

О РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА С ШАРИКО-ВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ, ЗАЩИЩЕННОЙ ОТ ЗАКЛИНИВАНИЯ

Р.Р. Абдулин¹

abdulin@mnpk.ru

В.В. Большаков¹

bolshakov.blumey@yandex.ru

А.С. Зудилин¹

zudilin.mail@mnpk.ru

А.Н. Стищенко¹

stitsenko.mail@mnpk.ru

Н.В. Крылов¹

korish@bk.ru

С.Л. Самсонович²

samsonovich40@mail.ru

М.В. Борисов²

one2k.bmw@gmail.com

Н.Б. Рожнин²

rozhnin@yandex.ru

В.Н. Чубиков²

valichu@gmail.com

¹ АО МНПК «Авионика», Москва, Российская Федерация

² МАИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В настоящее время актуальным является вопрос о повышении надежности электромеханического привода, а точнее, об исключении возможности заклинивания в шарико-винтовой передаче. Предложено техническое решение, позволяющее заменить дорогостоящую, покупаемую за рубежом шарико-винтовую передачу. Проведен анализ конструктивных решений, повышающих надежность электромеханического привода. Предложена и запатентована конструкция шарико-винтовой передачи с сепаратором, в которой гайка выполняет функцию поршня. Конструкция состоит из корпуса, имеющего гладкую цилиндрическую поверхность, и сепаратора с гнездами, расположенными по винтовой линии с шагом, равным шагу винта. Сепаратор и корпус расположены коаксиально и жестко соединены между собой по торцам сепаратора так, что тела качения постоянно контактируют с поверхностями профиля винта, внутренней гладкой цилиндрической поверхностью корпуса гайки и поверхностями гнезд сепаратора. Предлагаемое конструктивное решение шарико-винтовой передачи, у которой гайка выполнена без внутреннего винтового профиля, существенно упрощает конструкцию и технологию изготовления. Для экспе-

Ключевые слова

Надежность, электромеханический привод, шарико-винтовая передача, антизаклинивающее устройство, динамические характеристики привода с шарико-винтовой передачей

риментального определения статических и динамических характеристик электромеханического привода, содержащего шарико-винтовую передачу с сепаратором, изготовлен макетный образец, аналогичный электромеханическому приводу, в котором используется шарико-винтовая передача с рециркуляцией шариков. Выполнен сравнительный анализ прочности рассмотренных конструкций шарико-винтовой передачи. Проведенный анализ шарико-винтовой передачи с сепаратором, имеющей более простую и надежную конструкцию, и характеристики электромеханического привода с такой передачей позволяют рассматривать ее как импортозамещающую шарико-винтовую передачу с рециркуляцией шариков

Поступила 27.09.2019

Принята 19.05.2020

© Автор(ы), 2020

Введение. Общей тенденцией развития приводной техники, применяемой в летательных аппаратах (ЛА), является внедрение электромеханических приводов (ЭМП) взамен широко используемых электрогидравлических. Такая тенденция обусловлена тем, что замена центральной бортовой гидросистемы на электросистему позволяет существенно сократить суммарную массу системы управления и стоимость ее обслуживания [1]. Например, на самолете F-35 полная замена центральной гидросистемы на электросистему позволила уменьшить на 300 кг массу системы управления [2], а переход на электросети с ЭМП позволяет практически исключить периодическое обслуживание ЛА, необходимое при наличии гидросетей.

Переход на электросети и приводные системы, работающие от этих сетей, осуществляется в двух направлениях: разработка электрогидростатических приводов и ЭМП. В каждом направлении в исполнительных механизмах приводов используются электрический двигатель и редуктор с поступательным движением выходного звена. В первом случае в качестве редуктора используется автономная гидросистема насос–цилиндр, в которой электродвигатель вращает насос. Во втором — механическая передача, преобразующая вращательное движение ротора электродвигателя в поступательное движение выходного звена, как правило, шарико-винтовой передачи (ШВП).

Как следует из сравнения функционального состава этих приводов, ЭМП являются более перспективными, чем электрогидростатические, так как при их использовании отсутствуют гидрожидкости, они проще и дешевле в изготовлении и эксплуатации [3]. Однако у электрогидроста-

тических приводов более отработанные технологии изготовления, практический опыт эксплуатации, а также проверенный годами эксплуатации ресурс работы элементов. На этом основании принято считать, что применение электрогидростатических приводов является промежуточным решением проблемы перехода на ЭМП [4, 5].

Основным сдерживающим фактором внедрения ЭМП в приводные системы ЛА является сложившееся мнение о невысокой надежности ШВП вследствие теоретически возможного заклинивания шариков [2, 4], несмотря на то, что информации о заклинивании этих передач в специализированной технической литературе нет. Работы по созданию привода с ШВП, в котором исключено заклинивание, ведутся как за рубежом [6–8], так и в России [9, 10], поскольку проблема повышения надежности всегда является актуальной. Одному из путей решения этой проблемы посвящена настоящая статья.

Способы устранения возможного заклинивания в ШВП ЭМП. В настоящее время повышение надежности ЭМП с ШВП достигается за счет введения дополнительных устройств, получивших название антизаклинивающих или резервных. В качестве таких устройств используют двойной шариковый винт с одним электродвигателем и дифференциальным механизмом [6], или используют один винт с несколькими гайками, которые приводятся в действие отдельными двигателями [8].

В патенте США [6] в электромеханическом приводе (рис. 1) вращение от электродвигателя передается на дифференциальный механизм. Схема дифференциала здесь полностью не раскрыта, так как он не является частью изобретения. Дифференциал имеет два одинаковых выхода, из которых через цилиндрические зубчатые колеса 1–4, гайки 5 и 6 передаются потоки мощности на двойной шариковый винт 7, 8, где осевые движения суммируются.

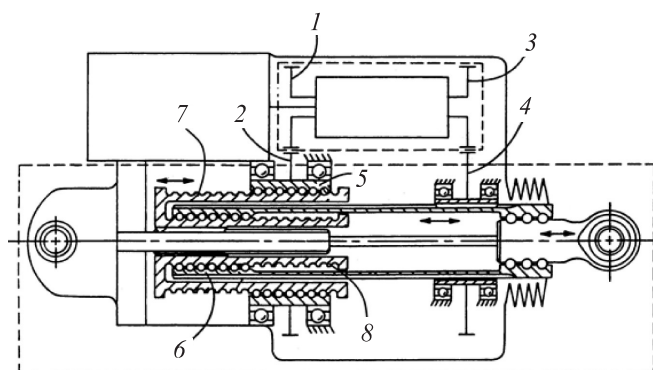


Рис. 1. Электромеханический привод с двойным шариковым винтом

Направления винтовых поверхностей на винте и гайках выполнены так, что при исправной работе по перераспределению движения двойным шариковым винтом на выходной шток привода скорость последнего равна сумме линейных скоростей, направленных в одну сторону.

При заклинивании в одном шариковом винте происходит перераспределение потоков мощности в дифференциале на исправную часть двойного шарикового винта (увеличивается его скорость, так что суммарная скорость штока привода сохраняется).

В патенте [7] устройство защиты от заклинивания рассматривается на примере одного из резервированных линейных ЭМП (рис. 2). В предложенном ЭМП содержится пара винт-гайка 1, у которой винт 2 является выходным звеном, а гайка 3 приводится во вращение управляющим электродвигателем (на рис. 2 не показан). Внутри полого винта 2 коаксиально расположен поршень 4 с устройством защиты от заклинивания. Это устройство состоит из вспомогательного электродвигателя 5 и замка 6 с защелками 7 сцепления и расцепления поршня 4 к винту 2. При нормальной работе ЭМП (рис. 2, а) замок 6 фиксирует поршень 4 на внутренней поверхности винта 2, а при заклинивании винтовой пары (рис. 2, б) включается вспомогательный электродвигатель 5, который расцепляет за-

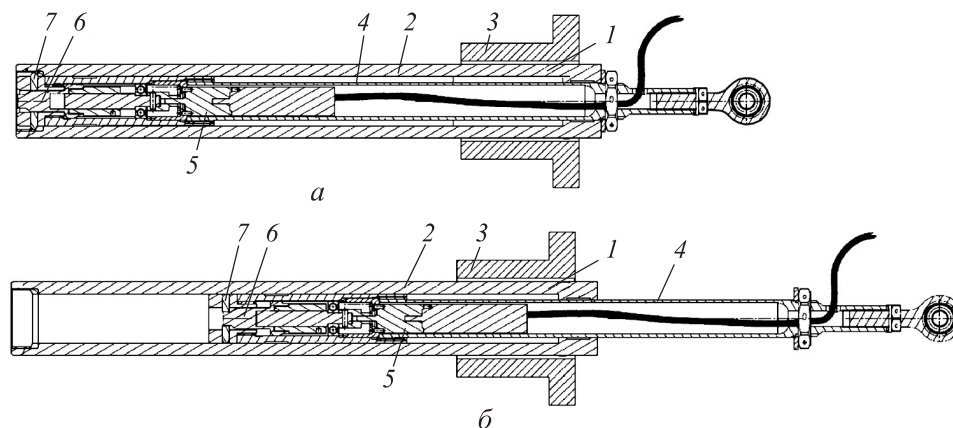


Рис. 2. Линейный ЭМП с устройством защиты от заклинивания:
а — при нормальной работе; б — при механическом отказе в винтовой паре

мок 6 и освобождает поршень от фиксации с винтом 2, позволяя поршню свободно скользить относительно внутренней поверхности винта и не противодействовать работе исправного резервного ЭМП.

В электромеханическом приводе [8] исполнительный механизм состоит из двух каналов управления, каждый имеет свой электродвигатель

и механическую передачу. Один канал является основным и обеспечивает управление объектом регулирования (аэродинамической поверхностью или шасси), а другой антизаклинивающий канал — аварийный. Конструкция ЭМП с ШВП, у которой один общий винт 1, две гайки 2 и 3, размещенные в отдельных корпусах 4 и 5, приведена на рис. 3. В корпусе 4 имеются два канала резервированного привода, каждый состоит из управляющего электродвигателя 6 (7), червячной передачи 8 и муфты сцепления, которая переключается электродвигателями 9.

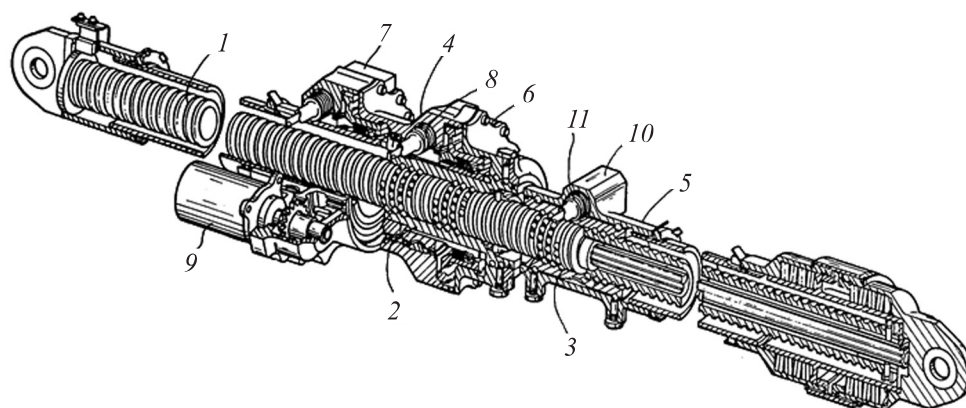


Рис. 3. Конструкция ЭМП с ШВП

Во втором корпусе 5 размещен аварийный канал привода, содержащий управляющий электродвигатель 10 и червячную передачу 11.

В штатном режиме работает один канал резервированного привода. В случае заклинивания или электрического отказа работающий привод отключается от гайки и соответствующими муфтами сцепления подключается другой резервный канал. В случае заклинивания или электрического отказа этого резервного канала он отключается своей муфтой сцепления и включается аварийный канал.

Достоинство такой конструкции заключается в его высокой отказоустойчивости, обеспечивающей работоспособность ЭМП при двух отказах.

Недостатком конструкции является удвоенная длина винта, что затрудняет его использование в ЛА ограниченного объема.

В рассмотренных схемах электромеханических приводов с ШВП использование антизаклинивающих устройств приводит к существенному усложнению конструкции и, соответственно, стоимости привода.

Учитывая, что заклинивание в ШВП может быть вызвано деформацией профилей винта или гайки, замятием шариков во время их рециркуляции по замкнутым дорожкам и каналу перепуска, предложена кон-

струкция привода с передачей, преобразующей вращательное движение в поступательное, у которой исключены указанные причины заклинивания. Исключение причин заклинивания достигается за счет размещения тел качения (шариков или роликов) в гнездах сепаратора [9, 10].

Конструктивная схема силового мини-привода поступательного действия [9] приведена на рис. 4. Привод состоит из волновой передачи с телами качения, у которой жесткое колесо, являющееся выходным зве-

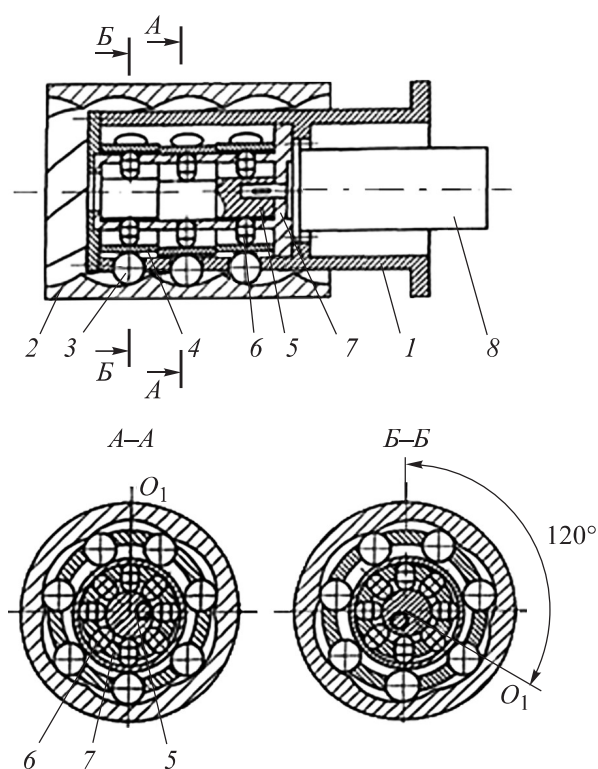


Рис. 4. Исполнительный механизм на основе шариковолновой передачи, преобразующей вращательное движение в поступательное

ном, выполнено в виде полого цилиндра с внутренней нарезкой винтового эпициклоидального профиля. В сепараторе 1, расположенном соосно жесткому колесу 2, равномерно по окружности выполнено несколько рядов радиальных отверстий, в которых находятся шарики 3. Каждый ряд отверстий смещен относительно соседнего на угол 120° . Шарики 3, расположенные в отверстиях сепаратора 1, контактируют с наружной стороной волнообразователя и внутренней поверхностью профиля жесткого колеса 2. Шарики 3 также выполняют функцию радиальной опоры жесткого колеса 2 и служат ограничением его осевого перемещения.

Волнообразователь состоит из трех дисков 4 с эксцентриками 5 и толкателями 6, размещенными в отверстиях корпуса 7, при этом диски с эксцентриками повернуты на угол 120° относительно друг друга. При вращении вала электродвигателя 8 с эксцентриками 5 движение передается через толкатели 6 к дискам 4. Диски 4 давят на шарики 3, которые совершают возвратно-поступательное движение в сепараторе 1 и толкают жесткое колесо 2, заставляя его совершать поступательное движение.

Электрохимический привод, построенный на основе волновой передачи с телами качения, существенно проще, чем приводы [6–8] с антизаклинивающими устройствами, однако изготовление сложного винтового эпициклоидального профиля внутри жесткого колеса требует достаточно точного производства.

Более простая реализация ЭМП, в котором исключена возможность заклинивания, достигается за счет использования ШВП с сепаратором [10].

Конструктивная схема привода с такой передачей приведена на рис. 5. В этой схеме входным звеном ШВП является вращающийся винт, а выходным — гайка. Особенность конструкции заключается в том, что гайка имеет форму поршня и состоит из корпуса, имеющего гладкую цилиндрическую внутреннюю поверхность, и сепаратора с гнездами, расположенными по винтовой линии с шагом, равным шагу винта. Сепаратор и корпус

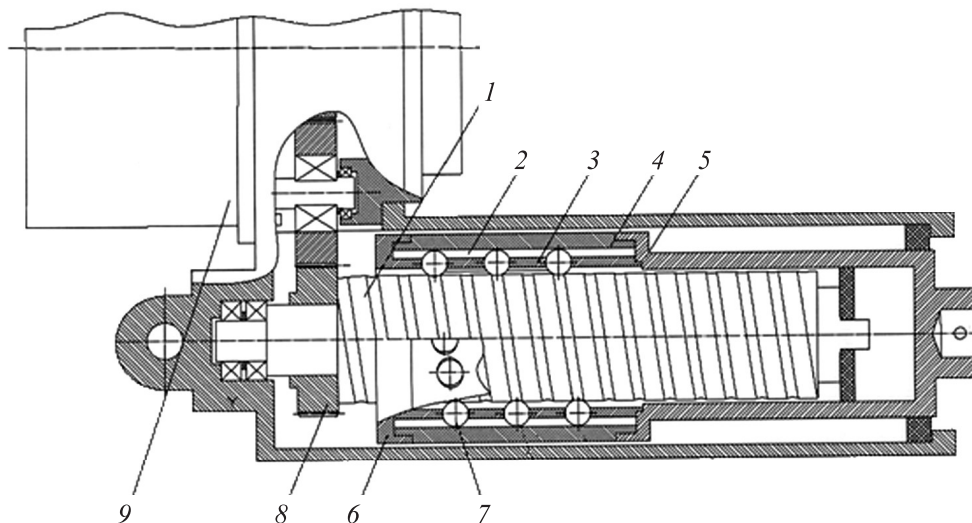


Рис. 5. Конструктивная схема ЭМП с ШВП, у которой шарики размещены в сепараторе:

1 — винт; 2 — гайка; 3 — сепаратор; 4 — корпус гайки с внутренней цилиндрической поверхностью; 5 — поршень; 6 — торцевая стенка поршня; 7 — шарики; 8 — цилиндрическая пара; 9 — электродвигатель

расположены коаксиально и жестко соединены между собой по торцам сепаратора так, что тела качения в процессе работы ЭМП постоянно контактируют с поверхностями профиля винта, внутренней гладкой цилиндрической поверхностью гайки и поверхностями гнезд сепаратора. В качестве тел качения могут использоваться как шарики, так и ролики. Использование роликов позволяет увеличить нагрузочную способность передачи.

Предлагаемая конструкция ШВП, у которой гайка выполнена без внутреннего винтового профиля, существенно упрощает технологию изготовления и снижает стоимость передачи. Однако следует отметить, что размещение тел качения в гнездах сепаратора приводит, во-первых, к увеличению длины гайки при том же числе тел качения относительно ШВП с рециркуляцией шариков по замкнутым дорожкам, а во-вторых, к увеличению потерь на трение между телами качения и сепаратором.

Сравнительный анализ характеристик ЭМП с различными типами ШВП. Рассмотрим два ЭМП. У одного использована импортная ШВП с рециркуляцией шариков, а у второго при одинаковых параметрах (диаметре, шаге и числе шариков) конструкция гайки выполнена упрощенной, без винтового профиля на внутренней поверхности корпуса, при этом использован сепаратор, в гнездах которого размещены шарики. В обеих конструкциях ШВП выходным звеном является соединенная с поршнем гайка, совершающая поступательное движение. В результате при одинаковом числе и диаметре шариков ЭМП должны иметь одинаковую нагрузочную способность.

Различие ЭМП заключается в том, что у ШВП с рециркуляцией шарики имеют контакты с профилями винта и гайки, а у ШВП с сепаратором шарики контактируют с профилем винта и цилиндрической поверхностью корпуса гайки. Что касается контакта шарика с сепаратором, то при диаметре гнезда сепаратора, превышающем диаметр шарика, контакт становится точечным. Наличие точечного контакта в паре гнездо–шарик естественно приводит к уменьшению трения и, следовательно, к большему КПД, но обуславливает появление люфта. Учитывая, что в ЭМП применен электродвигатель с запасом по мощности, а люфт является важным кинематическим параметром при обработке гармонического сигнала с малой амплитудой, диаметр гнезда сепаратора принят равным диаметру шарика.

На этом основании представляет интерес сравнение ЭМП путем проведения экспериментальных исследований по точности позиционирования выходного штока и частотным характеристикам при одинаковых габаритных размерах.

Сравниваемые образцы ЭМП с ШВП, выполненными с сепаратором и рециркуляцией шариков, имеют одинаковое число (66) шариков диаметром 2 мм.

Экспериментальное исследование ЭМП проводилось на стенде для проверки точности позиционирования выходного штока привода и исследования динамических характеристик (рис. 6). Рабочее место — это непосредственно стенд, компьютер с монитором, блоки питания и управления. Стенд состоит из основания с кронштейном, к которому крепится корпус исполнительного механизма привода, и вала с рычагом, к которому подсоединяют шток привода, и упора. Вал с рычагом установлен на основании стенда с возможностью вращения относительно основания. По сигналу управления шток ЭМП устанавливается в нейтральное положение, соответствующее 25 мм. Между торцевой поверхностью штока и упором на специальной подставке устанавливают концевую меру, соответствующую 25 мм. К торцевой поверхности концевой меры подводят наконечник измерительного индикатора, создают предварительный натяг не менее 1 мм, закрепляют индикатор к основанию и устанавливают циферблат индикатора в нулевое положение. (Используемые концевые меры имеют соответствующие длины 10, 25, 40 и 50 мм.)

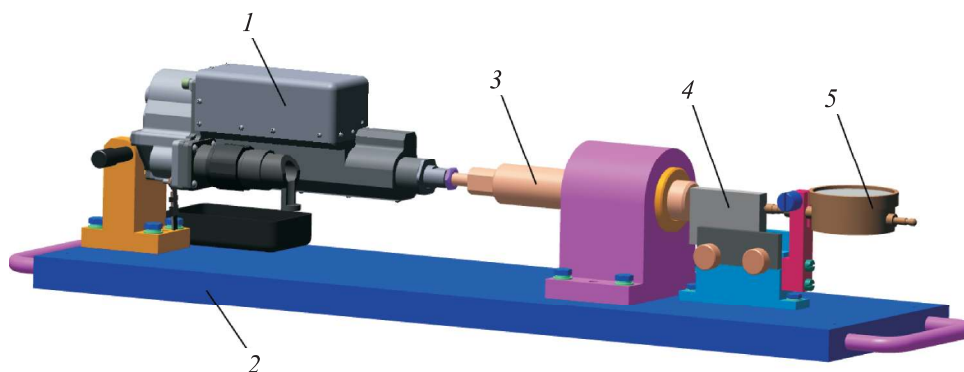


Рис. 6. Стенд для проверки позиционной точности и динамических характеристик привода:

1 — испытуемый привод; 2 — основание; 3 — удлинитель; 4 — концевая мера;
5 — индикатор

Затем концевую меру убирают и задают сигнал управления на ЭМП, соответствующий требуемому положению штока 10, 40 и 50 мм.

Значения хода штока определяют как $X = L + \Delta$, где L — длина концевой меры; Δ — показатель индикатора относительно нулевого положения.

Результаты испытаний, средних значений четырех повторных измерений, которые свидетельствуют об идентичности позиционной точности ЭМП, следующие: длина концевой меры — 10, 25, 40 и 50 мм; ход штока ЭМП с ШВП — 9,9, 25, 40,07 и 50,13 мм (с рециркуляцией шариков) и 9,9, 25, 40,15 и 50,06 мм (с сепаратором).

Исследование динамических характеристик проводилось при амплитудах перемещения штока 2, 1 и 0,25 мм. Результаты экспериментов приведены на рис. 7.

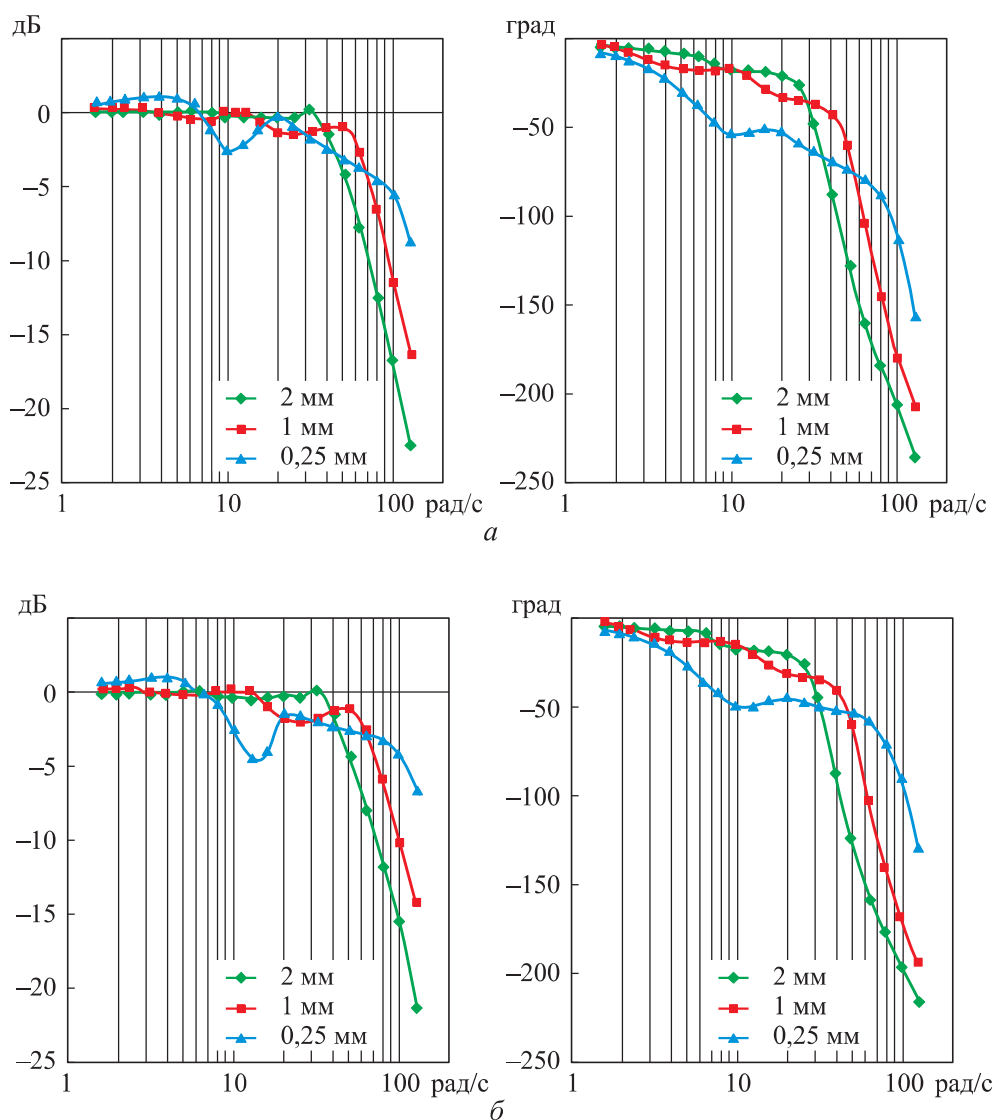


Рис. 7. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) ШВП с рециркуляцией шариков (а) и сепаратором (б)

Видно, что полученные АФЧХ обоих приводов практически одинаковые. Это обусловлено тем, что наличие сепаратора привело, с одной стороны, к увеличению трения из-за контакта шариков с сепаратором по линии диаметра, а с другой стороны, к увеличению жесткости передачи. С увеличением трения понижается КПД при работе привода в статическом режиме, но увеличение жесткости приводит к компенсации этого трения в динамическом режиме.

Что касается КПД рассматриваемых приводов с ШВП, то они замкнуты по положению выходного звена и основным режимом работы является отработка сигнала рассогласования, который близок к гармоническому. В этом режиме максимальные значения момента и скорости, которые характеризуют КПД, не совпадают по времени. Поэтому значение КПД как параметра, характеризующего движение выходного звена привода с постоянными моментом и скоростью, не может считаться оценочным, а используется только при выборе гарантированного запаса мощности электродвигателя.

Если оценка требования КПД одной ШВП с рециркуляцией шариков, согласно данным изготовителя, составляет 0,90–0,95 [11], то КПД ШВП с сепаратором меньше и зависит от качества изготовления винта и сепаратора, а также от подбора смазочного материала, что подлежит специальным исследованиям.

Кроме качественного сравнения конструкций приводов с устройствами, устраняющими возможность заклинивания, проведем сравнение ШВП по надежности.

Надежность ШВП характеризуется временем работы передачи до появления первых признаков разрушения ее элементов.

Для сравнения надежностей ШВП с сепаратором и с рециркуляцией шариков рассмотрим их как сложные системы, состоящие из совокупности элементов, соединенных между собой определенным образом.

Шарики-винтовые передачи с рециркуляцией представим как систему, в которой входным звеном является винт, а выходным — гайка. Вращение винта передается на шарики, которые контактируют друг с другом, образуя цепочку, совершающую поступательное движение по замкнутой дорожке гайки. Шарик образует последовательные связи между собой и параллельные связи с поверхностями винта и гайки.

Известно, что при последовательном соединении элементов отказ одного приводит к отказу всей системы. Поскольку шарики соединены последовательно, то при заклинивании хотя бы одного шарика цепочка перестает двигаться и передача выходит из строя.

В схеме ШВП с сепаратором шарики не контактируют друг с другом, они образуют параллельные связи, при которых отказ одного шарика (и даже нескольких) не приводит к отказу всей системы. Вероятность безотказной работы характеризует возможность ШВП непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного промежутка времени наработки на отказ или время эксплуатационного ресурса.

Для сравнения надежностей рассмотрим ШВП с рециркуляцией шариков KGT 10x3 MSX RH1 S 160 G7 REM (фирма-изготовитель Eichenberger Gewinde) и ШВП с сепаратором, разработанную МНПК «Авионика» совместно с сотрудниками МАИ (изготовитель Мичуринский завод «Прогресс»).

Шарико-винтовая передача с сепаратором содержит тот же винт с опорными устройствами и одинаковое число шариков. Поэтому при тех же нагрузках надежность ШВП с сепаратором имеет то же значение, если сепаратор, а точнее, перемычки между гнездами сепаратора выдерживают эти нагрузки.

Проведем проверочный расчет перемычек сепаратора на срез и отверстий на контактную прочность.

Проверка прочности перемычки на срез. Условие прочности перемычки на срез:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{M}{R_c h_c z_{\text{ш}} h_{\text{пер}}} \leq [\tau_{\text{ср}}],$$

где $M = F_m R_c \operatorname{tg}(\psi + \rho)$ — крутящий момент на гайке от действия осевой силы F_m ($F_m = 295,57$ Н — эквивалентная усредненная нагрузка [11]; ψ — угол подъема винтовой линии; ρ — приведенный угол трения); $R_c = 1/2(R_{\text{с.н}} + R_{\text{с.вн}}) = 1/2(11,7 + 9,5) = 10,6$ мм — средний диаметр сепаратора ($R_{\text{с.н}}$, $R_{\text{с.вн}}$ — наружный и внутренний радиусы сепаратора); $h_c = R_{\text{с.н}} - R_{\text{с.вн}} = 11,7 - 9,5 = 2,2$ мм — толщина сепаратора; $z_{\text{ш}}$ — число шариков; $h_{\text{пер}}$ — толщина перемычки между двумя соседними гнездами; $[\tau_{\text{ср}}] = 60$ Н/мм² — допустимое напряжение на срез [12]. При $F_m = 295,57$ Н, $R_c = 10,6$ мм, $h_c = 2,2$ мм, $z_{\text{ш}} = 66$, $h_{\text{пер}} = 1,57$ мм, шаг равен 3 мм, $\varphi = 6^\circ$, $\rho = 2^\circ$ получаем

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{295,57 \cdot 10,6 \operatorname{tg}(6^\circ + 2^\circ)}{10,6 \cdot 2,2 \cdot 66 \cdot 1,57} = 0,182 < 60 \text{ Н/мм}^2,$$

т. е. ШВП с сепаратором выполняет условие прочности сепаратора на срез с большим запасом.

Проверка отверстий сепаратора на контактную прочность. Поскольку каждый шарик находится в отверстии сепаратора, расчет ведем по формуле для шара в отверстии. Уравнение контактной прочности при этом записывается в виде* [13, 14]:

$$\sigma_{\max} = \frac{0,388 \sqrt[3]{F_1} E^2 (R_c - R_{\text{ш}})^2}{R_c - R_{\text{ш}}} \leq [\sigma_{\text{н}}],$$

где $F_1 = F_m / Z_{\text{ш}} = 295,57 / 66 = 4,47$ Н — расчетная сила, действующая на один шарик; E — модуль упругости материалов шариков и сепаратора.

Поскольку шарики и сепараторы изготавливаются в основном из одинаковых материалов (например, сталей типа ШХ20СГ, 18ГТ и других, закаленных до твердости поверхности HRC 60...62 МПа), то модули у них одинаковые: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $R_c = d_c / 2 = 2,08 / 2 = 1,04$ мм; $R_{\text{ш}} = d_{\text{ш}} / 2 = 2 / 2 = 1$ мм — радиус шарика; $[\sigma_{\text{н}}] \approx 40 \text{ HRC} = 40 \cdot 60 = 2400$ МПа — допускаемое контактное напряжение в отверстии сепаратора [13];

$$\sigma_{\max} = \frac{0,388 \sqrt[3]{4,47} (2 \cdot 10^5)^2 (1,04 - 1)^2}{1,04 - 1} = 220 \text{ МПа} \leq [\sigma_{\text{н}}] =$$

$= 2400$ МПа, т. е. условие контактной прочности сепаратора также выполняется с большим запасом.

Выводы. Рассмотрены различные способы устранения возможного заклинивания в ШВП ЭМП с точки зрения сложности конструкции и простоты реализации.

Показано, что наиболее простым и недорогим способом устранения заклинивания в ШВП является размещение тел качения (шариков) в сепараторе.

В результате сравнения ЭМП, содержащих ШВП с сепаратором и с рециркуляцией шариков, с одинаковыми винтами и числом шариков, выявлено, что оба привода имеют одинаковые кинематические, нагрузочные характеристики и АФЧХ.

Полученные результаты расчета показателей прочности указывают на высокую надежность ШВП с сепаратором.

Разработанная конструкция ШВП с сепаратором, предназначенная для приводных систем ЛА, рассматривается как импортозамещающая дорогостоящую и менее надежную ШВП с рециркуляцией шариков.

* ГОСТ 18855–2013. Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Халютин С. Электрический самолет: прошлое, настоящее, будущее. *Авианорама*, 2016, № 6, с. 42–51.
- [2] Воронович С., Каргопольцев В., Кутахов В. Полностью электрический самолет. *Авианорама*, 2009, № 2, с. 14–17.
- [3] Бандурин Н.В., Ширяев Д.В., Оболенский Ю.Г. и др. Сравнительный анализ рулевых приводов маневренного самолета по энергетическим критериям. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2011, № 5-1, с. 267–290.
- [4] The “More electric” architecture revolution. *Milhech*, 2005, no. 10, pp. 60–64.
- [5] Самсонович С.Л., ред. Электромеханические силовые мини-приводы для более электрифицированного самолета. М., Изд-во МАИ, 2016.
- [6] Griman D.H., Jonnes T.L. Jam tolerant linear actuator. Patent US 5144851. Appl. 08.09.1991, publ. 01.08.1992.
- [7] Gonzaber-Tabas E.C., Loper F.Y.L., Loper E.M., et al. Linear electromechanical actuator and anti-jamming device. Patent US 2005/0204427. 2015.
- [8] Teske D.R., Senasack H.E., Wilkins M. Ballscrew actuator. Patent US 4637272. Appl. 28.10.2005, publ. 20.01.1987.
- [9] Самсонович С.Л., Константинов С.А. Исполнительный механизм на основе волновой передачи поступательного действия. Патент РФ 2265147. Заявл. 15.03.2004, опубл. 27.11.2005.
- [10] Абдулин Р.Р., Самсонович С.Л., Борисов М.В. и др. Электромеханический привод поступательного действия. Патент РФ 2017104322. Заявл. 10.02.2017, опубл. 13.08.2018.
- [11] Main Catalogue. V 14 02 20. *Eichenberger Gewinde AG*, 2020.
- [12] Явленский К.Н., Тимофеев Б.П., Чаадаева Е.Е., ред. Справочник конструктора точного приборостроения. Л., Машиностроение, 1989.
- [13] Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 1. М., Машиностроение, 2006.
- [14] Заплетохин В.А. Конструирование деталей механических устройств. Л., Машиностроение, 1990.

Абдулин Рашид Раисович — канд. техн. наук, главный конструктор АО МНПК «Авионика» (Российская Федерация, 127055, Москва, ул. Образцова, д. 7).

Большаков Вадим Владимирович — ведущий инженер-конструктор ТО-31 АО МНПК «Авионика» (Российская Федерация, 127055, Москва, ул. Образцова, д. 7).

Зудилин Алексей Сергеевич — заместитель начальника ТО-31 АО МНПК «Авионика» (Российская Федерация, 127055, Москва, ул. Образцова, д. 7).

Стиценко Артем Николаевич — главный специалист ТО-31 АО МНПК «Авионика» (Российская Федерация, 127055, Москва, ул. Образцова, д. 7).

Крылов Николай Валерьевич — канд. техн. наук, ведущий инженер АО МНПК «Авионика» (Российская Федерация, 127055, Москва, ул. Образцова, д. 7).

Самсонович Семен Львович — д-р техн. наук, профессор МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Борисов Михаил Васильевич — аспирант МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Рожнин Николай Борисович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Чубиков Валерий Николаевич — канд. техн. наук, доцент МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Абдулин Р.Р., Большаков В.В., Зудилин А.С. и др. О разработке электромеханического привода с шарико-винтовой передачей, защищенной от заклинивания. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 6, с. 66–82. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-66-82>

ON DEVELOPING AN ELECTROMECHANICAL DRIVE EQUIPPED WITH A BALL SCREW PROTECTED FROM JAMMING

R.R. Abdulin¹

V.V. Bolshakov¹

A.S. Zudilin¹

A.N. Stitsenko¹

N.V. Krylov¹

S.L. Samsonovich²

M.V. Borisov²

N.B. Rozhnin²

V.N. Chubikov²

abdulin@mnpk.ru

bolshakov.blumey@yandex.ru

zudilin.mail@mnpk.ru

stitsenko.mail@mnpk.ru

korish@bk.ru

samsonovich40@mail.ru

one2k.bmw@gmail.com

rozhnin@yandex.ru

valichu@gmail.com

¹ JSC “Avionica”, Moscow, Russian Federation

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Abstract

At present, one of the most pressing issues is the problem of improving electromechanical drive reliability, specifically, eliminating the possibility of jamming in the ball screw. The paper proposes an engineering solution designed to replace expensive imported ball screws. We analysed alternative designs intended to improve electromechanical drive reliability. We proposed and patented a ball screw design featuring a separator,

Keywords

Reliability, electromechanical drive, ball screw, anti-jamming mechanism, ball screw drive dynamics

in which the nut acts as a piston. The structure consists of a smooth cylindrical body and a slotted separator, its slots positioned along a helical line with a step equal to the thread lead. The body and the separator are coaxial and rigidly fixed together at the separator end faces so that the rolling elements remain in contact with the screw thread surfaces, the internal smooth cylindrical surface of the nut body and the surfaces of the separator slots. The ball screw design proposed, which features a nut with no internal threading, significantly simplifies the structure and its manufacturing technology. We built a model of an electromechanical drive equipped with a recirculating ball screw in order to determine static and dynamic properties of an electromechanical drive containing a ball screw featuring a separator. We compared the strength of the ball screw designs considered. As the ball screw featuring a separator is simpler and more reliable, the results of our analysis and the properties of an electromechanical drive equipped with the design proposed show that it is a promising solution to the import substitution problem concerning recirculating ball screws

Received 27.09.2019

Accepted 19.05.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Khalyutin S. Electric plane: past, present, future. *Aviapanorama*, 2016, no. 6, pp. 42–51 (in Russ.).
- [2] Voronovich S., Kargopol'tsev V., Kutakhov V. Completely electric plane. *Aviapanorama*, 2009, no. 2, pp. 14–17 (in Russ.).
- [3] Bandurin N.V., Shiryayev D.V., Obolenskiy Yu.G., et al. Comparative analysis of the steering drives maneuvering the aircraft on energy criteria. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2011, no. 5-1, pp. 267–290 (in Russ.).
- [4] The “More electric” architecture revolution. *Milhech*, 2005, no. 10, pp. 60–64.
- [5] Samsonovich S.L., ed. Comparative analysis of steering drives of a maneuverable plane according to energy criteria. Moscow, MAI Publ., 2016.
- [6] Griman D.H., Jonnes T.L. Jam tolerant linear actuator. Patent US 5144851. Appl. 08.09.1991, publ. 01.08.1992.
- [7] Gonzaber-Tabas E.C., Loper F.Y.L., Loper E.M., et al. Linear electromechanical actuator and anti-jamming device. Patent US 2005/0204427. 2015.
- [8] Teske D.R., Senasack H.E., Wilkins M. Ballscrew actuator. Patent US 4637272. Appl. 28.10.2005, publ. 20.01.1987.
- [9] Samsonovich S.L., Konstantinov S.A. Iсполнительный механизм на основе волновой передачи поступательного действия [Actuator based on translational movement wave gear]. Patent RU 2265147. Appl. 15.03.2004, publ. 27.11.2005 (in Russ.).

[10] Abdulin R.R., Samsonovich S.L., Borisov M.V., et al. Elektromekhanicheskiy privod postupatel'nogo deystviya [Electromechanical linear actuator]. Patent RU 2017104322. Appl. 10.02.2017, publ. 13.08.2018 (in Russ.).

[11] Main Catalogue. V 14 02 20. *Eichenberger Gewinde AG*, 2020.

[12] Yavlenskiy K.N., Timofeev B.P., Chaadaeva E.E., eds. Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya [Precision instrumentation designer handbook]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989.

[13] Anur'yev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroytelya. T. 1 [Handbook of a mechanical engineer. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006.

[14] Zapletokhin V.A. Konstruirovaniye detaley mekhanicheskikh ustroystv [Construction of mechanical devices parts]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990.

Abdulin R.R. — Cand. Sc. (Eng.), Chief Design Officer, JSC “Avionica” (Obraztsova ul. 7, Moscow, 127055 Russian Federation).

Bolshakov V.V. — Leading Design Engineer, TD-31, JSC “Avionica” (Obraztsova ul. 7, Moscow, 127055 Russian Federation).

Zudilin A.S. — Deputy Head of Department, TD-31, JSC “Avionica” (Obraztsova ul. 7, Moscow, 127055 Russian Federation).

Stitsenko A.N. — Chief Specialist, TD-31, JSC “Avionica” (Obraztsova ul. 7, Moscow, 127055 Russian Federation).

Krylov N.V. — Cand. Sc. (Eng.), Leading Engineer, JSC “Avionica” (Obraztsova ul. 7, Moscow, 127055 Russian Federation).

Samsonovich S.L. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Borisov M.V. — Post-Graduate Student, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Rozhnin N.B. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Chubikov V.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Abdulin R.R., Bolshakov V.V., Zudilin A.S., et. al. On developing an electromechanical drive equipped with a ball screw protected from jamming. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 6, pp. 66–82 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-66-82>