УДК 681.532.55

Д.О. Якимовский, Д.С. Положенцев, Д.И. Джукич

Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса

Рассмотрены вопросы создания исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса, характеризующегося высокими требованиями к точности обработки малых скоростей вращения. Представлена структурная схема электропривода, обладающего повышенной чувствительностью к обработке малых скоростей вращения. Приведены результаты макетирования исполнительного электропривода.

Ключевые слова: система управления угловой скоростью, обратная связь по углу, исполнительный электропривод.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-103-108

Силовые гироскопические комплексы (СГК) используются в составе систем управления ориентацией космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Создание современных КА ДЗЗ требует все более высоких точностных и динамических характеристик СГК [1–3].

Режим стабилизации и режим программных поворотов являются основными режимами работы СГК. Режим стабилизации СГК КА характеризуется низкими задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ, которые могут быть на уровне сотых и даже тысячных долей градуса в секунду, и высокими требованиями к точности их обработки. Режим программных поворотов СГК КА характеризуется задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ на уровне десятков градусов в секунду и высоким значением возмущающего гироскопического момента, действующего по оси ПГ [4].

Управляющий момент СГК определяется как векторное произведение кинетического момента ротора гиromотора на угловую скорость поворота его подвеса [5, 6]. Стабильность модуля кинетического момента ротора обеспечивается с точностью до десятых долей процента, поэтому точность реализации управляющего момента СГК определяется работой исполнительного электропривода (ИЭП) подвеса гиromотора (ПГ) силового гироскопического прибора (СГП) [7, 8].

Описание проблемы

Современный бортовой ИЭП строится на основе вентильного двигателя и работает в режиме обратной связи по угловому положению ПГ. На валу ПГ располагается датчик угла, сообщающий информацию о направлении вектора кинетического момента СГК в систему управления ориентацией КА. Обычно этот датчик угла используется для организации обратной связи по угловому положению и для управления вентильным двигателем. Жесткие требования по ограничению габаритно-массовых характеристик бортовых приводов, стойкости к факторам космического пространства, наличию резервирования и длительному сроку активного существования КА существенно влияют на структуру, состав и элементы конструкции ИЭП [9]. В частности, решающая способность датчика угла ограничена

указанными требованиями и обычно не превышает 16–18 разрядов.

В режиме стабилизации требования к точности обработки заданной скорости вращения ИЭП СГК оцениваются следующим условием: при задании в моменты времени t_i с интервалом $t_{\partial} = t_{(i+1)} - t_i = 0,125$ с значений скорости в моменты времени $t_i + 2 \cdot t_{\partial}$ должно выполняться неравенство:

$$|\Delta\beta_f - \Delta\beta_p| \leq \delta\beta, \quad (1)$$

где $\Delta\beta_f = \beta(t_i + 2 \cdot t_{\partial}) - \beta(t_i)$, $\beta(t_i + 2 \cdot t_{\partial})$, $\beta(t_i)$ – угловые положения ПГ;

$$\Delta\beta_p = [u(t_i) + u(t_i + t_{\partial})] \cdot t_{\partial}, \quad (2)$$

где $u(t_i)$, $u(t_i + t_{\partial})$ – заданные скорости вращения подвеса.

При этом величина $\delta\beta$ должна быть менее 15" для циклограмм штатных задаваемых угловых скоростей ИЭП СГК, представленных заказчиком. Пример такой циклограммы представлен на рис. 1.

Рис. 1. Типичная циклограмма задаваемых угловых скоростей ИЭП СГК

Структурная схема ИЭП СГК с датчиком угла обратной связи, расположенным на оси ПГ, работающего в режиме следящей системы по линейно изменяющемуся углу, представлена на рис. 2, где И – интегратор скорости; РУ – регулятор контура углового положения; ВШИМ – векторный широтно-импульсный модулятор; БВУ – блок вычисления углового положения ротора двигателя; КУМ – ключевой усилитель мощности; Д – двигатель; Р – редуктор; ПГ – подвес гироскопа; ДУ ПГ – датчик уг-

лового положения ПГ; ЭП ДУ – электронный преобразователь сигнала датчика угла; МК – микроконтроллер; БУП – блок управления приводом; ИЭП – исполнительный электропривод; N_ω – управляющий код скорости; $N_\phi^{\text{зад}}$ – расчётный код углового положения ПГ; ΔN_ϕ – сигнал рассогласования контура углового положения; $N_{\text{ШИМ}}$ – входное значение кода ВШИМ; T_a , T_b , T_c – длительности сигнала

лов ВШИМ, управляющие КУМ; $U_{\text{амп1}}$, $U_{\text{амп2}}$, $U_{\text{амп3}}$ – амплитудные значения линейных напряжений, подаваемых на двигатель; $\alpha_{\text{ДВ}}$ – значение углового положения вала двигателя; $\alpha_{\text{ПГ}}$ – значение углового положения ПГ; $M_{\text{упр}}$ – значение момента упругости, создаваемого ПГ; $N_{\text{ПГ}}$ – код измеренного углового положения ПГ.

Рис. 2. Структурная схема ИЭП SGK с датчиком обратной связи, расположенным на оси ПГ

Предлагаемое решение

Проработка технических решений показала невозможность выполнения заданных требований к точности обработки заданной угловой скорости вращения при использовании рассмотренной схемы построения ИЭП в связи с тем, что требовалось увеличение числа разрядов датчика угла до 21–22.

Так как в состав ИЭП входит редуктор (коэффициент редукции 16), для выполнения заданных технических требований было предложено решение об установке датчика угла на ось двигателя ИЭП для организации контура управления по информации об угловом положении ротора двигателя ИЭП. Это яв-

ляется принципиальным отличием от построения системы управления ИЭП SGK, рассмотренной выше. Использование обратной связи по угловому положению ротора двигателя повышает чувствительность ИЭП и как следствие улучшает его динамические характеристики в режиме малых скоростей, что необходимо для выполнения требования к точности обработки заданной угловой скорости поворота подвеса [10–13]. Структурная схема ИЭП, представленная на рис. 2, может быть преобразована к виду, представленному на рис. 3, где ДУ Д – датчик углового положения ротора двигателя; $N_{\text{Д}}$ – код измеренного углового положения ротора двигателя.

Рис. 3. Структурная схема ИЭП SGK с датчиком обратной связи, расположенным на оси двигателя

Коэффициент интегрирования скорости вычисляется по следующей формуле [14, 15]:

$$K_\omega = \frac{K_{\text{кр}}}{\delta} \cdot i, \quad (3)$$

где $K_{\text{кр}}$ – крутизна характеристики «код–скорость», δ – дискретность преобразования «угол–код» датчика угла; i – передаточное число редуктора (в случае расположения датчика обратной связи на оси ПГ $i = 1$).

Крутизна характеристики «код–скорость» определяется как

$$K_{кр} = \frac{\omega_{зад, max}}{2^n - 1}, \quad (4)$$

где $\omega_{зад, max}$ – максимальная задаваемая скорость; n – используемое число разрядов регистра, хранящего значение задаваемой скорости (без учета знакового разряда).

Для отработки системы управления ИЭП с датчиком обратной связи, расположенным на оси ПГ, и датчиком обратной связи, расположенным на оси двигателя, было проведено макетирование с использованием 17-разрядного датчика угла в контурах обратной связи. На рис. 4 представлены диаграммы углового положения ПГ при отработке ИЭП минимальной угловой скорости вращения – 0,0042 °/с при расположении датчика обратной связи на оси ПГ (рис. 4, а) и на оси двигателя (рис. 4, б). Видно, что качество отработки угловой скорости вращения ПГ гораздо выше при расположении датчика обратной связи на оси двигателя.

Рис. 4. Диаграммы углового положения ПГ при отработке ИЭП минимальной угловой скорости вращения: а – при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б – при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

На рис. 5 представлены диаграммы погрешности $(\Delta\beta_f - \Delta\beta_p)$ отработки ИЭП задаваемой угловой скорости вращения по циклограмме, представленной на рис. 1, при расположении датчика обратной связи на оси ПГ (рис. 5, а) и на оси двигателя (рис. 5, б). Видно, что погрешность отработки задаваемой угловой скорости вращения существенно снижается при расположении датчика обратной связи на оси двигателя.

Рис. 5. Диаграммы погрешности отработки ИЭП задаваемой угловой скорости вращения: а – при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б – при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

Несмотря на преимущества установки датчика обратной связи на оси двигателя, использование подобной системы управления имеет существенный недостаток: часть элементов конструкции ИЭП (редукторная передача и ПГ) не охвачена контуром управления. Вследствие этого в создаваемую угловую скорость вращения ПГ будет вноситься погрешность, обусловливаемая нежесткостью конструкции СГП, люфтом редукторной передачи и несоосностью осей двигателя и ПГ.

На рис. 6 представлены результаты отработки ИЭП угловой скорости вращения ПГ при расположении датчиков обратной связи на оси ПГ и на оси двигателя. Видно, что при расположении датчика обратной связи на оси двигателя наблюдаются колебания угловой скорости вращения ПС, которые отсутствуют при расположении датчика обратной связи на оси ПГ. Такие колебания могут отрицательно сказываться на работе системы ориентации КА.

Рис. 6. Пульсации угловой скорости вращения ПГ: а – при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б – при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

На основании вышеизложенного, видится построение ИЭП с использованием двух датчиков угла обратной связи. Причем датчик угла, установленный

на оси двигателя, должен будет замыкать обратную связь только в режиме малых скоростей, когда влияние нежесткости конструкции, люфта редуктора и несоосности осей минимально или отсутствует. В режиме средних и высоких скоростей в качестве

датчика обратной связи должен использоваться датчик угла, расположенный на оси ПГ. При этом структурная схема ИЭП, представленная на рис. 3, примет вид, представленный на рис. 7, где И1 и И2 – интеграторы скорости; АС – анализатор скорости.

Рис. 7. Структурная схема ИЭП СГК с двумя датчиками обратной связи

Анализатор скорости настроен на определение перехода границы между низкой и высокой скоростью. При этом меняются коэффициенты регулятора и задается новое значение интегратора скорости того контура, на котором в дальнейшем будет работать система. Новое значение интегратора рассчитывается таким образом, чтобы сохранить текущее значение сигнала рассогласования по отношению к оси ПГ. Например, при переходе высокой скорости на низкую новое значение интегратора И1 рассчитывается по формуле

$$N_{i1} = N_D + N_{CP_ПГ} \cdot i, \quad (5)$$

где N_{i1} – значение, записываемое в интегратор скорости контура углового положения двигателя; N_D – текущее угловое положение ротора двигателя; $N_{CP_ПГ}$ – значение сигнала рассогласования в контуре углового положения ПГ; i – передаточное число редуктора.

При переходе с низкой скорости на высокую

$$N_{i2} = N_{ПГ} + \frac{N_{CP_Д}}{i}, \quad (6)$$

где N_{i2} – значение, записываемое в интегратор скорости контура углового положения ПГ; $N_{ПГ}$ – текущее угловое положение ПГ; $N_{CP_Д}$ – значение сигнала рассогласования в контуре углового положения ротора двигателя; i – передаточное число редуктора.

На рис. 8 и 9 представлены переходные процессы угловой скорости вращения ПГ при переходе с отработываемой высокой угловой скорости на низкую и низкой угловой скорости на высокую соответственно. На рис. 8, а и 9, а представлены результаты

при работе ИЭП с переключающимися датчиками обратной связи, на рис. 8, б и 9, б представлены результаты работы ИЭП на одном датчике обратной связи, расположенном на оси ПГ. На оси абсцисс отмечены такты съема информации, длительность одного такта составляет 160 мкс.

Рис. 8. Переходные процессы угловой скорости вращения ПГ: а – при работе ИЭП от двух датчиков обратной связи; б – при расположении датчика обратной связи только на оси ПГ

Видно, что переходные процессы угловой скорости вращения ПГ практически идентичны, несмотря на отличную структуру ИЭП. Таким образом, описанный пересчет хранящегося в интеграторе

скорости (И1 или И2) значения позволяет осуществить плавный переход работы ИЭП с одного датчика обратной связи на другой, без внесения дополнительных возмущений в переходной процесс угловой скорости вращения ПГ.

Рис. 9. Переходные процессы угловой скорости вращения ПГ: а – при работе ИЭП от двух датчиков обратной связи; б – при расположении датчика обратной связи только на оси ПГ

Заключение

Подобное построение системы управления угловой скоростью вращения позволяет повысить чувствительность в режиме малых задаваемых скоростей и в то же время обрабатывать погрешности, связанные с несоосностью осей ПГ и двигателя, жесткостью конструкции СГП и люфтом редуктора.

Литература

- Бровкин А.Г. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учеб. пособие / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.
- Распопов В.Я. Силовые гироскопические комплексы в системах стабилизации и управления космических аппаратов. Образовательный аспект // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 3(305). – С. 127–131.
- Разработка систем ориентации и стабилизации микроспутников / Н.А. Ивлев, С.О. Карпенко, А.С. Сивков и др. // *Механика, управление и информатика*. – 2014. – Т. 6, № 1(46). – С. 43–60.
- Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов / А.Р. Мкртычян, Н.И. Башкеев, Д.О. Якимовский, Д.И. Акашев, О.Б. Яковец // *Гироскопия и навигация*. – 2015. – № 1(88). – С. 93–99.
- Сорокин А.В. Электромеханические исполнительные органы для систем ориентации малых космических аппаратов // *Гироскопия и навигация*. – 1998. – № 4. – С. 81–88.
- Heiberg Ch.J. Precision spacecraft pointing using single-gimbal control moment gyroscopes with disturbance / Ch.J. Heiberg, D. Bailey, B. Wie // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2000. – Vol. 23, No. 1. – P. 77–85.
- Арефьев В.П. Инерционные исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов / В.П. Арефьев, А.В. Сорокин, Н.И. Башкеев, О.А. Кондратьев // *Гироскопия и навигация*. – 1995. – № 2(9). – С. 7–11.
- Яковец О.Б. Математическое моделирование процессов управления силовыми гироскопическими приборами // *Завалишинские чтения* 9: сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2009. – С. 196–201.
- Джукич Д.И. Низкоскоростной исполнительный электропривод устройства поворотного солнечной батареи / Д.И. Джукич, Д.О. Якимовский, Д.С. Положенцев // *Завалишинские чтения* 17: сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2017. – С. 88–94.
- Трахтенберг Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.
- Положенцев Д.С. Организация систем управления угловой скоростью с помощью индукционных датчиков угла / Д.С. Положенцев, Д.И. Джукич // *Молодежь. Техника. Космос: тр. VI Общерос. молодежной науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2014. – С. 185–186.*
- Джукич Д.И. Организация систем управления низкоскоростных электроприводов / Д.И. Джукич, Д.О. Якимовский, Д.С. Положенцев // *Завалишинские чтения* 14: сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2014. – С. 139–141.
- Филипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
- Бураков М.В. Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором / М.В. Бураков, О.Б. Яковец // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 804–809.
- Положенцев Д.С. Исполнительный электропривод гиродин / Д.С. Положенцев, Д.И. Джукич // *Электронные и электромеханические системы и устройства: сборник научных трудов*. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. – С. 301–306.

Дмитрий Олегович Якимовский

Канд. техн. наук, начальник науч.-исслед. отд.
АО «НИИ командных приборов»
Трамвайный пр-т, д. 16, г. Санкт-Петербург, Россия, 198216
Тел.: +7-921-319-30-24
Эл. почта: yakimovsky@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Положенцев

Аспирант каф. прикладной механики, автоматизации и управления, инж. I кат.
АО «НИИ командных приборов»
Трамвайный пр-т, д. 16, г. Санкт-Петербург, Россия, 198216
Тел.: +7-904-647-65-64
Эл. почта: pds6476564@yandex.ru

Даниэл Йорданович Джукич

Аспирант каф. прикладной механики, автоматизации и управления, инж. I кат.
АО «НИИ командных приборов»
Трамвайный пр-т, д. 16, г. Санкт-Петербург, Россия, 198216
Тел.: +7-921-983-03-87
Эл. почта: ddi791@mail.ru

Yakimovsky D.O., Polozhentsev D.S., Djukich D.Y.

Increasing sensitivity of control moment gyroscope electric drive when operating at low rotational velocities

The article deals with the issues of designing a control moment gyroscope electric drive characterized by strict requirements to the accuracy of operation at low rotational velocities. The article shows a block diagram for the electric drive with increased sensitivity to operation at low rotational velocities. The results of the electric drive experimentally are also presented.

Keywords: angular velocity control system, angle feedback, electric drive.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-103-108

References

1. Brovkin A.G., Burdygov B.G., Gordiyko S.V. *Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnoe posobie* [Onboard Spacecraft Control Systems: Tutorial]. Moscow, MAI-PRINT, 2010, 304 p.
2. Raspopov V.Y. Force gyroscopic complexes in spacecraft stabilization and control systems. Educational aspect. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2014, № 3 (305), pp. 127–131.
3. Ivlev N.A., Karpenko S.O., Sivkov A.S. et al. Development of systems for orientation and stabilization of microsatellites. *Mechanics, Control, and Informatics*, 2014, vol. 6, no. 1 (46), pp. 43–60.
4. Mkrtchyan A.R., Bashkeev N.I., Yakimovskiy D.O. et al. The current state and prospects of development of power gyroscopic complexes. *Gyroscopy and navigation*, 2015, no. 1 (88), pp. 93–99.
5. Sorokin A.V. Electromechanical executive bodies for small spacecraft orientation systems. *Gyroscopy and navigation*, 1998, no. 4, pp. 81–88.
6. Ch.J. Heiberg, D. Bailey, B. Wie. Precision spacecraft pointing using single-gimbal control moment gyroscopes with disturbance. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, vol. 23, no. 1, pp. 77–85.
7. Arefev V.P., Sorokin A.V., Bashkeev N.I., Kondrat'ev O.A. Inertial actuators of the spacecraft orientation systems. *Gyroscopy and navigation*, 1995, no. 2 (9), pp. 7–11.
8. Yakovets O.B. Mathematical modeling of control processes for power gyroscopic devices. *Proc. report scientific and technical conf. Zavalishin's Reading*. SPb., 2009, pp. 196–201.
9. Dzhukich D.J., Yakimovskiy D.O., Polozhentsev D.S., Low-speed executive electric device of the rotary solar battery. *Zavalishin's Readings*, Sat. reports. SPB, GUAP, 2017, pp. 88–94.

10. Trakhtenberg R.M. *Impulsnye astaticheskie sistemy elektroprivoda s diskretnym upravleniem* [Pulsed astatic systems of the electric drive with discrete control]. Moscow, Energoizdat, 1982, 168 p.

11. Polozhentsev D.S., Dzhukich D.J. Organization of angular velocity control systems using induction angle sensors. *Youth. Equipment. Cosmos: works of the VI All-Russian Youth Scientific-Techn. conf. Balt state tech. the university*. SPb, 2014, pp. 185–186.

12. Dzhukich D.J., Yakimovskiy D.O., Polozhentsev D.S. Organization of control systems for low-speed electric drives. *Zavalishin's Reading*, Sat. report. SPB, GUAP, 2014, pp. 139–141.

13. Phillips Ch., Harbor R. *Sistemy upravleniya s obratnoy svyaz'u* [Systems of feedback control]. Moscow, Laboratory of Basic Knowledge, 2001, 616 p.

14. Burakov M.V., Yakovets O.B. Fuzzy control of a power gyroscopic device. *Izvestiya Vuzov. Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 804–809.

15. Polozhentsev D.S., Dzhukich D.J. Executive electric drive gyrodine, *Electronic and electromechanical systems and devices: collection of scientific papers*, Tomsk, Tomsk Polytechnic University Press, 2016, pp. 301–306.

Dmitriy O. Yakimovsky

Candidate of Technical Sciences, Head Research Department JSC «Command Devices Research Institute»
16, Tramvaynyy pr., St. Petersburg, Russia, 198216
Phone: +7-921-319-30-24
Email: yakimovsky@yandex.ru

Dmitriy S. Polozhentsev

PhD Student of the Department of Applied Mechanics, Automation and Control, Engineer of the 1st category JSC «Command Devices Research Institute»
16, Tramvaynyy pr., St. Petersburg, Russia, 198216
Phone: +7-904-647-65-64
Email: pds6476564@yandex.ru

Daniel Y. Dzhukich

PhD Student of the Department of Applied Mechanics, Automation and Control, Engineer of the 1st category JSC «Command Devices Research Institute»
16, Tramvaynyy pr., St. Petersburg, Russia, 198216
Phone: +7-921-983-03-87
Email: ddi791@mail.ru