

УДК 621.833.6

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ РОЛИКОВИНТОВЫХ ПЕРЕДАЧ В СОСТАВЕ ЛИНЕЙНЫХ АКТУАТОРОВ

ПУСТОЗЕРОВ Р. В., ПТИЦЫНА А.С., КРЯЖЕВА Н.П.,
АЛЕКСАНИН С.А., НИКОЛАЕВ В.В., ДУНАЕВ В.И.

Рассматриваются роликовинтовые передачи, как исполнительные механизмы линейных актуаторов, приводится описание особенностей конструкции этого типа передач. Обоснована необходимость создания программного комплекса для автоматизированного проектирования линейных актуаторов, использующих в качестве исполнительного механизма роликовинтовые передачи.

***Ключевые слова:** актуатор, роликовинтовая передача, электромеханика, промышленность, САПР*

В конце двадцатого века гидравлические и пневматические приводы стали вытесняться электромеханическими актуаторами. Это стало возможным благодаря появлению высокоэффективных магнитных материалов, компактных и надежных устройств силовой электроники. Развитие технологий механической и химико-термической обработки металла позволило изготавливать детали механической части привода с требуемыми свойствами. Помимо конкурентоспособности по параметру мощность/вес электромеханические актуаторы обладают следующими преимуществами:

- а) малые габариты и масса (учитывая наличие в гидравлическом приводе баков, насосов и т.д.);
- б) высокая надежность и безопасность;
- в) удобство и простота обслуживания и эксплуатации;

г) упрощенное сопряжение с электрическими системами управления и диагностики;

д) высокий КПД.

Одним из способов повышения конкурентоспособности продукции является повышение качества изготовления входящих в состав изделия комплектующих без увеличения их себестоимости. Передачи актуаторов оказывают большое влияние на их технические характеристики. При широком диапазоне требований к приводу необходимо сделать правильный выбор конструктивного решения, обеспечивающего выполнение этих требований. Это является основным шагом для возможности использования модульного проектирования актуаторов. Кроме этого необходимо обеспечить функциональную взаимозаменяемость разных типов передач и подбор оптимальной конструкции в каждом конкретном приводе.

Линейные актуаторы представляют собой механизмы, преобразующие электрическую энергию во вращательное движение с помощью электродвигателя, и затем в поступательное движение с помощью винтового механизма [1]. Существует большое количество конструкций (схем) актуаторов, но все их можно условно разделить на две группы:

- актуаторы с вращающейся гайкой и линейно перемещающимся винтом;
- актуаторы вращающимся винтом и линейно перемещающейся гайкой.

В качестве механизма для преобразования вращательного движения в поступательное всё большее распространение получают роликовинтовые передачи. Роликовинтовые передачи обладают такими преимуществами как высокий КПД и точность позиционирования, и при равных габаритах превосходят другие типы передач по грузоподъемности и осевой жесткости.

Две основные характеристики актуатора - создаваемое усилие и скорость перемещения выходного звена. Они определяют выходную мощность привода, и зависят от момента, создаваемого электродвигателем, скорости вращения ротора и передаточной функции механической части привода. Передаточная функция линейного актуатора равна величине осевого перемещения выходного штока за один оборот ротора двигателя.

Использование различных схем роликовинтовых передач существенно расширяет диапазон получаемых передаточных функций, что в свою очередь позволяет получать различные сочетания динамических и скоростных характеристик привода. Это увеличивает область применения актуаторов и позволяет отвечать самым высоким и различным техническим требованиям. Это также позволяет обходиться без промежуточного редуктора, что в свою очередь снижает массогабаритные характеристики привода, уменьшает количество звеньев кинематической цепи и снижает себестоимость конечного изделия. Поэтому большой интерес с точки зрения использования в актуаторах представляют роликовинтовые передачи.

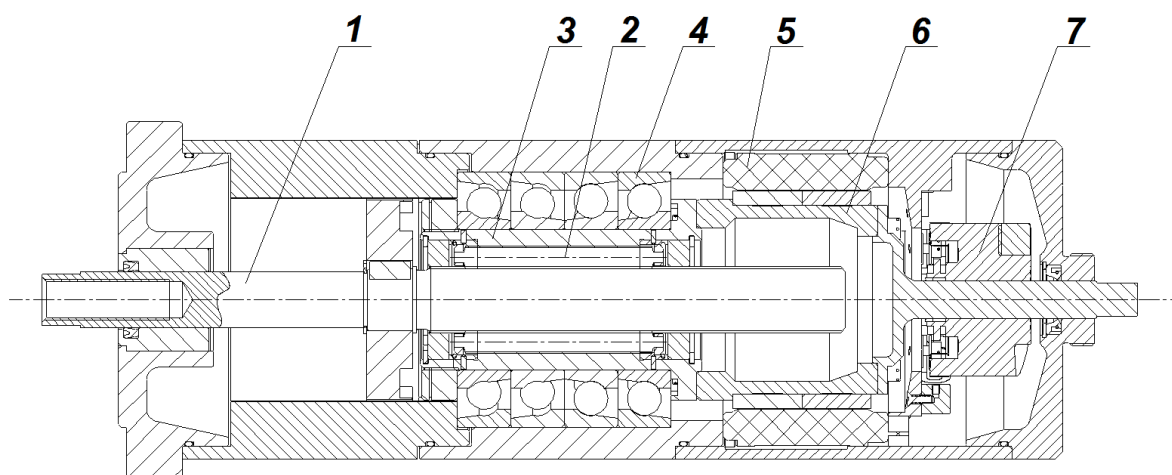


Рис. 1. Актуатор с роликовинтовой передачей
 1 – винт; 2 – резьбовые ролики; 3 – гайка; 4 – подшипники;
 5 – статор электродвигателя; 6 – ротор электродвигателя; 7 – датчик;

На рисунке 1 показана конструкция линейного актуатора, состоящего из винта 1, резьбовых роликов 2, гайки 3, установленной в подшипниковом узле 4. Гайка связана с ротором электродвигателя 6, в корпусе закреплен статор 5. При вращении ротора гайка вращается вместе с роликами, а винт получает осевое перемещение. Конструкция отличается простотой и компактностью.

В современных актуаторах используется два типа роликовинтовых передач: с опорной гайкой и с опорным винтом [2]. Опорная гайка означает отсутствие осевого смещения роликов относительно гайки, опорный винт - отсутствие осевого смещения роликов относительно винта. Применение той или иной конструкции зависит от требуемой передаточной функции передачи и от способа компоновки всех узлов привода. Если требуется получить высокую скорость перемещения выходного звена актуатора, более оптимально использовать передачи с опорной гайкой, т.к. такие передачи позволяют получить большие значения передаточной функции. Если необходимо получить высокую редукцию и большие значения создаваемого актуатором осевого усилия, более оптимально применять передачи с опорным винтом, т.к. такие передачи позволяют получить малые значения передаточной функции.

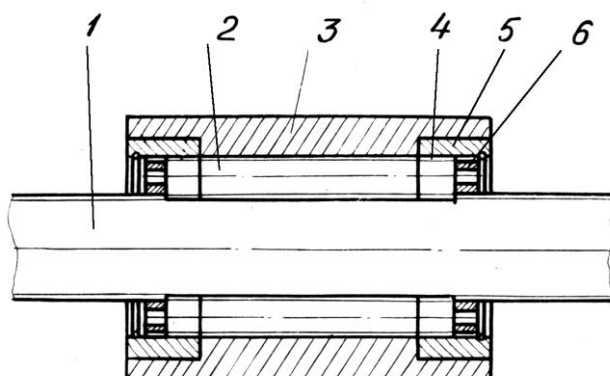


Рис. 2. Роликовинтовая передача с опорной гайкой:

*1 – винт; 2 – резьбовые ролики; 3 – гайка;
4 – зубчатые венцы ролика; 5 – зубчатые венцы гайки; 6 – сепаратор*

Планетарная роликовинтовая передача с короткими роликами является передачей с опорной гайкой (см. рис. 2). Эта конструкция была изобретена Страндгреном [3] в 1950 г. и серийно выпускается рядом иностранных компаний. Она схожа по конструкции с роликовыми подшипниками, поскольку тоже содержит промежуточные тела качения - резьбовые ролики-сателлиты. Ролики находятся между винтом и гайкой, на которых нарезана многозаходная треугольная резьба, профиль которой образован прямыми линиями. Профиль резьбы роликов выпуклый, образованный дугой окружности. Длина резьбовой части роликов равна длине резьбовой части гайки. Углы подъема резьбы роликов и гайки выполнены равными, что предотвращает осевое перемещение роликов относительно гайки. Для равенства углов подъема резьбы гайки и роликов отношение числа заходов резьбы гайки и роликов равно отношению средних диаметров их резьбы. При вращении гайки или винта ролики совершают планетарное движение. Чтобы ролики обкатывались по гайке без проскальзывания, а также для обеспечения параллельности осей винта и роликов на концах роликов нарезаны зубчатые венцы, входящие в зацепление с зубчатым венцом гайки. Чтобы проскальзывание резьбы роликов относительно резьбы винта не приводило к изменению передаточной функции передачи, число заходов резьбы винта равно числу заходов резьбы гайки. Т.е. передаточная функция определяется подъемом резьбы винта. Цапфы роликов установлены в сепараторы, которые обеспечивают постоянство равномерного распределения роликов по окружности. Угол подъема резьбы винта выполнен отличным от угла подъема резьбы роликов, что приводит к осевому смещению винта относительно гайки с роликами.

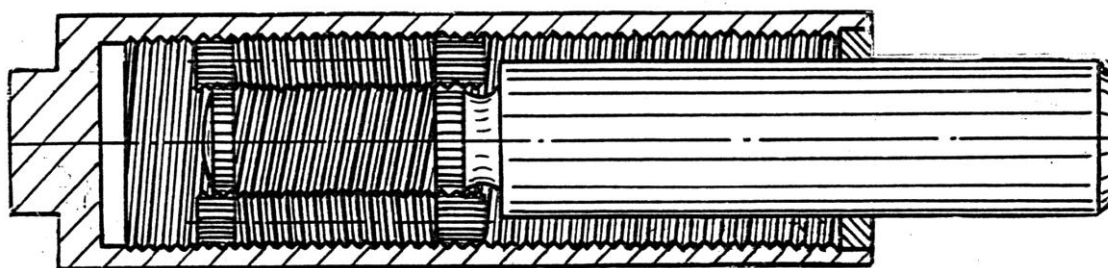


Рис. 3. Роликовинтовая передача с опорным винтом

Роликовинтовая передача с опорным винтом (см. рис. 3) также была изобретена Страндгреном [3] в 1950 г. Она отличается от описанной выше конструкции тем, что длина резьбовой части роликов выполнена равной длине резьбовой части винта. Углы подъема резьбы винта и роликов равны по величине и противоположны по направлению, а угол подъема резьбы гайки выполнен отличным по величине от угла подъема резьбы роликов. Таким образом при вращении винта или гайки ролики совершают планетарное движение, а гайка смещается в осевом направлении относительно роликов и винта. Аналогично предыдущей конструкции для предотвращения проскальзывания в резьбе ролики дополнительно связаны с винтом зубчатым зацеплением. Длина резьбовой части гайки должна превышать ход передачи на длину роликов. Передаточная функция передачи определяется подъемом резьбы гайки, что позволяет получать малые значения осевого смещения за оборот ведущего звена по сравнению с передачами с опорной гайкой.

Роликовинтовые передачи обладают рядом преимуществ, но их достижение возможно только при решении комплексного проектирования конструкции и технологии изготовления всех деталей передачи. При проектировании важно корректно учитывать особенности кинематики передачи и характер внутреннего силового взаимодействия.

Свойства роликовинтовых передач характеризуются следующими основными параметрами:

- передаточная функция;
- статическая грузоподъемность;
- ресурс;
- кинематическая точность;
- КПД;
- осевая жесткость.

Главной особенностью роликовинтовых передач является многоточечный контакт витков резьбы винта, роликов и гайки [4]. Осевая нагрузка передается через поверхности контакта во внутреннем резьбовом зацеплении роликов с гайкой и далее во внешнем резьбовом зацеплении роликов с винтом. Поскольку профили резьбы винта и гайки треугольные, образованные прямыми линиями, а профиль резьбы роликов выпуклый, образованный дугой окружности, первоначальный контакт без нагрузки в зацеплениях точечный. Положение точки контакта зависит от соотношения углов подъема сопрягаемых резьбовых деталей. Приложение осевой нагрузки приводит к появлению пятна контакта неправильной формы. Размеры, форму и положение пятна контакта определяют нагрузка в зацеплении и геометрия контактирующих поверхностей. Кроме этого нужно учитывать тот факт, что из-за неизбежных погрешностей изготовления резьбы распределение нагрузки по виткам резьбы будет неравномерным. Причем при увеличении нагрузки будет изменяться число взаимодействующих витков, а следовательно и осевая жесткость передачи. Кинематическая погрешность передачи складывается из накопленной и периодической составляющей и обусловлена в основном погрешностью изготовления резьбы по шагу.

Таким образом, все основные характеристики роликовинтовой передачи зависят от точности изготовления резьбовых деталей, которая в свою очередь зависит от экономически обоснованного выбора технологии нарезания резьбы. Также важным является вопрос о назначении полей

допусков на изготовление резьбы и использовании селективной сборки сопрягаемых резьбовых деталей.

Такие показатели передачи, как статическая и динамическая грузоподъемность зависят не только от геометрии контактирующих тел, но и от свойств материала. Нужно обеспечить не только объемную несущую способность элементов, но и контактную прочность, выносливость и износостойкость витков резьбы. Это достигается за счет применения технологий упрочнения наружного слоя материала.

Несмотря на то, что в роликовинтовых передачах между сопрягаемыми резьбовыми деталями преобладает трение качения, КПД механизма обусловлен еще и потерями на трение скольжения. Это объясняется тем, что в месте контакта витки резьбы совершают сложное относительное движение, состоящее из скольжения и вращения вокруг нормали к касательной плоскости в точке касания контактирующих поверхностей. Кроме этого, КПД зависит от множества факторов: погрешностей изготовления, величины натяга в резьбе, воспринимаемой нагрузки, шероховатости поверхности и условий смазывания. Расчет сил трения, действующих в резьбовых сопряжениях, позволяет определить эффективность использования передачи в качестве механического преобразователя в составе привода.

Кроме КПД, трение в резьбовых сопряжениях роликовинтовой передачи может оказывать влияние и на передаточную функцию. Дело в том, что роликовинтовые передачи можно условно разделить на два типа: передачи зацеплением и фрикционные передачи. Отличительной чертой передач зацепления является постоянство передаточной функции, которая определяется углом подъема резьбы элемента, перемещающегося в осевом направлении относительно роликов. Т.е. неизбежное проскальзывание в резьбовом зацеплении, при котором механизм работает как передача винт-гайка, приводит лишь к дополнительным потерям на трение скольжения и

не меняет передаточной функции. Фрикционные механизмы, по сути, являются дифференциальными, и стабильность передаточной функции зависит от соотношения углов подъема резьбы всех элементов. Фрикционные передачи могут применяться в актуаторах либо с датчиками обратной связи, либо когда нет жестких требований к точности позиционирования выходного звена привода. В то же время такие передачи позволяют получить более широкий диапазон значений передаточной функции.

Применение линейных актуаторов в ответственных узлах машин создает повышенные требования к надежности всех компонентов, в том числе и механики. Основными критериями работоспособности роликвинтовой передачи принято считать усталостное выкрашивание и износостойкость. При выборе главным критерием усталостное выкрашивание расчет грузоподъемности передачи и ресурса производится по аналогии с подшипниками качения, т.е. по статической и динамической грузоподъемностям. Для расчета на износостойкость необходимо создание математической трибологической модели, позволяющей оценивать ресурс передачи с учетом интенсивности износа.

От роликвинтовой передачи, являющейся механической частью линейных актуаторов, зависят основные эксплуатационные характеристики конечного изделия: грузоподъемность и ресурс, кинематическая точность, масса и габариты. Следовательно, необходимо организовать подбор оптимальной геометрии и определение основных параметров роликвинтовой передачи как динамического звена привода в зависимости от требований, предъявляемых к приводу. Это возможно либо при получении обширной опытной базы, либо при использовании адекватных расчетных методик. Последний вариант предпочтителен вследствие меньшей ресурсоемкости.

Таким образом, для повышения эффективности проектирования роликовинтовых передач, необходимо разработать набор расчетных методик на основе такой математической модели роликовинтовой передачи, которая бы позволяла с известной точностью описывать реальное поведение механизма. Для этого модель должна корректно описывать силовое взаимодействие между сопрягаемыми деталями, учитывая погрешности изготовления деталей и механические свойства материала. По сути, модель должна учитывать технологии изготовления и упрочнения деталей. Эта задача может быть решена только путем применения численного имитационного моделирования. Важное требование к модели - ее универсальность, т.е. возможность применения для разных типов роликовинтовых передач с учетом специфики каждого из них. На основе этой модели необходимо разработать алгоритмы для определения основных параметров передачи.

Заключение

Для повышения качества и сокращения сроков проектирования линейных актуаторов, необходимо создать набор методик, позволяющих для требуемых характеристик привода определять все основные параметры роликовинтовой передачи, входящей в состав привода. Методики должны учитывать особенности геометрии передачи, влияние погрешностей изготовления деталей на распределение нагрузки между сопрягаемыми деталями и влияние поверхностного упрочнения на грузоподъемность и ресурс. Это невозможно без применения численного имитационного моделирования работы роликовинтовой передачи, максимально точно описывающего поведение реального механизма. Для автоматизации расчетов и снижение влияния человеческого фактора необходимо разработать САПР роликовинтовых передач, обладающий следующими возможностями:

- 1) Синтез оптимальной геометрии передачи с заданными параметрами;
- 2) Расчет контакта витков резьбы, определение напряжений и деформаций;
- 3) Расчет грузоподъемности и ресурса;
- 4) Расчет кинематической точности;
- 5) Расчет осевой жесткости, осевого люфта и упругого мертвого хода;
- 6) Расчет КПД, потерь на трение качения и трение скольжения;
- 7) Расчет на износостойкость;

В настоящее время специалистами компании "Диаконт" создается программный комплекс, обладающий большинством из перечисленных выше возможностей. Ведется работа по уточнению расчетных методик и совершенствованию математической модели для максимального соответствия результатов расчетов результатам опытных испытаний реальных образцов роликвинтовых передач. Подробное описание математической модели и расчетных методик будет приведено в следующих статьях.

Статья была написана в соответствии с НИОКРТ «Создание высокотехнологичного производства прецизионных быстродействующих силовых электромеханических приводов нового поколения» в НИУ ИТМО. При финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства».

Список литературы

1. Козырев В.В. Конструкции роликовинтовых передач и методика их проектирования: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2004. С. 8 – 14.
 2. Морозов В.В. Роликовинтовые механизмы. Кинематические характеристики: монография / В.В. Морозов; Владим. гос. ун-т. - Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. С. 12 – 35.
 3. Пат. 2683379 США, НКИ 74.424.8, 1950.
 4. Блинов Д.С., Крылов С.И. Планетарные роликовинтовые механизмы. Конструкции, методы расчетов / Под ред. проф. О.А. Ряховского. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. С. 66 – 78.
- R.V. Pustozarov, A.S.Ptitsyna , N.P.Kryazeva , S.A. Aleksanin ,
V.V.Nikolaev, V.I. Dunaev.