

А. Г. ИЛЬИНА, С. Ю. ЛОВЛИН, С. А. ТУШЕВ

СИНТЕЗ ЛКГ-РЕГУЛЯТОРА ПРЕЦИЗИОННОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОСИ ТЕЛЕСКОПА ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Приведена методика синтеза линейно-квадратичного гауссова регулятора прецизионного электропривода азимутальной оси опытного образца опорно-поворотного устройства телескопа траекторных измерений. Применение такого регулятора в системе управления обеспечивает улучшение точностных характеристик электропривода за счет робастности системы к шуму состояния конструкции телескопа.

Ключевые слова: робастное регулирование, ЛКГ-регулятор, прецизионный следящий электропривод.

Создание моментных электросиловых приводов — одно из основных направлений исследований на кафедре электротехники и прецизионных электромеханических систем (ЭТ и ПЭМС) Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО), являющегося с 2000 г. головным предприятием Российского космического агентства. Моментные электросиловые приводы применяются в информационно-измерительных системах ракетно-космической техники, в уникальных оптических комплексах контроля космического пространства, Российской сети лазерных станций. Основными особенностями разрабатываемых моментных электросиловых приводов являются [1, 2]:

- широкий диапазон скоростей слежения при малых значениях среднеквадратичных ошибок (СКО) наведения;
- инфранизкие скорости движения оптических осей телескопов траекторных измерений (ТТИ) (единицы угловых секунд в секунду);

— использование уникальных прецизионных датчиков координат;

— жесткость конструкции осей опорно-поворотного устройства (ОПУ) ТТИ и, как следствие, возникновение механического резонанса, вызываемое крутильными деформациями осей ОПУ, на частотах от единиц герц.

Комплексы высокоточных оптических измерений, в системах управления которых используются прецизионные электроприводы, разрабатываемые на кафедре ЭТ и ПЭМС, предназначены для преобразования кодов задания траектории движения оптической оси телескопов в углы поворота следящих осей, чаще всего по двум координатам — углу места и азимуту.

На результирующую точность работы системы в дополнение к нелинейностям, вносимым несовершенством аппаратных решений, и внешним возмущениям сильное влияние оказывают частотные характеристики конструкции ОПУ. Жесткость конструкции, кроме ограничения полосы пропускания системы автоматического регулирования (САР), приводит к появлению в работающем оптическом комплексе так называемого шума состояния — помех, представляющих собой суперпозицию вибраций ОПУ на собственных частотах. В больших телескопах шум состояния может достигать значительных амплитуд и приводить к существенному ухудшению точностных показателей работы электропривода — от удвоения СКО слежения до увеличения ее на порядок, в зависимости от конструктивных особенностей соответствующего ОПУ. В замкнутых системах управления компенсации внутреннего возмущающего воздействия препятствуют относительно низкое быстродействие систем, определяемое частотой механического резонанса, а также слабая эффективность отработки сигналов ошибок гармонической природы интегральными и дифференциальными каналами регуляторов.

В рамках вышеизложенного в настоящее время является актуальной задача синтеза системы регулирования, характеризующейся пониженной чувствительностью к влиянию шума состояния объекта управления и потому способной обеспечить более высокую точность движения оптической оси.

В настоящей статье рассматриваются проблемы проектирования и реализации на опытном образце ОПУ ТТИ (разработки ОАО «Научно-производственная корпорация „Системы прецизионного приборостроения“», Москва) системы регулирования, обладающей робастными свойствами к нежелательному воздействию упругих колебаний конструкции ОПУ.

Предлагаемое усовершенствование подчиненной структуры следящего электропривода, позволяющее обеспечить улучшение его точностных свойств за счет учета реальных конструктивных свойств нагрузки, заключается в следующем (рис. 2):

— на основе точной математической модели объекта управления, реализованной в модальной системе координат, базисом которой служат собственные частоты и моды колебаний объекта [3], осуществляется синтез наблюдателя колебаний конструкции ОПУ ТТИ на собственных частотах;

— отдельные сигналы, характеризующие возмущения, вызываемые собственными колебаниями конструкции ОПУ, и поступающие от наблюдателя после умножения на матрицу коэффициентов линейно-квадратичного гауссова (ЛКГ) регулятора, подаются на управляющий вход объекта управления в противофазе.

В результате применения такого алгоритма в подчиненной структуре САУ в управляющем сигнале содержатся гармонические составляющие, приводящие к уменьшению воздействия нежелательных внутренних вибраций конструкции на выходную координату ОПУ.

Рассмотрим объект управления, математическая модель которого характеризуется следующими соотношениями:

$$\dot{x} = Ax + Bu + v; \quad y = Cx + w, \quad (1)$$

где x — вектор состояний объекта управления; u — управляющий входной сигнал; y — выходная координата объекта управления (скорость вращения оси ОПУ ТТИ); A — матрица

состояний, B — матрица управления, C — выходная матрица, v — шум состояния, w — шум измерения.

Точная математическая модель электропривода, учитывающая частотные свойства его нагрузки и оперирующая сигналами колебаний конструкции на собственных частотах, с применением современных информационных технологий может быть легко реализована [4].

На рис. 1 представлены графики амплитудно-частотной характеристики ($A(f)$) колебаний конструкции опытного образца ОПУ ТТИ и его математической модели, полученной с помощью непараметрической идентификации в среде MatLab/System Identification Toolbox.

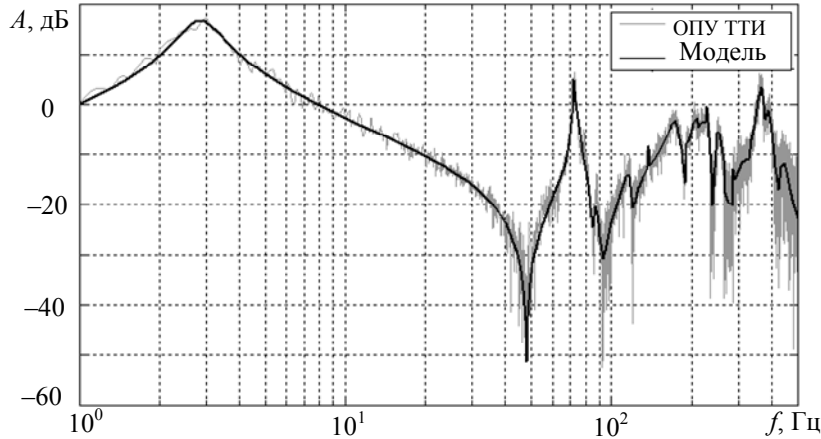


Рис. 1

Алгебраическое уравнение Риккати для наблюдателя объекта (1) имеет следующий вид:

$$AS_e + S_e A^T - S_e C^T C S_e + V = 0, \tag{2}$$

где V — ковариационная матрица шума состояния модели, S_e — искомое решение уравнения.

Матрица коэффициентов фильтра определяется как

$$K_e = S_e C^T. \tag{3}$$

Решение алгебраического уравнения Риккати для наблюдателя позволяет определить коэффициенты матрицы K_e и реализовать наблюдатель колебаний конструкции на собственных частотах.

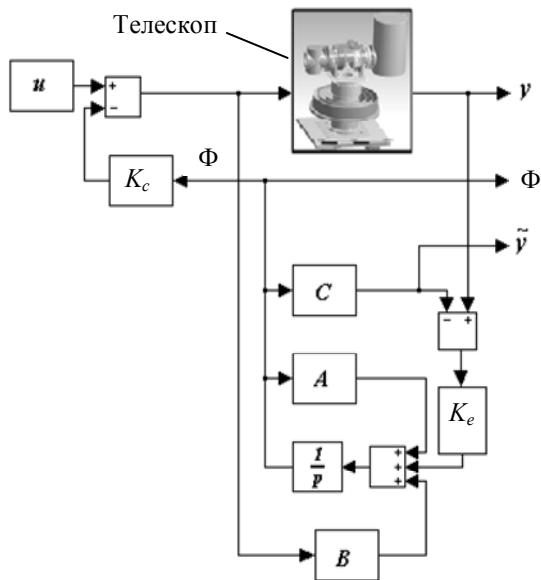


Рис. 2

Схема ЛКГ-регулятора ОПУ ТТИ, реализованного на базе наблюдателя колебаний конструкции на собственных частотах приведена на рис. 2, где p — оператор Лапласа, \tilde{y} — наблюдаемый сигнал выходной координаты объекта, Φ — наблюдаемые сигналы колебаний конструкции, K_c — матрица коэффициентов ЛКГ-регулятора.

Полезными сигналами наблюдателя являются сигналы Φ колебаний конструкции ОПУ ТТИ на собственных частотах. Будучи поданными на управляющий вход объекта в противофазе (после предварительного умножения на матрицу K_c), они будут компенсировать возмущения, вызванные соответствующими колебаниями установки (см. рис. 2).

Матрица K_c ЛКГ-регулятора представляет собой столбец пропорциональных коэффициентов и вычисляется с использованием алгебраического уравнения Риккати для регулятора:

$$AS_c + S_c A^T - S_c B B^T S_c + Q = 0, \quad (4)$$

где матрица Q задается разработчиком в процессе настройки ЛКГ-регулятора, S_c — искомое решение уравнения.

Матрица коэффициентов ЛКГ-регулятора определяется согласно выражению

$$K_c = B^T S_c. \quad (5)$$

Рассмотрим способ [5] настройки ЛКГ-регулятора на модели электропривода, реализованной в среде MatLab/Simulink.

Математическая модель ОПУ ТТИ `model_speed.mat`, полученная с помощью идентификации, замкнутая на наблюдатель колебаний этой модели на собственных частотах и ЛКГ-регулятор, представлена на рис. 3. Так как наблюдатель при реализации характеризуется ограниченной точностью, при моделировании его порядок был снижен по отношению к порядку математической модели: `model_speed.mat` представляет собой систему уравнений вида (1) сорокового порядка (содержит 40 уравнений), тогда как система уравнений наблюдателя содержит 20 уравнений.

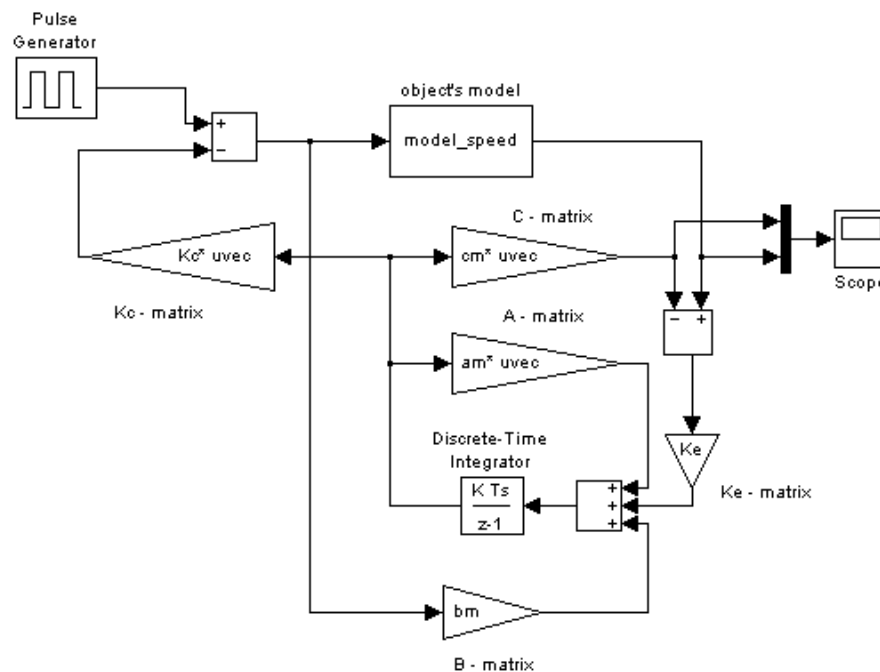


Рис. 3.

Настройка ЛКГ-регулятора осуществлялась при пошаговом мониторинге амплитудно-частотной характеристики модели с ЛКГ-регулятором: от выхода генератора импульсов (Pulse Generator, см. рис. 3) до выхода модели объекта регулирования (`model_speed`, см. рис.3). Последовательным подбором коэффициентов матрицы Q в уравнении (4) производилась коррекция частотных характеристик объекта, замкнутого на регулятор, что продемонстрировано на рис. 4, *a*, где для модели `model_speed.mat` получены графики, обозначенные как ОПУ при нулевых значениях матрицы Q , и обозначенные как ОПУ+ЛКГ, — при следующих значениях Q :

$$Q = [0 \ 1,2 \ 0 \ 1,2 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0,8 \ 0 \ 0,4 \ 0 \ 0,7 \ 0 \ 0,6 \ 0 \ 0,13 \ 0 \ 0,8 \ 0 \ 0,8].$$

На рис. 4, *a* представлены также графики $\omega(t)$, характеризующие реакцию модели на входное ступенчатое воздействие, и графики ее импульсной характеристики. Аналогичные графики, построенные по данным, полученным с использованием опытного образца ОПУ ТТИ, приведены на рис. 4, *b—d*.

Как показывает анализ представленных экспериментальных кривых (см. рис. 4, *b, в, d*), применение ЛКГ-регулятора шума состояния конструкции при сохранении полосы пропускания

объекта управления позволяет уменьшить шумовую составляющую в выходном сигнале, что отражает полученная импульсная характеристика (см. рис. 4, в), а также снизить колебательность объекта управления, что видно по изменившемуся характеру реакции объекта на ступенчатое воздействие (см. рис. 4, д).

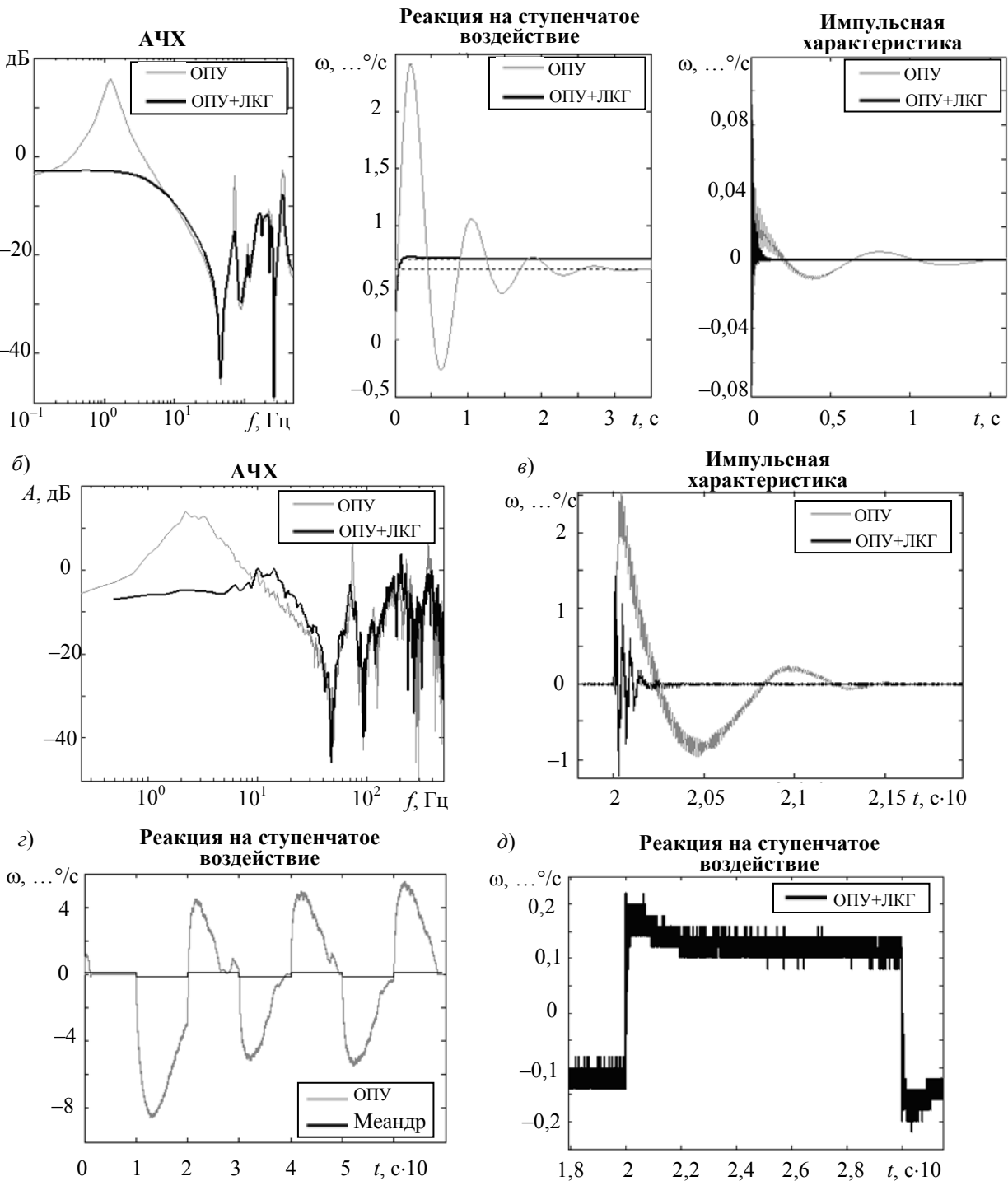


Рис. 4

Достигнутое улучшение частотных свойств объекта управления и последующий синтез подчиненной системы регулирования следящего электропривода оси позволяют повысить точностные характеристики движения оси телескопа за счет уменьшения СКО слежения на всех скоростях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синуцын В. А., Толмачев В. А., Томасов В. С. Системы управления комплексом позиционирования и слежения // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39, № 3. С. 22—27.
2. Глазенко Т. А., Томасов В. С. Состояние и перспективы применения полупроводниковых преобразователей в приборостроении // Там же. 1996. Т. 39, № 3. С. 5—10.
3. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Теория колебаний в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
4. Ljung L. System Identification Toolbox 7 User's Guide [Электронный ресурс]: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/ident/ident.pdf>.
5. Gawronski W. K. Dynamics and Control of Structures: A Modal Approach. N.Y.: Springer-Verlag Inc., 1998. 352 с.

Сведения об авторах

- Аглая Геннадьевна Ильина** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; научный сотрудник;
E-mail: dvanoska@mail.ru
- Сергей Юрьевич Ловлин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем
- Сергей Александрович Тушев** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем

Рекомендована кафедрой
электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Поступила в редакцию
18.01.11 г.