

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 681.5.11  
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-645-652

## СИНТЕЗ СКОРОСТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕЛЕСКОПА С ТРЕХМАССОВЫМ МЕХАНИЗМОМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОСИ

В. А. ТОЛМАЧЕВ, М. В. НИКИТИНА, М. Е. КОНОНОВА

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

Предложены методика синтеза скоростной подсистемы четырехконтурной системы регулирования угла двухдвигательного следящего электропривода угломестной оси двухосного телескопа, а также методика параметрического синтеза этой системы для случая, когда исполнительная ось может быть представлена неразветвленной трехмассовой математической моделью. Представлена векторно-матричная математическая модель скоростной подсистемы, позволяющая выполнить анализ протекающих в ней динамических процессов. Проведен сравнительный анализ переходных характеристик двухдвигательной и однодвигательной скоростных подсистем, синтезированных с использованием предложенных методик и математической модели. Результаты моделирования показали, что в двухдвигательной скоростной подсистеме может быть реализована вдвое большая, по сравнению с однодвигательной, полоса пропускания частот, определяющая ее быстродействие. Это достигается как более высокой резонансной частотой механизма, так и вдвое меньшим коэффициентом соотношения масс, определяющими параметры регуляторов. Второй фактор является наиболее существенным, так как позволяет повысить быстродействие вдвое даже при близких значениях резонансных частот трехмассового механизма.

**Ключевые слова:** *следящий электропривод, скоростная подсистема, исполнительная ось, трехмассовый механизм, структурное решение, математическая модель, методика синтеза, сравнительный анализ.*

**Введение.** К актуальным задачам, возникающим при создании следящих электроприводов комплексов высокоточных оптических измерений, относятся обеспечение широкого диапазона (до 18 000) скоростей слежения при малых значениях среднеквадратичных ошибок (1—2"); обеспечение плавного движения оптической оси комплекса при инфранизких скоростях слежения (до единиц угловых секунд за секунду) в условиях жесткости конструкции осей опорно-поворотного устройства (ОПУ) [1, 2].

В работе [1] предложен вариант построения систем управления безредукторных электроприводов с применением бесконтактных высокомоментных вентильных электродвигателей и прецизионных цифровых датчиков координат с разрешающей способностью по углу менее сотых долей угловой секунды.

В решении подобных задач важную роль играет конструктивное исполнение всех элементов измерительного телескопа, и в первую очередь — осей его опорно-поворотного устройства. Угловые частоты резонанса механизма оси, вызванного крутильными деформациями,

в конечном итоге определяют полосу пропускания частот системы управления и, как следствие, ее динамическую точность.

В большинстве случаев ОПУ оптических комплексов являются двухосными и строятся по альт-азимутальному принципу [1]. Традиционно используемые безредукторные следящие электроприводы осей ОПУ являются однодвигательными. Конструкция азимутальных осей двухосных ОПУ, как правило, не позволяет использовать безредукторные двухдвигательные приводы, однако при построении угломестных осей такое решение вполне реализуемо.

Выигрыш по массогабаритным показателям обеспечивает установка на обеих полуосях вилки телескопа двигателей меньшей мощности. Однако при этом должны быть обеспечены требуемые динамические качества системы слежения.

Разработка методик синтеза и сравнительный анализ динамических характеристик однодвигательных и двухдвигательных следящих электроприводов телескопов с трехмассовыми механизмами исполнительных осей и являются задачами настоящей работы.

При построении систем управления электроприводов осей широко применяется четырехконтурная система регулирования угла поворота со структурной схемой, представленной на рис. 1 [2].

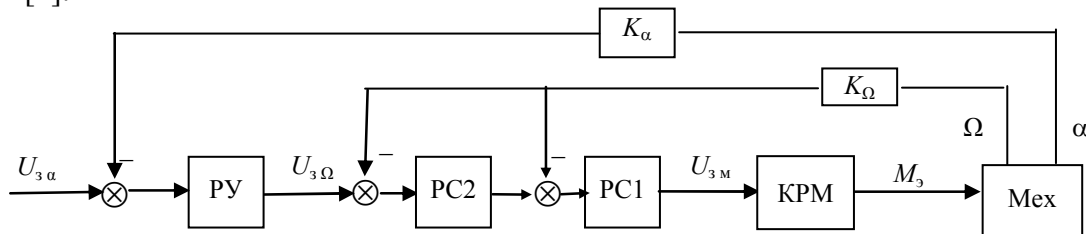


Рис. 1

Система управления содержит основной контур регулирования угла с ПИ-регулятором (PY) и подчиненную трехконтурную скоростную подсистему (СПС) с внутренним контуром регулирования электромагнитного момента (KPM) и двумя внешними контурами регулирования скорости с И-регулятором PC1 и П-регулятором PC2, замкнутыми по сигналу датчика скорости двигателя с коэффициентом передачи  $K_\Omega$  [3]. На входе основного контура напряжение  $U_{3\alpha}$ , пропорциональное заданному значению угла поворота входного конца исполнительной оси ОПУ, становится равным напряжению датчика угла с коэффициентом передачи  $K_\alpha$ . Выходной сигнал PY  $U_{3\Omega}$  является сигналом задания для внешнего контура регулирования скорости первой массы  $\Omega_1$ . Выходной сигнал PC1  $U_{3M}$  является сигналом задания для KPM.

Методика параметрического синтеза системы управления с механизмом (Mex), представляемым двухмассовой моделью, приведена в работе [4]. Такой подход может быть использован и при синтезе систем управления следящих электроприводов с трехмассовыми исполнительными осями, если их модели будут приведены к эквивалентным двухмассовым, параметрами которых являются эквивалентные моменты инерции первой и второй масс ( $J_{1э}, J_{2э}$ ) и эквивалентный коэффициент жесткости упругой связи ( $C_{12э}$ ).

**Методика синтеза трехконтурной скоростной подсистемы с двухмассовым механизмом исполнительной оси.** В работе [5] предложена процедура построения обобщенной энергетической подсистемы (ЭПС) на основе трехфазных синхронных электромеханических преобразователей (ЭМП) и трехфазного транзисторного инвертора, а также унифицированного контура регулирования электромагнитного момента с эквивалентной передаточной функцией в виде аperiодического звена с коэффициентом передачи  $K_{Mэ}$  и постоянной времени  $T_{Mэ}$ :

$$W_M(p) = \frac{M_3(p)}{U_{3M}(p)} = \frac{1/K_{Mэ}}{T_{Mэ}p + 1}. \quad (1)$$

Эквивалентная постоянная времени замкнутого контура регулирования момента  $T_{Mэ}$  определяется периодом коммутации силовых ключей инвертора  $T_k$ , формирующего фазные

напряжения двигателя, она не может быть меньше  $T_{мэ}=2T_k$  [6]. Далее примем  $T_{мэ}=400$  мкс, что соответствует частоте коммутации силовых ключей инвертора напряжения 10 кГц.

Для возможности использования известной [4] методики синтеза однодвигательной скоростной подсистемы следящего электропривода со структурой, представленной на рис. 1, и двухмассовым механизмом необходимо знать коэффициент соотношения масс  $\gamma$  и угловую частоту механического резонанса  $\omega_0$ .

Внутренний контур регулирования скорости настраивается на технический оптимум из условия реализации полосы пропускания частот  $2\omega_{0p}$ , определяемой по формуле

$$\omega_{0p} < \omega_0 / \sqrt[4]{\gamma^3}, \quad (2)$$

где

$$\gamma = \frac{J_{1э} + J_{2э}}{J_{1э}}. \quad (3)$$

При этом коэффициент передачи  $K_{п}$  РС2 рассчитывается по формуле

$$K_{п} = \frac{(J_{1э} + J_{2э})K_{мэ}}{2T_{\mu}K_{\Omega}}, \quad (4)$$

где  $T_{\mu}$  — фиктивная некомпенсированная постоянная времени контура, при безынерционном датчике скорости этот параметр определяется как

$$T_{\mu} = 1/2\omega_{0p}. \quad (5)$$

Внешний контур регулирования скорости синтезируется из условия обеспечения настройки на технический оптимум, при которой передаточная функция его принимает вид

$$W_{\Omega}(p) = \frac{\Omega(p)}{U_{3\Omega}(p)} = \frac{1/K_{\Omega}}{8T_{\mu}^2 p^2 + 4T_{\mu} p + 1}. \quad (6)$$

Для настройки на технический оптимум значение постоянной времени интегрирования И-регулятора скорости РС1 должно составлять

$$T_{и} = 4T_{\mu}. \quad (7)$$

При этом полоса пропускания частот внешнего контура регулирования скорости равна  $\omega_{0p}$ , а расчетное время реакции контура на скачок задающего воздействия —  $12T_{\mu}$ .

Передаточной функции (6) соответствует реакция контура на скачкообразное изменение задающего воздействия  $U_{3\Omega}$ :

$$\Omega(t) = \frac{U_{3\Omega}}{K_{\Omega}} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{4T_{\mu}}} \left( \cos \frac{t}{4T_{\mu}} + \sin \frac{t}{4T_{\mu}} \right) \right]. \quad (8)$$

**Математическая модель трехконтурной скоростной подсистемы с трехмассовым механизмом исполнительной оси.** При выборе структурного решения будем ориентироваться на рекомендации, сформулированные в работе [6] на основе анализа механических переходных процессов в двухдвигательном трехмассовом механизме угломестной оси с симметричной конструкцией, — структурное решение должно обеспечивать равенство вращающих моментов в статическом и динамическом режимах работы системы.

Указанным рекомендациям удовлетворяет система со структурным решением скоростной подсистемы, представленным на рис. 2. Подсистема содержит трехмассовый механизм с неразветвленной схемой замещения, два контура регулирования электромагнитных моментов двигателей с эквивалентными передаточными функциями (1), два контура регулирования скорости (внутренний и внешний). И-регулятор внешнего контура регулирования скорости представлен на рисунке детализированной структурной схемой (ДСС).

Трехмассовый механизм характеризуется угловыми скоростями первой, второй и третьей масс  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ , моментами упругих связей  $M_{12}$  и  $M_{23}$ , вращающимися моментами на полуосях  $M_1$

и  $M_2$ , крутильными жесткостями левого и правого валов оси  $C_{12}$  и  $C_{23}$ , суммарными моментами инерции левого и правого валов вместе с роторами двигателей  $J_1, J_3$ , моментом инерции трубы телескопа  $J_2$ . Возмущающими воздействиями на механизм являются моменты трения в опорах оси  $M_{c1}$  и  $M_{c3}$  и ветровой момент  $M_{c3}$ , действующий на трубу телескопа.

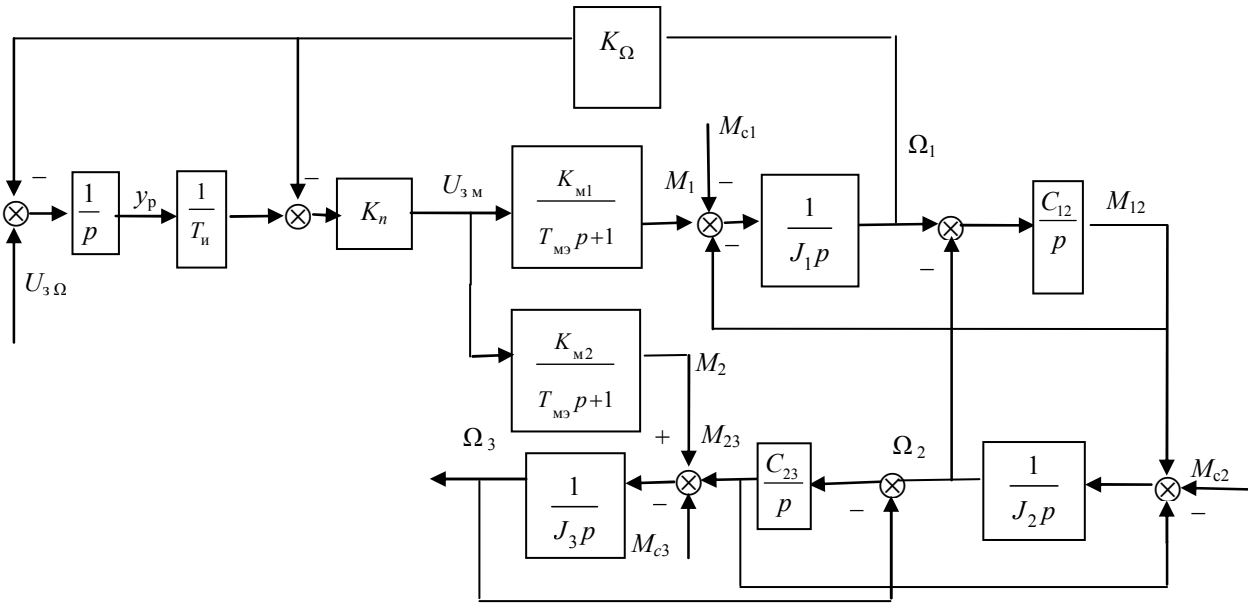


Рис. 2

Полагаем, что моменты инерции роторов двигателей пренебрежимо малы по сравнению с моментами инерции опор. Следует заметить, что это в полной мере относится к вентильным двигателям на основе синхронных машин с постоянными магнитами на роторе.

Векторно-матричная математическая модель подсистемы может быть представлена уравнением

$$dY/dt = AY + BU, \tag{9}$$

где  $Y^T = [M_1 \ M_2 \ \Omega_1 \ M_{12} \ \Omega_2 \ M_{23} \ \Omega_3 \ y_p]$  — вектор состояния, элементом  $y_p$  которого является выходной сигнал интегратора ДСС РС2,  $U^T = [U_{3\Omega} \ M_{c1} \ M_{c2} \ M_{c3}]$  — вектор управления,  $A$  — матрица системы

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{M3}} & 0 & -\frac{K_{\Omega 1} K_{\Pi} K_{M1}}{T_{M3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{\Pi} K_{M1}}{T_{M3} T_{\Pi}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{M3}} & -\frac{K_{\Omega 1} K_{\Pi} K_{M2}}{T_{M3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{\Pi} K_{M2}}{T_{M3} T_{\Pi}} \\ \frac{1}{J_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & -\frac{1}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23} & 0 & -C_{23} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_3} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{\Omega 1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$B$  —  $(8 \times 4)$ -матрица управления, ненулевыми элементами  $b_{ik}$  которой являются  $b_{32} = -1/J_1$ ,  $b_{53} = -1/J_2$ ,  $b_{74} = -1/J_3$ ,  $b_{81} = 1$ .

Предложенная модель позволяет исследовать процессы в системе как с двухдвигательным, так и с однодвигательным механизмом исполнительной оси, для чего в программе расчета необходимо положить  $K_{M2}=0$ .

Примем следующие значения параметров механизма:  $J_1=J_3=50$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_2=400$  кг·м<sup>2</sup>,  $C_{12}=C_{23}=8 \cdot 10^6$  Н·м/рад,  $K_{\Omega 1}=10$  В·с,  $K_{M1}=K_{M2}=100$  Н·м/В,  $T_{M3}=400$  мкс.

**Синтез и моделирование однодвигательной скоростной подсистемы.** Согласно рекомендациям [7], при синтезе систем управления с многомассовыми механизмами следует ориентироваться на низшую из резонансных частот, в рассматриваемом случае рассчитываемых по формулам [3]:

$$\omega_{p1} = \sqrt{\left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{b}{a^2}}\right) \frac{a}{2}}, \quad \omega_{p2} = \sqrt{\left(1 + \sqrt{1 - 4 \frac{b}{a^2}}\right) \frac{a}{2}}, \quad (10)$$

где

$$a = \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{23}J_1(J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}, \quad b = \frac{C_{12}C_{23}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}.$$

При принятых параметрах механизма по формулам (10) получим  $f_{p1}=63,7$ ,  $f_{p2}=71,2$  Гц. Параметрами эквивалентного двухмассового механизма при этом будут  $J_{13}=J_1$ ,  $J_{23}=J_2+J_3$ ,  $C_{123}=C_{12}$ . Далее по формуле (3) находим  $\gamma=10$ , по (2) и (5) —  $T_{\mu}=0,007$  с, по (4) —  $K_{\Pi}=35,75$  (при расчете  $K_{\Pi}$  следует положить  $K_{M3}=K_{M1}$ ).

Результаты моделирования реакции однодвигательной системы с датчиком скорости, установленным на валу двигателя, на скачок задающего воздействия  $U_{3\Omega}=0,01$  В, соответствующий заданному значению скорости вращения  $0,001$  1/с, представлены на рис. 3. Моделирование проводилось с использованием модели (9) при  $K_{M2}=0$  и нулевых моментах нагрузки на массах.

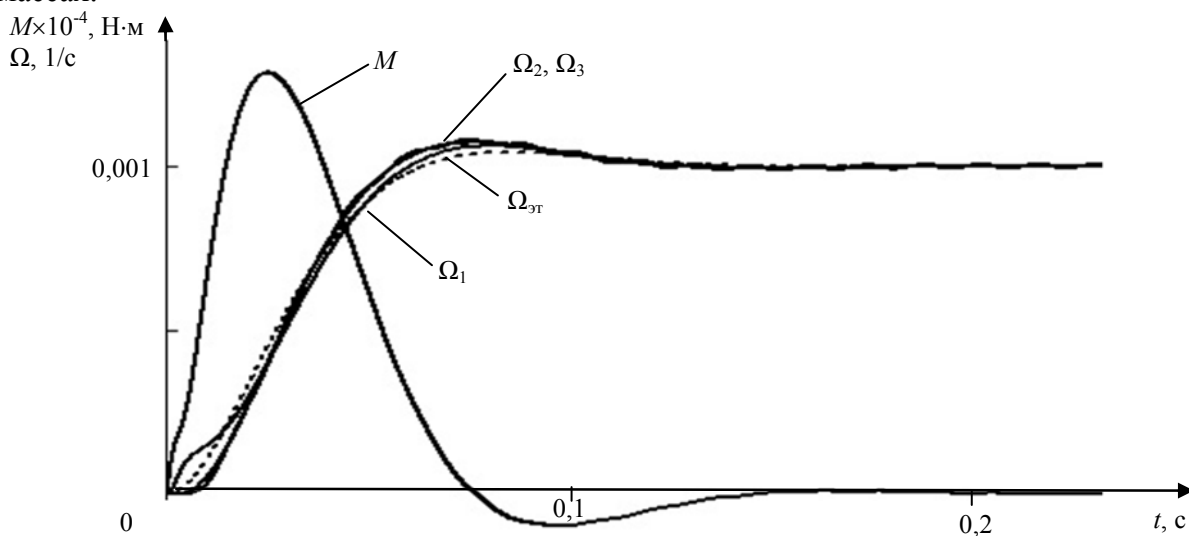


Рис. 3

Учет влияния моментов нагрузки на статические и динамические характеристики трехконтурной скоростной подсистемы с линейными алгоритмами управления остается за рамками настоящей работы и подлежит более детальному исследованию.

**Синтез и моделирование двухдвигательной скоростной подсистемы.** Будем полагать, что при использовании ЭМП даже с незначительно различающимися технологическими параметрами путем соответствующих настроек могут быть реализованы контуры регулирования момента с одинаковыми параметрами ( $K_{M1}=K_{M2}=K_M$  и  $T_{M31}=T_{M32}=T_{M3}$ ). Это гарантирует  $M_1 = M_2$  в статическом и динамическом режимах работы привода при одинаковом сигнале задания  $U_{3M}$  на входах контуров регулирования момента. Полагается

также, что суммарный электромагнитный момент двух двигателей обеспечит требуемые максимальные скорости и ускорения исполнительной оси. В этом случае динамические характеристики однодвигательных и двухдвигательных приводов могут быть сопоставлены вне зависимости от возможного разброса параметров ЭМП.

В работе [6] показано, что двухдвигательный трехмассовый механизм симметричного типа с  $M_1=M_2$  может быть представлен эквивалентной двухмассовой моделью с  $J_{13}=J_1+J_3$ ,  $J_{23}=J_2$ ,  $C_{123}=C_{12}+C_{23}$  и наибольшей резонансной частотой трехмассового механизма  $\omega_{p2}$  из рассчитываемых по формулам (10). При этом вращающий момент на входной оси вдвое превышает каждый из вращающих моментов трехмассовой модели, т.е.  $M_3=M_1+M_2$ , так что при расчете  $K_{\Pi}$  в формуле (4) следует положить  $K_{M3}=2K_{M1}$ . Далее по формуле (3) находим  $\gamma=5$ , по (2) и (5) —  $T_{\mu}=0,00375$  с, по (4) —  $K_{\Pi}=33,35$ .

Результаты моделирования реакции двухдвигательной системы с указанными выше параметрами на скачок задающего воздействия  $U_3 \Omega=0,01$  В представлены на рис. 4. Моделирование проводилось с использованием модели (9) при  $K_{M1}=K_{M2}=100$  Н·м/В и нулевых моментах нагрузки.

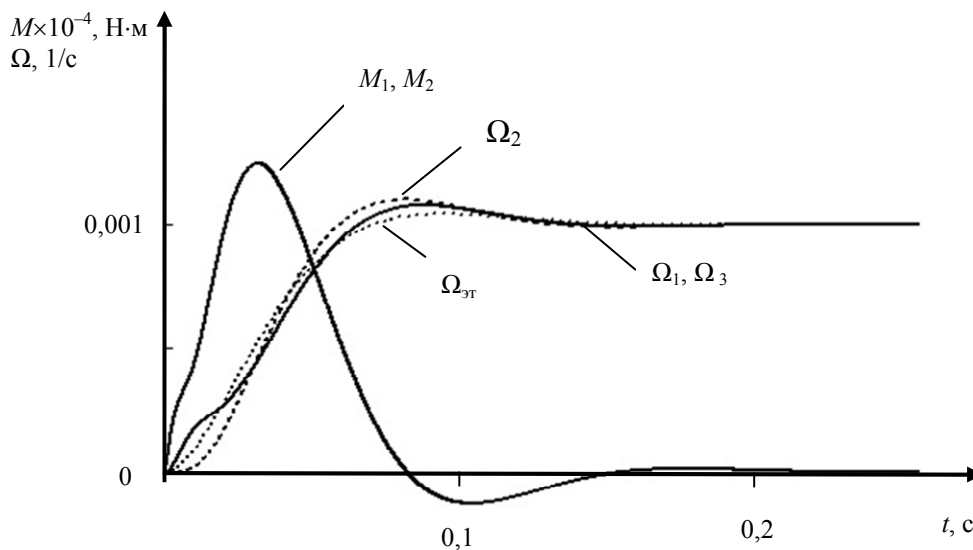


Рис. 4

Сравнение процессов, представленных на рис. 3 и 4, показывает, что:

— в обоих случаях кривые скоростей всех масс близки к эталонным, это подтверждает правомерность предложенных методик синтеза и корректность математических моделей;

— в двухдвигательной скоростной подсистеме с предложенным структурным решением может быть достигнуто практически вдвое большее быстродействие по сравнению с однодвигательной, при сохранении принятого критерия настройки;

— величина максимального суммарного электромагнитного момента двигателей, развиваемого в процессе отработки одного и того же задающего воздействия практически вдвое превышает значение максимального момента, развиваемого двигателем однодвигательной системы, что связано с необходимостью обеспечения вдвое больших мгновенных ускорений.

**Заключение.** В работе предложены математическая модель СПС следящего электропривода угломестной оси ОПУ телескопа с двумя двигателями и методика синтеза регуляторов контуров регулирования момента, скорости при заданных параметрах ЭМП с последовательной трехмассовой моделью механизма исполнительской оси.

Результаты моделирования в среде MathCad переходных процессов синтезируемой системы с использованием расчетных соотношений, полученных в работе, совпадают с эталонными кривыми, что подтверждает корректность предложенной методики.

Результаты моделирования показали, что в двухдвигательной скоростной подсистеме может быть реализована вдвое большая, по сравнению с однодвигательной подсистемой, полоса пропускания частот, определяющая ее быстродействие. Это достигается как более высокой резонансной частотой механизма, так и вдвое меньшим коэффициентом соотношения масс, определяющими параметры регуляторов. Второй фактор является наиболее существенным, так как позволяет повысить быстродействие вдвое даже при близких значениях резонансных частот трехмассового механизма.

Предложенные в работе математическая модель СПС и методика ее синтеза могут быть использованы при исследовании различных режимов работы следящего электропривода угломестной оси ОПУ телескопа, а также при проектировании и исследовании режимов работы структур с трехмассовыми моделями механизма.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовников М. А., Томасов В. С., Толмачев В. А. Прецизионный электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 81—86.
2. 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.
3. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
4. Толмачев В. А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 68—72.
5. Толмачев В. А., Антипова И. В., Фомин С. Г. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. Вып. 44. С. 142—146.
6. Толмачев В. А., Никитина М. В., Сергеева М. Е. Сравнительный анализ динамических свойств трехмассовых исполнительных осей с одним и двумя вращающимися моментами // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 6. С. 458—463.
7. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.

#### Сведения об авторах

- Валерий Александрович Толмачев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;  
E-mail: [tolmachev@ets.ifmo.ru](mailto:tolmachev@ets.ifmo.ru)
- Мария Владимировна Никитина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;  
E-mail: [nikitina@ets.ifmo.ru](mailto:nikitina@ets.ifmo.ru)
- Мария Евгеньевна Кононова** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;  
E-mail: [sergeeva\\_maria@ets.ifmo.ru](mailto:sergeeva_maria@ets.ifmo.ru)

Рекомендована кафедрой  
электротехники и прецизионных  
электромеханических систем

Поступила в редакцию  
12.05.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Толмачев В. А., Никитина М. В., Кононова М. Е. Синтез скоростной подсистемы двухдвигательного следящего электропривода телескопа с трехмассовым механизмом исполнительной оси // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 645—652.

#### SYNTHESIS OF A SPEED SUBSYSTEM OF TWO-MOTOR SERVO DRIVE OF A TELESCOPE WITH THREE-MASS ACTUATING AXLE

V. A. Tolmachev, M. V. Nikitina, M. E. Kononova

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: nikitina@ets.ifmo.ru

The structural solution and speed subsystem synthesis method for 4-loop control system for angle of twin-motor servo drive of biaxial telescope elevation axle are presented. A parametric method of the system synthesis is developed for the case when the executive axle may be represented with a three-mass unbranched mathematical model. A vector-matrix mathematical model of speed subsystem suitable for the dynamic processes analysis is proposed. A comparative analysis of the transient characteristics of speed subsystems designed with the use of the described method and mathematical model is carried out for one- and two-motor servo drive of the telescope. Results of simulation demonstrate that with the two-motor speed, the frequency bandwidth determining its speed, may be twice as large as with the one-motor subsystem. The difference is achieved due to higher resonant frequency of the two-motor mechanism, and halved the mass ratio defining the regulators parameters. The second factor is the most important, as it allows to double the speed even with close values of the three-mass mechanism resonance frequencies.

**KEYWORDS:** servo drive, speed subsystem, actuating axle, three-mass mechanism, structural solution, mathematical model, method of synthesis, comparative analysis.

#### **Data on authors**

- Valery A. Tolmachev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems;  
E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru
- Maria V. Nikitina** — PhD; ITMO University, Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems; E-mail: nikitina@ets.ifmo.ru
- Maria E. Kononova** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems;  
E-mail: sergeeva\_maria@ets.ifmo.ru

**Reference for citation:** Tolmachev V. A., Nikitina M. V., Kononova M. E. Synthesis of a speed subsystem of two-motor servo drive of a telescope with three-mass actuating axle // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 8. P. 645—652 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-645-652