

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ НЕСООСНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ В НИЗКОСКОРОСТНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Д. С. ПОЛОЖЕНЦЕВ^{1,2}, Е. П. КАЗАКОВ¹, Б. И. МАЛЫХ¹

¹Научно-исследовательский институт командных приборов, 198216, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: info@niicom.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: common@aanet.ru

Рассмотрен способ минимизации влияния погрешностей, вызванных несоосностью валов двигателя и объекта управления, при наличии механической передачи в составе исполнительного электропривода, когда система управления организована по контуру обратной связи, замкнутому по датчику углового положения ротора двигателя. Описаны особенности создания низкоскоростных прецизионных электроприводов на примере исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса системы ориентации космического аппарата. Экспериментально полученная приведенная к объекту управления разница показаний датчиков углового положения, расположенных на осях исполнительного двигателя и объекта управления, показывает влияние несоосности механической передачи. Приведены результаты математического моделирования, демонстрирующие влияние несоосности механической передачи на создаваемую электроприводом угловую скорость в случае замыкания контура обратной связи по датчику углового положения, расположенного на валу исполнительного двигателя. Описан способ компенсации несоосности механической передачи и представлены результаты отработки угловой скорости вращения при реализации системы управления электроприводом с использованием этого способа. По результатам математического моделирования показано, что использование предложенного способа компенсации позволяет существенно снизить погрешность отработки угловой скорости объекта управления. Преимуществом предложенного способа является то, что его внедрение затрагивает только программное обеспечение электропривода без необходимости доработки аппаратной части.

Ключевые слова: прецизионный электропривод, система управления, угловая скорость, датчик углового положения, механическая передача, несоосность, сигнал рассогласования

Введение. На сегодняшний день задачи, возлагаемые на космические аппараты (КА) и космическую отрасль в целом, постоянно усложняются, что требует от инженерного сообщества поиска и внедрения новых научно-технических решений с учетом уже имеющегося задела. Успешное выполнение целевых функций КА возможно при наличии на борту технических систем и устройств, характеристики которых не только полностью удовлетворяют современным требованиям в отрасли, но и опережают таковые, ориентируясь на перспективные задачи и будущие миссии. К одному из таких устройств можно отнести одну из ключевых подсистем КА — исполнительный электропривод (ИЭП), являющийся и во многом определяющий качество управления как целевой аппаратурой, так и вспомогательными служебными системами аппарата.

В настоящее время можно выделить семейство прецизионных электроприводов космического назначения, работающих в специфических, особых для данного типа приводов,

режимах [1]. Например, управляющий электропривод солнечной батареи [2—4], ИЭП силового гироскопического комплекса системы ориентации КА [5—7] и др., рабочий режим которых характеризуется угловыми скоростями вращения исполнительной оси (ИО) на уровне от десятков до тысячных долей градуса в секунду. Одной из основных задач систем управления таких электроприводов является высокоточная обработка заданной угловой скорости вращения ИО с погрешностью не более нескольких десятков угловых секунд [8].

Известно, что контур обратной связи для регулирования такого уровня угловых скоростей вращения можно организовать, используя датчик углового положения (ДУП) с высокой разрешающей способностью в 23—26 разрядов двоичного цифрового кода [9]. Высокая разрядность позволяет использовать такие датчики для прецизионной оценки угловой скорости вращения ИО и исключить необходимость применения измерителей угловой скорости. В силу этого во многих задачах синтеза современных систем управления прослеживается тенденция к использованию в составе электропривода одного вида датчика обратной связи — углового. Однако на электроприводы, перечисленные выше, в силу особенностей их применения в составе КА, накладываются жесткие требования по габаритно-массовым характеристикам, наличию резервирования, стойкости к разрушающим факторам космической среды и длительному сроку активного существования. В связи с этим разрешающая способность используемых ДУП существенно ограничена и обычно не превышает 16—19 разрядов. Этого недостаточно для формирования контура регулирования угловой скорости вращения, обеспечивающего выполнение требований по точности обработки угловых скоростей вращения ИО.

Описание проблемы. Основная идея организации системы управления угловой скоростью вращения с помощью ДУП, с разрешающей способностью, недостаточной для точного вычисления отмеченных угловых скоростей вращения, состоит в интегрировании задающего угловую скорость сигнала и последующей работе в режиме следящей системы по линейно изменяющемуся углу [10, 11]. Благодаря такой структуре управления возможна плавная обработка угловых скоростей вращения вплоть до тысячных долей градуса в секунду с использованием (16—19)-разрядного ДУП.

Если необходимо повышение чувствительности (плавности) обработки задаваемой угловой скорости и в состав электропривода входит механическая передача, на ось ротора двигателя электропривода может быть установлен ДУП, позволяющий создать дополнительный контур обратной связи [8]. Использование обратной связи по угловому положению ротора двигателя позволяет существенно улучшить чувствительность работы системы управления в режиме малых скоростей вращения, что необходимо для реализации требований по точности, предъявляемых к современным прецизионным электроприводам. Однако у подобных систем управления имеется один существенный недостаток: часть элементов конструкции электропривода остается не охваченной контуром обратной связи. По этой причине в создаваемую угловую скорость вращения ИО будет вноситься погрешность, вызванная, в том числе, несоосностью ротора двигателя и самой ИО.

В качестве примера на рис. 1 продемонстрирована экспериментально полученная на реальном ИЭП силового гироскопического комплекса разница $\Delta\alpha$ показаний ДУП, установленных на оси ротора двигателя и ИО, за один оборот ИО. Перед получением разности угловых положений показания ДУП были приведены к ИО. На рис. 2 представлен результат гармонического анализа разницы показаний ДУП (A — амплитуда, i — номер гармоники).

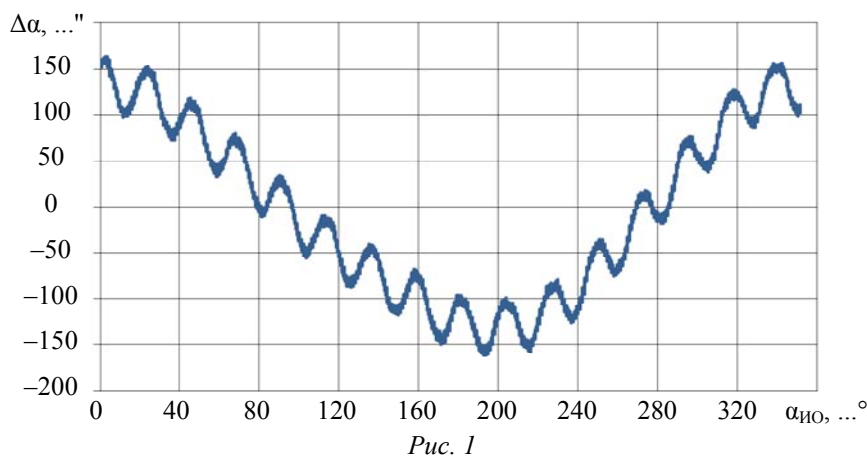


Рис. 1

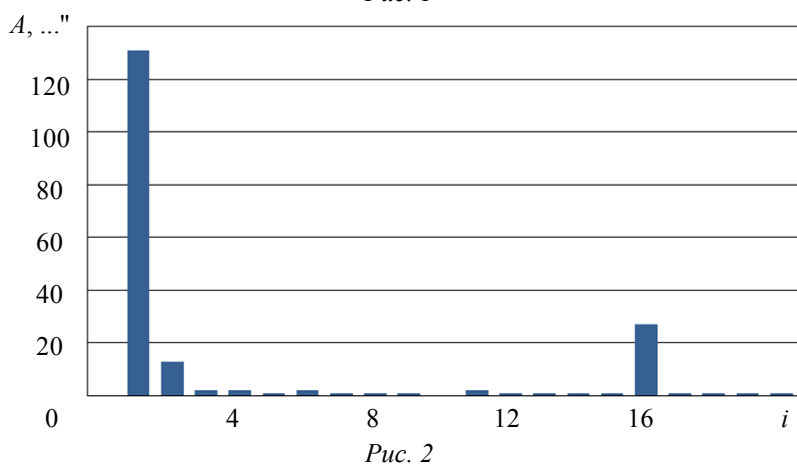


Рис. 2

Очевидно, что сам вид разности показаний ДУП зависит от таких факторов, как угловые погрешности самих ДУП, кинематическая погрешность механической передачи, несоосность установки ее зубчатых колес [12]. В рассматриваемом изделии применена цилиндрическая редукторная передача с коэффициентом редукции 16. Видно, что наибольшее отклонение в рассматриваемую на рис. 1 разницу показаний ДУП вносят 1-я и 16-я гармоники, амплитуда которых определяется несоосностью редукторной передачи. Таким образом, в случае замыкания контура обратной связи по угловому положению ротора двигателя и отработки ИЭП заданной угловой скорости будут наблюдаться колебания угловой скорости вращения ИО. При этом амплитуда и частота этих колебаний будут прямо пропорциональны самой скорости вращения ИО.

Стоит отметить, что полный отказ от механических передач и переход к безредукторному исполнению ИЭП, несмотря на вполне очевидные преимущества, влечет за собой значительное увеличение габаритно-массовых характеристик двигателя [13]. Таким образом, построение электропривода прямого типа не всегда возможно, а решение об использовании в его составе редукторной передачи или ее исключении должно быть принято после тщательного анализа технических требований, предъявляемых к конкретному изделию, и его электромеханических, динамических, габаритно-массовых и энергетических характеристик.

Способы компенсации влияния несоосности. Несосоосность валов — довольно распространенное явление, на которое, по оценкам, в приводной технике приходится около 70 % проблем, связанных с колебаниями угловой скорости вращения и вибрациями. Несосоосность возникает, когда осевые линии вращения двух или более валов не совпадают друг с другом. Например, это может возникнуть при сборке изделия. Для повышения качества и увеличения срока эксплуатации технических систем, в состав которых входят приводы (а таких на сегодняшний день большинство), научным сообществом постоянно разрабатываются новые способы выявления и устранения подобных явлений [14].

Для идентификации и дальнейшего устранения несоосности авторами [14] предложен бесконтактный способ ее онлайн-мониторинга в режиме реального времени с помощью лазерных технологий во время работы привода с последующими калибровками оборудования при техническом обслуживании установки. Несмотря на высокую точность результатов измерений, данный метод предполагает дальнейшую калибровку оборудования. Применительно к ИЭП космического назначения это неосуществимо, так как КА находится в открытом космосе. В связи с этим компенсацию погрешностей, вызванных несоосностью валов, необходимо закладывать на этапах принятия конструкторских или алгоритмических проектных решений.

Довольно известным, и вследствие этого „классическим“, решением является применение специальных компенсирующих муфт. За его относительной простотой стоят вполне очевидные недостатки: погрешности изготовления муфт, погрешности технологических операций сборки элементов системы привода, увеличение габаритно-массовых характеристик изделия и увеличение себестоимости производства. Во избежание подобного необходимы решения, основанные на применении специальных программных алгоритмов компенсации влияния несоосностей, а не введении дополнительных механических элементов, усложняющих конструкцию, ухудшающих габаритно-массовые характеристики и уменьшающих надежность изделия.

Наиболее очевидным решением является тарировка ДУП, расположенных на оси ротора двигателя и ИО [15, 16]. Несмотря на эффективность этого способа, операция тарирования требует достаточно много времени, а тарировочные коэффициенты, подобранные для одного режима работы изделия, могут не подойти для другого. Также тарировочные таблицы занимают большой объем памяти, которая у спецстойких отечественных микроконтроллеров, во-первых, весьма ограничена, а во-вторых, является однократно программируемой (once programmed memory).

Решением может послужить введение дополнительного контура регулирования. В работе [17] предлагается использовать новый метод управления, вибрации и колебания в котором подавляются за счет оценки скорости каждой из подвижных масс многомассовой системы с последующей компенсацией погрешностей при помощи нечеткого регулятора. Результаты разработки зарубежных коллег позволяют сделать выводы об эффективности этого метода. Тем не менее, для оценки скорости каждой из подвижных масс всей системы разработчик должен применять множество соответствующих датчиков, что усложняет конечное изделие, а также делает его значительно дороже.

Также хотелось бы отметить, что аналитические описания появляющихся, вследствие несоосности валов, возмущений могут иметь значительную неточность, вызванную технологическим разбросом параметров изготавливаемых деталей и узлов изделия.

Таким образом, может быть сформулирована следующая задача: необходимо разработать систему управления прецизионным электроприводом космического назначения, снижающую влияние несоосности механической передачи, которая не требует ни программной тарировки ИЭП или его составных частей, ни введения дополнительных элементов в состав изделия.

Предлагаемое техническое решение. Рассмотрим систему управления современного прецизионного электропривода. Управление ИЭП осуществляется путем попеременного замыкания контура обратной связи по угловому положению ротора двигателя и по угловому положению ИО в зависимости от величины заданной угловой скорости вращения. Структурная схема системы управления такого ИЭП представлена на рис. 3 (АКС — анализатор кода скорости; И_Д — интегратор угловой скорости вращения ротора двигателя; И_ИО — интегратор угловой скорости вращения ИО; РУ — регулятор контура угла; ШИМ+УМ — широтно-импульсный модулятор и усилитель мощности; Д — электродвигатель; Р+ИО — редуктор и ИО; ДУП_Д — датчик углового положения ротора двигателя; ДУП_ИО — датчик углового

положения ИО; $N\omega$ — задаваемый код скорости; $N\varphi_{\text{зад_Д}}$ — вычисляемый код углового положения ротора двигателя; $N\varphi_{\text{зад_ИО}}$ — вычисляемый код углового положения ИО; $N\varphi_{\text{Д}}$ — код углового положения ротора двигателя; $N\varphi_{\text{ИО}}$ — код углового положения ИО; $\Delta N\varphi_{\text{Д}}$ — сигнал рассогласования угла по оси ротора двигателя; $\Delta N\varphi_{\text{ИО}}$ — сигнал рассогласования угла ИО; $N_{\text{ШИМ}}$ — код расчетного значения вектора напряжения; $U_{\text{УМ}}$ — выходной сигнал усилителя мощности; $f\omega$ — флаг скорости; $M_{\text{ТР}}$ — момент трения; $M_{\text{Н}}$ — нагружающий момент; $M_{\text{УПР}}$ — момент упругости ИО; $\alpha_{\text{Д}}$ — угловое положение ротора двигателя; $\alpha_{\text{ИО}}$ — угловое положение ИО; $\omega_{\text{ИО}}$ — угловая скорость ИО).

Замыкание контура обратной связи по угловому положению ротора двигателя имеет существенный недостаток: часть элементов конструкции электропривода (редукторная передача и ИО) не охвачена контуром управления. Вследствие этого в получаемую угловую скорость вращения ИО будет вноситься погрешность, обусловливаемая несоосностью механической передачи. В то же время замыкание контура управления по угловому положению ИО может не обеспечивать требуемую точность регулирования на низких скоростях, как показано в [8]. Следует отметить, что в рассматриваемой системе управления за малую принята скорость менее 1 %/с. Эта граница определяется экспериментально, в зависимости от предъявляемых к электроприводу технических требований, режимов его работы и характеристик его составных частей (передаточного числа редуктора, чувствительности ДУП и т.д.).

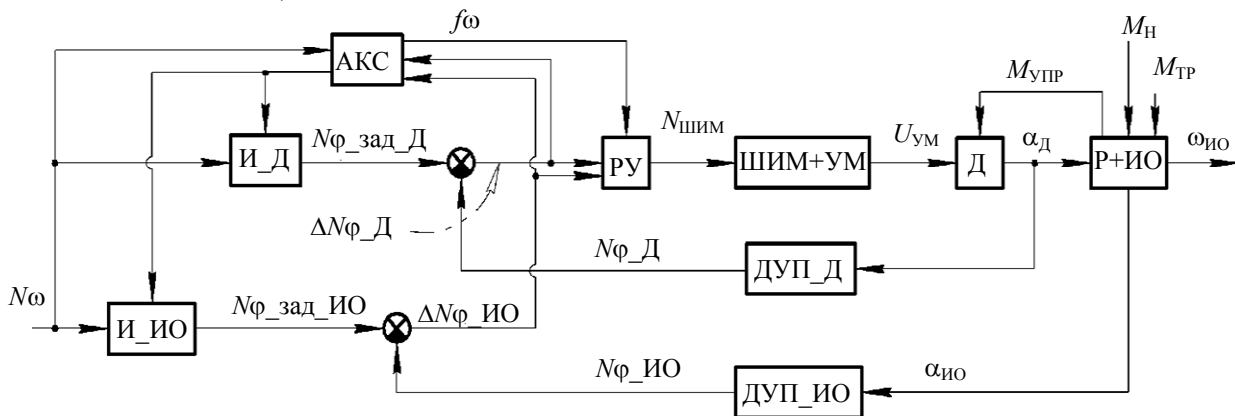


Рис. 3

Представленная система управления ИЭП работает по следующему алгоритму: на каждом такте управления интеграторы скорости вычисляют углы поворота ИО и ротора двигателя, АКС определяет момент перехода с высокой задаваемой скорости на низкую и наоборот, выставляет соответствующий флаг ($f\omega$) и производит перерасчет значений, хранящихся в интеграторах скорости. Далее устройства сравнения вычисляют разности заданных и текущих кодов углового положения по осям ротора двигателя и ИО. Регулятор угла осуществляет цифровое преобразование сигнала рассогласования в величину результирующего вектора напряжения двигателя. Широтно-импульсный модулятор и усилитель мощности на основе полученного значения формируют напряжения на фазах статора двигателя.

Для минимизации влияния несоосности при малых угловых скоростях вращения ИО в случае замыкания контура обратной связи по угловому положению ротора двигателя предлагается оценивать сигнал рассогласования контура углового положения ИО и корректировать величину задаваемого кода скорости, т.е. фактически внести в систему управления еще один контур регулирования. Структурная схема такой системы представлена на рис. 4.

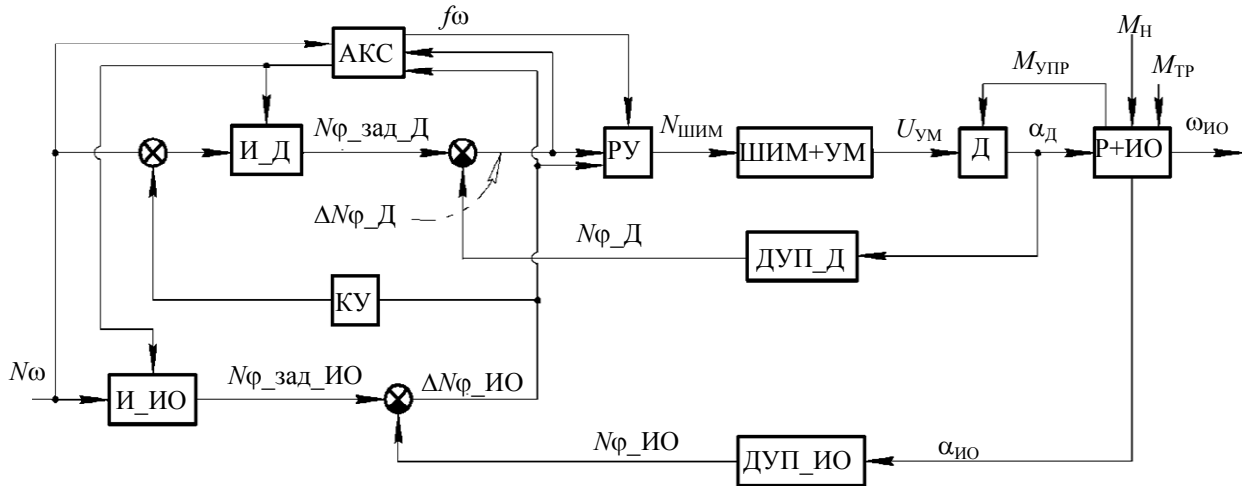


Рис. 4

В схему, представленную на рис. 3, добавлены корректирующее устройство (КУ) и сумматор (рис. 4). КУ оценивает текущий сигнал рассогласования угла ИО и изменяет задаваемый код скорости, компенсируя тем самым влияние несоосности механической передачи. КУ может представлять собой ПИД-регулятор или его модификации [18—20]. Таким образом, управляющий сигнал формируется исходя из показаний обоих ДУП.

Передачная функция системы управления ИЭП с учетом предложенного способа компенсации несоосности, где входным сигналом является задаваемый код скорости $N\omega$, а выходным — угловое положение ИО $\alpha_{\text{ИО}}$, имеет вид:

$$W_2(s) = \frac{W_1(s)[1 + W_{\text{И_ИО}}(s)W_{\text{КУ}}(s)]}{1 + W_1(s)W_{\text{КУ}}(s)W_{\text{ДУП_ИО}}(s)},$$

где $W_1(s)$ — передаточная функция системы управления ИЭП без учета предложенного способа компенсации; $W_{\text{И_ИО}}(s)$ — передаточная функция интегратора угловой скорости вращения ИО; $W_{\text{КУ}}(s)$ — передаточная функция корректирующего устройства; $W_{\text{ДУП_ИО}}(s)$ — передаточная функция датчика углового положения ИО.

В свою очередь, передаточная функция системы управления ИЭП без предложенного способа компенсации имеет вид:

$$W_1(s) = W_{\text{И_Д}}(s) \frac{W_{\text{РУ}}(s)W_{\text{УМ}}(s)W_{\text{Д}}(s)}{1 + W_{\text{РУ}}(s)W_{\text{УМ}}(s)W_{\text{Д}}(s)W_{\text{ДУП_Д}}(s)} W_{\text{РП}}(s)W_{\text{ОУ}}(s),$$

где $W_{\text{И_Д}}(s)$ — передаточная функция интегратора угловой скорости вращения ротора двигателя; $W_{\text{РУ}}(s)$ — передаточная функция регулятора контура угла; $W_{\text{УМ}}(s)$ — передаточная функция широтно-импульсного модулятора и усилителя мощности; $W_{\text{Д}}(s)$ — передаточная функция электродвигателя; $W_{\text{ДУП_Д}}(s)$ — передаточная функция датчика углового положения ротора двигателя; $W_{\text{РП}}(s)$ — передаточная функция редукторной передачи; $W_{\text{ОУ}}(s)$ — передаточная функция объекта управления, жестко закрепленного на ИО. Более подробно математическое описание системы управления ИЭП представлено в [11].

Математическая модель. Для подтверждения работоспособности предложенного способа компенсации несоосности проведено математическое моделирование работы системы управления ИЭП со следующими параметрами:

1) АКС отсутствует, поскольку моделирование проводилось при низкой заданной скорости;

2) интеграторы угловой скорости вращения ротора двигателя и ИО (И_Д и И_ИО):

$$W_{И_Д}(s) = \frac{6,1171}{s};$$

$$W_{И_ИО}(s) = \frac{97,8736}{s};$$

3) регулятор контура угла (РУ) представляет собой ПИД-регулятор с ограничением выходного сигнала;

4) напряжение источника питания 27 В;

5) широтно-импульсный модулятор и усилитель мощности (ШИМ+УМ):

$$U_{УМ} = 0,0482 \cdot N_{ШИМ};$$

6) электродвигатель (Д) описан как двигатель постоянного тока со следующими параметрами:

$K_{\omega} = 1$ В·с/рад — коэффициент противоэдс двигателя; $R_3 = 12,3$ Ом — эквивалентное фазное сопротивление двигателя; $L_3 = 13,5$ мГн — эквивалентная фазная индуктивность двигателя; $J_Д = 7 \cdot 10^{-5}$ кг·м² — момент инерции ротора двигателя;

7) редуктор и ИО (Р+ИО):

Редукторная передача была описана как часть многомассовой системы, в которой учитываются 1-я и 16-я гармоники, вносящие наибольшие отклонения в разность показаний ДУП (см. рис. 1):

$$\left(\frac{H^2}{C} + J \right) \ddot{\alpha}_{ИО} = \left(\frac{\alpha_Д}{i} - \alpha_{ИО} - \alpha_{п} \right) C_{угл} - \mu \omega_{ИО} - M_{Стр} - M_Н;$$

$$\alpha_{п} = 6,5 \cdot 10^{-4} \sin(\alpha_{ИО}) + 1,2 \cdot 10^{-4} \sin(16 \cdot \alpha_{ИО}),$$

где $H = 250$ Н·м·с — кинетический момент; $C = 7,58 \cdot 10^4$ Н·м/рад — суммарная жесткость элементов конструкции прибора относительно направления гироскопического момента; $J = 0,267$ кг·м² — момент инерции относительно оси вращения ИО; $i = 16$ — передаточное число редуктора; $\alpha_{п}$ — угловая погрешность, вносимая несоосностью редуктора; $C_{угл} = 6,7 \cdot 10^5$ Н·м/рад — угловая жесткость редуктора и ИО; $\mu = 0,1$ Н·м·с/рад — коэффициент вязкого трения при движении относительно оси вращения ИО; $M_{Стр} = 0,05$ Н·м — момент сухого трения; $M_Н$ — нагружающий момент от скорости вращения КА;

8) датчики углового положения ротора двигателя и ИО (ДУП_Д и ДУП_ИО):

$$W_{ДУП_И}(s) = W_{ДУП_ИО}(s) = \frac{83443}{0,001s+1};$$

9) корректирующее устройство является П-регулятором с коэффициентом 0,05 и ограничением выходного сигнала.

На рис. 5 представлены графики угловых скоростей вращения ИО (заданная величина 0,9997 °/с), полученные в результате математического моделирования, на интервале от 0 до 360° ИО с использованием предложенного способа компенсации несоосности (1) и без него (2).

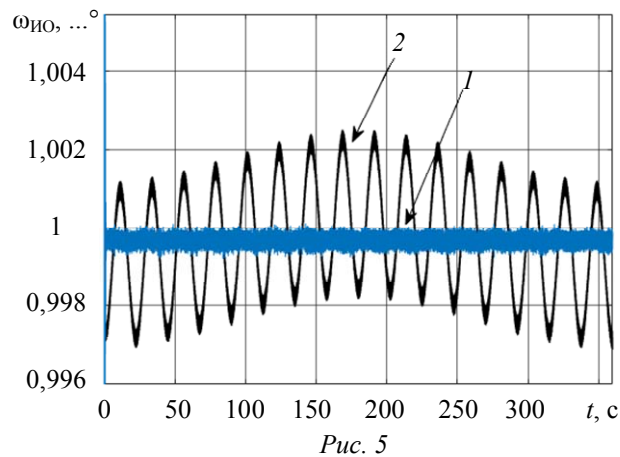


Рис. 5

Видно, что погрешность угловой скорости вращения ИО, вносимая несоосностью механической передачи, значительно снижается при работе системы управления ИЭП с предложенным способом компенсации, вращение ИО становится более равномерным.

Заключение. Таким образом, представленные на рис. 5 результаты моделирования показывают, что предложенная система управления ИЭП позволяет существенно снизить амплитуду и частоту колебаний угловой скорости вращения ИО, вызванных несоосностью механической передачи, когда контур обратной связи замкнут по угловому положению ротора двигателя. Важно, что внедрение предложенного способа компенсации затрагивает только программное обеспечение блока управления ИЭП, не требуя введения дополнительных конструктивных или электронных элементов в состав электропривода, что сохраняет его габаритно-массовые и энергетические характеристики на прежнем уровне. Также не требуются предварительная тарировка и занесение тарировочных коэффициентов в память микроконтроллера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов А. С., Якимовский Д. О. Управление электроприводами космических аппаратов в особых режимах // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6(37). С. 26—31.
2. Русскин В. А., Семенов С. М., Диксон Р. К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Известия ТПУ. 2016. № 4. С. 78—87.
3. Аржанов К. В. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце // Известия ТПУ. 2014. № 4. С. 139—146.
4. Шепталин Д. С., Геча В. Я. Привод солнечной батареи космического аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. № 3-3. С. 213—216.
5. Полянин К. С., Гордиенко В. С. Система ориентации космического аппарата на базе силового гироскопического комплекса // Наука без границ. 2019. № 1(29). С. 16—25.
6. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод гиродина // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2016. С. 301—306.
7. Сомов Е. И., Бутырин С. А. Полетная параметрическая идентификация и силовая гироскопическая стабилизация крупногабаритного спутника // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 6. С. 17—25.
8. Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21, № 3. С. 103—108.
9. Садовников М. А. Измерение скорости движения силового электропривода с помощью оптических датчиков угла // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 52—57.

10. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й., Захаров Д. Н. Система управления исполнительного электропривода устройства поворотного солнечной батареи космического аппарата // Омский научный вестник. 2019. № 5(167). С. 72—76.
11. Положенцев Д. С., Смирнов К. А. Система управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 8. С. 31—38.
12. Янгулов В. С. Экспериментальные исследования влияния параметров редуктора на динамику электромеханического исполнительного органа // Известия ТПУ. 2008. № 2. С. 139—146.
13. Овсянников Е. М., Цаценкин В. К. Следящий электропривод с малым передаточным числом редуктора для систем наведения // Электротехника. 2000. № 2. С. 50—54.
14. Anthony Simm, Qing Wang, Songling Huang, Wei Zhao. Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment // Measurement. 2016. Vol. 87. P. 104—116.
15. Бохман Е. Д., Бурнашев М. Н., Филатов Ю. В. и др. Разработка и калибровка преобразователей угла с микропроцессорной автокоррекцией // Гироскопия и навигация. 2005. № 4(51). С. 72—82.
16. Zhong Wu, Yaoling Li. High-Accuracy Automatic Calibration of Resolver Signals via Two-Step Gradient Estimators // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18. P. 2883—2891.
17. Zhang Deli, Yang Haiqiang, An Luling. Two-stage open-loop velocity compensating method applied to multi-mass elastic transmission system // Chinese Journal of Aeronautics. 2014. Vol. 27, N 1. P. 182—188.
18. Вадутов О. С. Синтез дискретных систем с ПИД-регулятором // Известия ТПУ. 2008. № 5. С. 48—52.
19. Ефимов С. В., Замятин С. В., Гайворонский С. А. Синтез ПИД-регулятора с учетом расположения нулей и полюсов системы автоматического регулирования // Известия ТПУ. 2010. Т. 317, № 5. С. 102—107.
20. Фащиленко В. Н., Решетняк С. Н. Особенности настройки параметров pid-регулятора на энергоэффективный резонансный режим работы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 12. С. 297—301.

Сведения об авторах

- Дмитрий Сергеевич Положенцев** — АО „Научно-исследовательский институт командных приборов“, сектор по разработке электроприводов; начальник сектора; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, управление в технических системах; ассистент;
E-mail: pds6476564@yandex.ru
- Егор Павлович Казаков** — АО „Научно-исследовательский институт командных приборов“, сектор по разработке электроприводов; инженер;
E-mail: e.kazakov.1@mail.ru
- Богдан Игоревич Малых** — АО „Научно-исследовательский институт командных приборов“, сектор по разработке электроприводов; техник 1-й категории;
E-mail: malyhb@mail.ru

Поступила в редакцию
03.06.2021 г.

Ссылка для цитирования: Положенцев Д. С., Казаков Е. П., Малых Б. И. Способ компенсации влияния несоосности механической передачи в низкоскоростных прецизионных электроприводах // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 638—648.

A METHOD FOR COMPENSATING FOR THE INFLUENCE OF MECHANICAL TRANSMISSION MISALIGNMENT IN LOW-SPEED PRECISION ELECTRIC DRIVES

D. S. Polozhentsev^{1,2}, E. P. Kazakov¹, B. I. Malykh¹

¹JSC Scientific Research Institute of Command Devices, 198216, St. Petersburg, Russia
E-mail: info@niicom.ru

²St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 190000, St. Petersburg, Russia
E-mail: common@aanet.ru

A method is considered to minimize the influence of errors caused by misalignment of the shafts of the engine and the control object, in the presence of a mechanical transmission as part of the executive electric drive, when the control system is organized along a feedback loop closed by the sensor of the angular position of the rotor of the engine. Peculiarities of the low-speed precision electric drive design are described on the example of executive electric drive of the power gyroscopic complex of a spacecraft orientation control system. Experimentally obtained difference in the readings of the angular position sensors located on the axes of the executive motor and the control object, reduced to the control object, shows the influence of the misalignment of the mechanical transmission. Results of mathematical modeling are presented, demonstrating the influence of the misalignment of the mechanical transmission on the angular velocity exerting by the electric drive in the case of a closed feedback loop with angular position sensor located on the shaft of the executive motor. A method for compensating for mechanical transmission misalignment is described and the results of resulting angular speed of rotation when a control system using this method is implemented for the electric drive are presented. Based on the results of mathematical modeling, it is shown that the use of the proposed compensation method can significantly reduce the error in resulting angular velocity of the control object. The advantage of the proposed method is that its implementation affects only the software of the electric drive without the need to modify the hardware.

Keywords: precision electric drive, control system, angular velocity, angular position indicator, mechanical transmission, misalignment, loop error signal

REFERENCES

1. Konovalov A.S., Yakimovsky D.O. *Information and Control Systems*, 2008, no. 6(37), pp. 26–31 (in Russ.)
2. Russkin V.A., Semenov S.M., Dixon R.K. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, no. 4, pp. 78–87 (in Russ.)
3. Arzhanov K.V. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2014, no. 4, pp. 139–146. (in Russ.)
4. Sheptalin D.S., Gecha V.Ya. *Izvestiya Tula State University*, 2010, no. 3-3, pp. 213–216. (in Russ.)
5. Polyanin K.S., Gordienko V.S. *Science without Borders*, 2019, no. 1(29), pp. 16–25. (in Russ.)
6. Polozhentsev D.S., Djukich D.Y. *Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva: sbornik nauchnykh trudov*, Tomsk, 2016, pp. 301–306. (in Russ.)
7. Somov Ye., Butyrin S. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, no. 6(14), pp. 17–25. (in Russ.)
8. Yakimovsky D.O., Polozhentsev D.S., Djukich D.Y. *Proceedings of the TUSUR University*, 2018, no. 3(21), pp. 103–108. (in Russ.)
9. Sadovnikov M.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 6(51), pp. 52–57. (in Russ.)
10. Polozhentsev D.S., Dzhukich D.J., Zakharov D.N. *Omsk Scientific Bulletin*, 2019, no. 5(167), pp. 72–76. (in Russ.)
11. Polozhentsev D.S., Smirnov K.A. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2019, no. 8, pp. 31–38. (in Russ.)
12. Yangulov V.C. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2008, no. 2, pp. 139–146. (in Russ.)
13. Ovsyannikov E.M., Tsatsenkin V.K. *Electrical engineering*, 2000, no. 2, pp. 50–54. (in Russ.)
14. Anthony Simm, Qing Wang, Songling Huang, Wei Zhao, *Measurement*, 2016, vol. 87, pp. 104–116.
15. Bokhman E.D., Burnashev M.N., Filatov Yu.V. et al. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2005, no. 4(51), pp. 72–82. (in Russ.)
16. Zhong Wu, Yaoling Li. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, pp. 2883–2891.
17. Zhang Deli, Yang Haiqiang, An Luling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, no. 1(27), pp. 182–188.
18. Vadutov O.S. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, no. 5, pp. 48–52. (in Russ.)
19. Efimov S.V., Zamyatin S.V., Gaivoronsky S.A. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, no. 5, pp. 16–20. (in Russ.)
20. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2015, no. 12, pp. 297–301. (in Russ.)

Data on authors

Dmitry S. Polozhentsev — JSC Scientific Research Institute of Command Devices, Department of Electric Drive Design; Head of the Department; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Control in Technical Systems; Assistant; E-mail: pds6476564@yandex.ru

- Egor P. Kazakov** — JSC Scientific Research Institute of Command Devices, Department of Electric Drive Design; Engineer; E-mail: e.kazakov.1@mail.ru
- Bogdan I. Malykh** — JSC Scientific Research Institute of Command Devices, Department of Electric Drive Design; Technician of the 1st Category; E-mail: malyhb@mail.ru

For citation: Polozhentsev D. S., Kazakov E. P., Malykh B. I. A method for compensating for the influence of mechanical transmission misalignment in low-speed precision electric drives. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 8. P. 638—648 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-638-648