривая 3 – углы поворота первой, второй и третьей масс; кривая 4 – эталонная характеристика угла; 5 – угол задания.

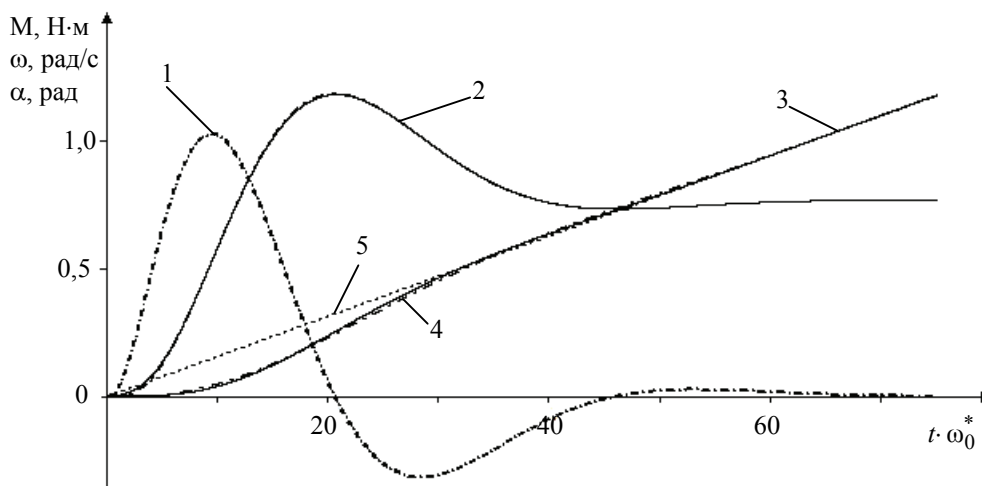


Рис. 4. Результаты моделирования синтезируемой системы

Как видно из рис. 4 кривая 3 практически совпадает с эталонной кривой 4, время реакции системы соответствует расчетному ( $48/\omega_0^*$ ), т.е. переходные характеристики синтезируемой системы соответствуют переходным характеристикам системы, настроенной на симметричный оптимум, что подтверждает корректность настроек регуляторов и предложенной методики синтеза.

### Заключение

В работе предложена математическая модель системы управления следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства телескопа ТИ-3.12 и методика синтеза регуляторов контуров регулирования момента, скорости и угла поворота при заданных параметрах ЭПС с трехмассовой моделью механизма исполнительской оси. Результаты моделирования переходных процессов синтезируемой системы с использованием расчетных соотношений, полученных в работе, в средах MathCad и MathLab совпадают с высокой точностью, что подтверждает корректность предложенной методики.

Полученные расчетные соотношения, определяющие частоты механического резонанса рассматриваемой системы, позволяют при синтезе избежать процедуры численного спектрального анализа.

Математическая модель ЭПС и методика синтеза могут быть использованы при исследовании различных режимов работы следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства телескопа ТИ-3.12, а также при проектировании и исследовании режимов работы структур с трехмассовыми моделями механизма.

### Литература

1. 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. 38–44.
2. Томасов В.С., Денисов К.М., Толмачев В.А. Следящие электроприводы систем наведения оптико-механических комплексов нового поколения. Проблемы и достижения // Труды V Междунар. (XVI Всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. 18–21 сентября 2007. – СПб, 2007. – С. 175–177.
3. Васильев В.Н., Томасов В.С., Шаргородский В.Д., Садовников М.А. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 5–12.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
5. Аракелян А.К., Афанасьев А.А. Вентельные электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1997.
6. Толмачев В.А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 68–72.
7. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

**Толмачев Валерий Александрович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, va-tolmachev@mail.ru

**Никитина Мария Владимировна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nikitina@ets.ifmo.ru

**Сергеева Мария Евгеньевна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, sergeeva.maria@mail.ru