
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.5.11

А. А. АБДУЛЛИН, В. А. ТОЛМАЧЕВ

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВУХМАССОВОГО МЕХАНИЗМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Рассмотрена трехконтурная скоростная подсистема следящего электропривода системы наведения телескопа с двухмассовой исполнительной осью и дополнительной обратной связью по наблюдаемой скорости второй массы. Предложена векторно-матричная математическая модель подсистемы, проведен ее синтез и исследовано влияние ошибок наблюдателя на статические и динамические характеристики подсистемы.

Ключевые слова: следящий электропривод, исполнительная ось, двухмассовый механизм, скоростная подсистема, наблюдатель координат, математическая модель.

Введение. Объектом исследования в настоящей работе является следящий электропривод азимутальной оси опорно-поворотного устройства большого телескопа ТИ-3,12 м, упрощенная конструктивная схема которого описана в работе [1], где отмечено, что угломестная и азимутальная оси опорно-поворотного устройства (ОПУ) являются нежесткими.

Следящие электроприводы осей, как правило, строятся по структурной схеме с подчиненным регулированием параметров, при этом верхняя граница полосы пропускания частот, определяющая динамические ошибки слежения, при наличии лишь датчиков угла и скорости только двигателя (первой массы) ограничивается нижней из частот механических резонансов оси и коэффициентом соотношения масс [2].

Расширение полосы пропускания системы в условиях нежесткости осей ОПУ возможно при введении дополнительных обратных связей по скорости и углу поворота второй массы. Последнее может быть достигнуто либо установкой соответствующих датчиков на обеих массах, либо использованием наблюдателей неизмеряемых датчиками координат.

В проведенной работе исследовалась трехконтурная скоростная подсистема следящего электропривода азимутальной оси со структурной схемой, представленной на рис. 1.

Первый внешний контур регулирования скорости содержит интегральный (И) регулятор скорости, на входе которого напряжение $U_{3\Omega}$, пропорциональное заданному значению скорости входного конца исполнительной оси ОПУ, сравнивается с напряжением U_{Ω} , формируемым датчиками скоростей масс оси ОПУ. Комбинация коэффициентов $K_1=1$, $K_2=0$, $K_3=0$ соответствует системе с обратной связью только по сигналу датчика скорости двигателя; комбинация $K_1\neq 0$, $K_2=0$, $K_3\neq 0$ — системе с обратными связями по сигналу датчика скорости двигателя и по сигналу датчика скорости второй массы; комбинация $K_1\neq 0$, $K_2\neq 0$, $K_3=0$ — системе с обратными связями по сигналу датчика скорости двигателя и по сигналу наблюдателя

скорости второй массы механизма. Здесь полагается, что коэффициенты передачи датчиков скорости масс и наблюдателя одинаковы и равны K_Ω .

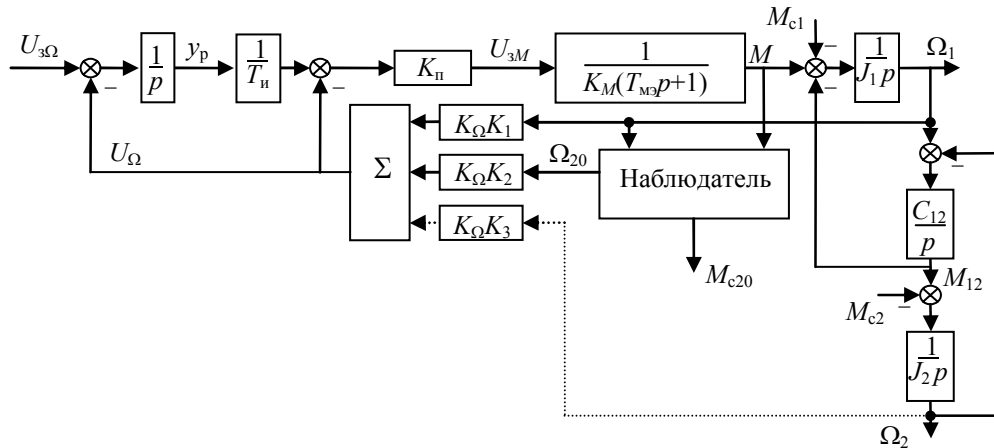


Рис. 1

Выходной сигнал регулятора с постоянной времени интегрирования T_{ii} является напряжением задания для внутреннего контура регулирования скорости, содержащего пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи K_{Π} . Такое двухконтурное 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 (43 %) в двухконтурной скоростной подсистеме с ПИ-регулятором скорости и настройкой на „симметричный оптимум“ [3]. Выходной сигнал U_{3M} регулятора скорости внутреннего контура является сигналом задания для контура регулирования электромагнитного момента двигателя. В работе [4] показано, что синхронный электромеханический преобразователь с датчиком положения ротора, инвертором напряжения и контурами регулирования фазных токов на этапе моделирования может быть представлен эквивалентным контуром регулирования электромагнитного момента с передаточной функцией апериодического звена первого порядка с постоянной времени T_{M} . Методика синтеза регуляторов контуров рассматриваемой подсистемы с обратной связью только по скорости вала двигателя (первой массы) приведена в работе [5].

По данным разработчика ОПУ телескопа ТИ-3,12 м, расчетные параметры двухмассовой модели механизма азимутальной оси следующие: момент инерции первой массы $J_1=6600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, второй массы — $J_2=197\,300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, коэффициент жесткости $C_{12}=8,62\cdot 10^8$, момент нагрузки на валу двигателя $M_{c1}=800 \text{ Н}\cdot\text{м}$ типа „сухое трение“, момент нагрузки на второй массе — ветровой с заданной спектральной плотностью и максимальным значением до 3000 Н·м. Примем коэффициенты передачи датчиков момента и скорости равными соответственно $K_M=1,34 \text{ В/Н}\cdot\text{м}$, $K_\Omega=38,1 \text{ В}\cdot\text{с}$ и $T_{M3}=4\cdot 10^{-4} \text{ с}$. Тогда, используя методику синтеза, изложенную в работе [5], получим $K_{\Pi}=201$, $T_{ii}=72\cdot 10^{-3} \text{ с}$. Полоса пропускания внешнего контура составляет $f_{\Pi}=4,5 \text{ Гц}$ при переходном процессе, соответствующем настройке на „технический оптимум“ с временем $t_{\Pi}=0,214 \text{ с}$ и перерегулированием 4,3 %.

Расширить полосу пропускания частот до значения $f_{\Pi}=17,8 \text{ Гц}$ с сохранением эталонного качества переходного процесса, пересчитав параметры регуляторов контуров ($K_{\Pi}=804$, $T_{ii}=18\cdot 10^{-3} \text{ с}$) в системе с обратной связью только по скорости двигателя, не удастся, поскольку при этом возрастает колебательность переходного процесса относительно эталонного.

Введение дополнительных обратных связей по сигналу идеального датчика скорости второй массы на вход контуров с $K_1=0,1$ и $K_3=0,9$ позволяет реализовать требуемую полосу пропускания частот скоростной подсистемы с сохранением расчетных параметров переход-

ного процесса. При отсутствии такого датчика возможен вариант с использованием наблюдателя скорости второй массы.

Структурная схема системы „двухмассовый механизм—наблюдатель“ представлена на рис. 2.

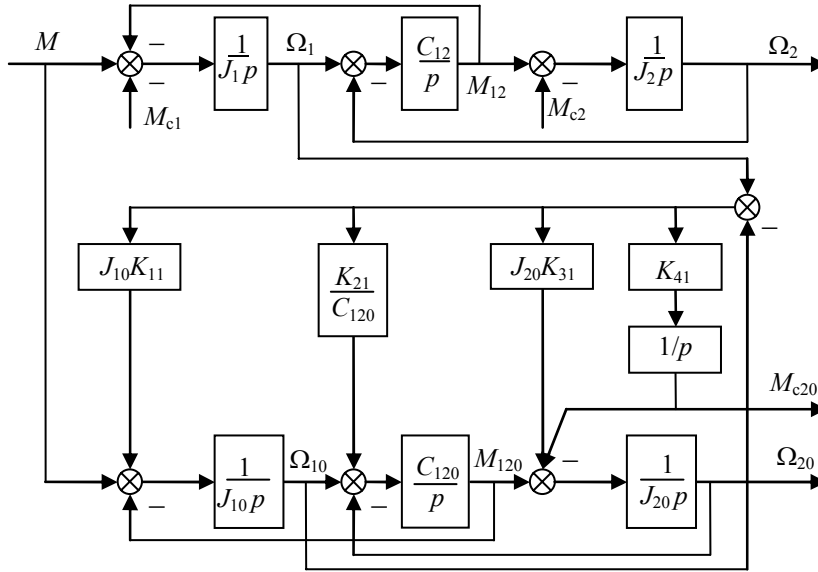


Рис. 2

Наблюдатель позволяет по измеренному электромагнитному моменту двигателя M и скорости вала двигателя Ω_1 восстанавливать скорость первой массы Ω_{10} , момент упругой связи M_{120} , скорость второй массы Ω_{20} и ветровой момент нагрузки на второй массе M_{c2} . В соответствии с работой [6] наблюдатель должен включать в себя четыре интегратора. На вход первого вводится сигнал управления в виде электромагнитного момента двигателя M и сигнал ошибки $(\Omega_1 - \Omega_{10})$, умноженный на коэффициент K_{11} , а на входы остальных интеграторов — только сигналы ошибки, взятые в масштабах, определяемых коэффициентами K_{21} , K_{31} , K_{41} . Эти коэффициенты определяют собственную динамику наблюдателя. Будучи рассчитанными по формулам

$$K_{11} = 2,6\omega_d, K_{21} = J_{10}(\omega_0^2 - 3,4\omega_d^2), K_{31} = 2,6\omega_d \frac{J_{10}}{J_{20}} \left(\frac{\omega_d^2}{\omega_0^2} - 1 \right), K_{41} = -\omega_d^4 \frac{J_{10}J_{20}}{C_{120}},$$

где ω_d — частота, определяющая быстродействие наблюдателя, а ω_0 — резонансная частота двухмассового механизма, они обеспечивают для распределения корней наблюдателя стандартную форму Баттерворта 4-го порядка [6]

$$p^4 + 2,6\omega_d p^3 + 3,4\omega_d^2 p^2 + 2,6\omega_d^3 p + \omega_d^4.$$

Для полинома 4-го порядка длительность затухания колебательного переходного процесса связана с частотой ω_d соотношением $t_{зат} \approx 6,8/\omega_d$.

В нашем случае $\omega_0 = 367 \text{ с}^{-1}$ и при моделировании принято $\omega_d = 1000 \text{ с}^{-1}$, при этом $K_{11} = 2,6 \cdot 10^3$, $K_{21} = -2,15 \cdot 10^{10}$, $K_{31} = 1,98 \cdot 10^4$, $K_{41} = -1,5 \cdot 10^{12}$.

Для приведенной на рис. 1 структурной схемы можно записать систему уравнений в матричной форме

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{B}\mathbf{U},$$

где

$$\mathbf{Y}^T = [M \quad \Omega_1 \quad M_{12} \quad \Omega_2 \quad y_p \quad \Omega_{10} \quad M_{120} \quad \Omega_{20} \quad M_{c20}]$$

— вектор состояния, элементами которого являются соответственно электромагнитный момент двигателя, скорость первой массы (двигателя), момент упругой связи объекта, скорость

второй массы (вилки с трубой телескопа), выход интегратора второго внешнего контура регулирования скорости, восстанавливаемая скорость первой массы, восстанавливаемый момент упругости, восстанавливаемая скорость второй массы, восстанавливаемый момент нагрузки,

$$\mathbf{U}^T = [U_{3\Omega} \quad M_{c1} \quad M_{c2}]$$

— вектор внешних воздействий, элементами которого являются соответственно напряжение задания на входе внешнего контура регулирования скорости и моменты статической нагрузки на первой и второй массах,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{мэ}} & -\frac{K_1 K_{\Omega} K_{\Pi}}{T_{мэ} K_M} & 0 & -\frac{K_3 K_{\Omega} K_{\Pi}}{T_{мэ} K_M} & \frac{K_{\Pi}}{T_{и} K_M T_{мэ}} & 0 & 0 & -\frac{K_2 K_{\Omega} K_{\Pi}}{T_{мэ} K_M} & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_1 K_{\Omega} & 0 & -K_3 K_{\Omega} & 0 & 0 & 0 & -K_2 K_{\Omega} & 0 \\ \frac{1}{J_{10}} & K_{11} & 0 & 0 & 0 & -K_{11} & -\frac{1}{J_{10}} & 0 & 0 \\ 0 & K_{21} & 0 & 0 & 0 & C_{120} - K_{21} & 0 & -C_{120} & 0 \\ 0 & K_{31} & 0 & 0 & 0 & -K_{31} & \frac{1}{J_{20}} & 0 & -\frac{1}{J_{20}} \\ 0 & K_{41} & 0 & 0 & 0 & -K_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

\mathbf{B} — прямоугольная (9×3)-матрица, содержащая три ненулевых элемента: $b_{21} = -1/J_1$, $b_{43} = -1/J_2$, $b_{51} = 1$.

Предложенная математическая модель позволяет анализировать процессы в исследуемой системе при трех различных вариантах обратных связей в зависимости от значений коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 .

С использованием разработанной векторно-матричной модели скоростной подсистемы с наблюдателем было проведено математическое моделирование переходных процессов в системе и проанализировано влияние отклонения параметров наблюдателя от расчетных.

Ряд результатов моделирования иллюстрируются рис. 3, здесь: 1 — скорость вала двигателя Ω_1 , 2 — момент упругой связи механизма оси M_{12} , 3 — скорость второй массы Ω_2 , 4 — восстановленная наблюдателем скорость вала двигателя Ω_{10} , 5 — восстановленный момент упругой связи механизма оси M_{120} , 6 — восстановленная скорость второй массы Ω_{20} , 7 — наблюдаемый момент статической нагрузки M_{c20} , 8 — электромагнитный момент двигателя M , 9 — ветровой момент на второй массе M_{c2} , 10 — эталонная кривая изменения скорости, соответствующая настройке внешнего контура регулирования скорости на технический оптимум $\Omega_{эт}$. На графиках истинные значения всех скоростей увеличены в 20 000 раз, а истинные значения всех моментов уменьшены в 100 раз на рис. 3, а и в 1000 раз — на рис. 3, в.

Кривые на рис. 3, а, б иллюстрируют процессы в системе с обратной связью только по скорости первой массы ($K_1=1$, $K_2=0$, $K_3=0$). Система настроена по методике [5] из условия обеспечения полосы пропускания частот 4,5 Гц. Графики на рис. 3, а иллюстрируют процессы при реакции на скачок сигнала задания при нулевых моментах нагрузки на массах, графики на рис. 3, б — режим стабилизации скорости при наличии ветрового момента на второй массе с максимальным значением 3200 Н·м. Как видно, кривые процессов изменения скорости первой и

второй масс соответствуют эталонной кривой и практически совпадают (рис. 3, а). При этом восстанавливаемые наблюдателем с расчетными параметрами координаты механизма соответствуют истинным. В режиме стабилизации скорости (рис. 3, б) при воздействии ветрового момента максимальные отклонения скоростей масс от заданного значения превышают последнее. Следует заметить, что наблюдатель вполне точно воспроизводит ветровой момент.

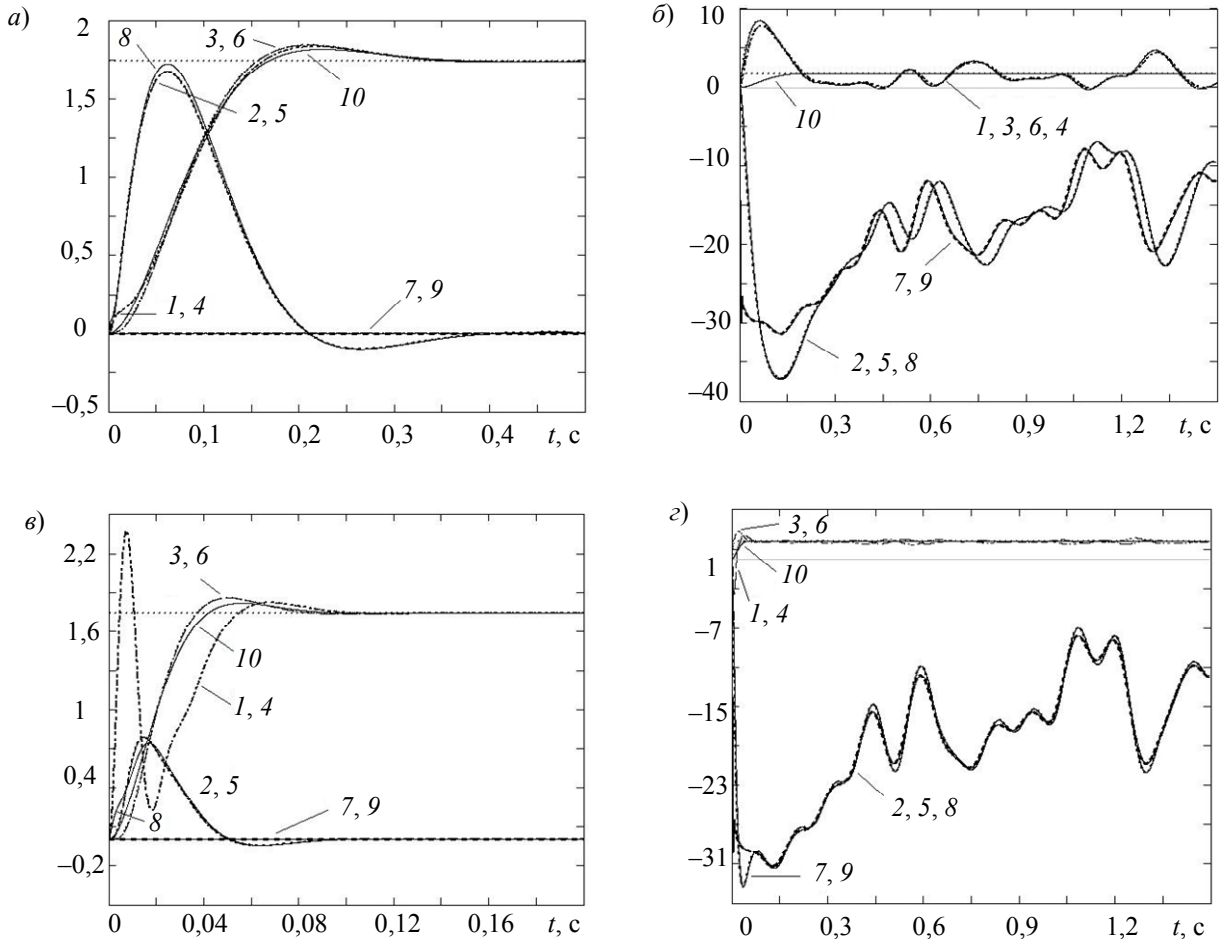


Рис. 3

Кривые на рис. 3, в, г иллюстрируют процессы в системе с обратными связями как по скорости первой массы, так и по восстановленной наблюдателем скорости второй массы ($K_1=0,1$; $K_2=0,9$; $K_3=0$). Система настроена по методике [5] из условия обеспечения полосы пропускания частот 17,8 Гц. Как видно, кривая процесса изменения скорости второй массы соответствуют эталонной (рис. 3, в) при вчетверо большем быстродействии. Процесс изменения скорости первой массы носит более колебательный характер по сравнению с предыдущим вариантом, что не является существенным для данной системы. При этом восстанавливаемые наблюдателем с расчетными параметрами координаты механизма соответствуют истинным. В режиме стабилизации скорости (рис. 3, г) при воздействии ветрового момента максимальные отклонения скорости масс от заданного значения снизились практически вчетверо. Следует заметить, что описанные процессы идентичны процессам в системе с датчиком скорости второй массы ($K_1=0,1$; $K_2=0$; $K_3=0,9$).

Проведенное моделирование показало, что

- отклонение параметров механизма J_1, J_2, C_{12} от расчетных, соответствующих параметрам наблюдателя J_{10}, J_{20}, C_{120} , более чем на 5 % может привести к потере устойчивости скоростной подсистемы, замкнутой по выходному сигналу наблюдателя;

- наличие момента нагрузки M_{c1} типа „сухое трение“ на валу двигателя (на первой массе) приводит к появлению ошибок в воспроизведении наблюдателем скорости второй

массы, момента упругой связи и ветрового момента на второй массе, а замыкание системы по координате наблюдателя приводит к потере ее устойчивости;

— подача на вход синтезированного наблюдателя истинного значения момента M_{c1} приводит к устранению указанных ошибок, а замыкание системы по наблюдаемой скорости эквивалентно замыканию ее по сигналу идеального датчика скорости второй массы.

Заключение. При полном соответствии параметров синтезированного наблюдателя и механизма введение обратной связи по наблюдаемой скорости второй массы в исследуемой структуре скоростной подсистемы может способствовать улучшению ее статических и динамических характеристик. Эффективность применения наблюдателя в системе с выбранной структурой в значительной степени связана с точностью идентификации параметров механизма оси и определения момента нагрузки на валу двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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, № 3. С. 38—44.
2. *Борцов Ю. А., Соколовский Ю. Г.* Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
3. *Ключев В. И.* Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
4. *Толмачев В. А., Антипова И. В., Фомин С. Г.* Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2007. № 44.
5. *Толмачев В. А.* Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 3. С. 68—72.
6. *Кузовков Н. Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976.

Сведения об авторах

Артур Александрович Абдуллин

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;
E-mail: artur.abdullin@gmail.com

Валерий Александрович Толмачев

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Поступила в редакцию
05.05.10 г.