

О выборе конструктивных параметров электромеханического привода поступательного действия¹

М.В. Борисов, С.Л. Самсонович

Аннотация

Рассматривается исполнительный механизм электромеханического привода, состоящий из двух передач: выходной – преобразующей вращательное движение в поступательное, и промежуточной – преобразующей вращательное движение во вращательное. Рассматривается выбор параметров волновой передачи с телами качения, как промежуточной, и шариковинтовой передачи с сепаратором поступательного действия - выходной.

Ключевые слова

электромеханический минипривод; поступательный; волновая передача; тела качения; шариковинтовая передача

В современной архитектуре построения, как гражданских и транспортных, так и военных самолетов, остро ставится вопрос об экономичности воздушного судна в целом. В границах существующей концепции более «электрического» самолета, актуальным является вопрос о построении электрических рулевых приводов, способных эффективно заменить существующие гидравлические приводы.

Функциональная схема электромеханического привода представлена на рис. 1 [1].

¹ Работа выполнена в рамках реализации ФПЦ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

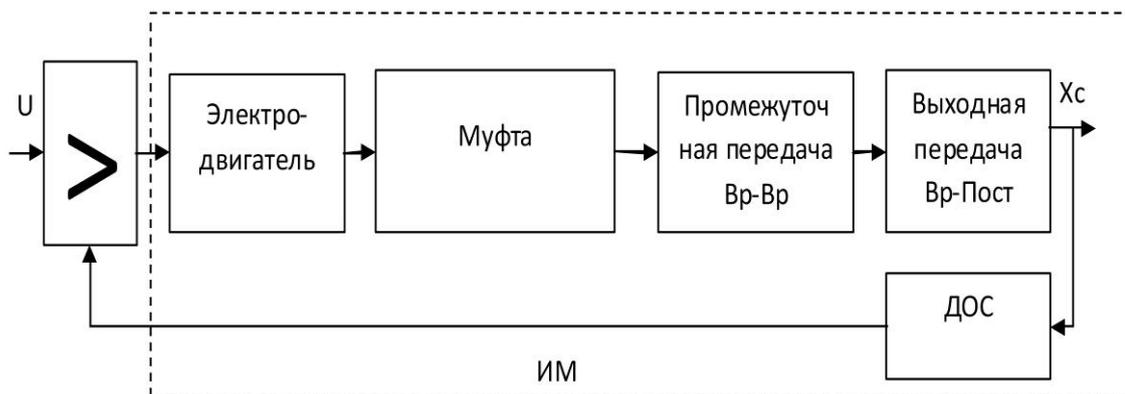


Рис. 1. Функциональная схема исполнительного механизма электропривода

В состав исполнительного механизма привода, входит электродвигатель. Предполагается использование бесколлекторного, бескорпусного двигателя постоянного тока, имеющий высокий КПД, высокий ресурс, и хорошие мощностные параметры отнесенные к массе всего двигателя. Муфта является опциональным элементом, и в некоторых случаях её можно не устанавливать. Промежуточная передача необходима для согласования высоких оборотов электродвигателя с выходной передачей. В качестве промежуточной передачи, предполагается использование волновой передачи с телами качения (рис. 2), имеющей сравнительно лучшие массогабаритные показатели [2]. Эту передачу можно выполнить с полым входным валом, и следовательно, в нем можно разместить винт выходной передачи. Так же известно, что при передаточном числе $q=20$ объем занимаемый шариковой волновой передачей будет меньше, по сравнению с другими передачами [2].

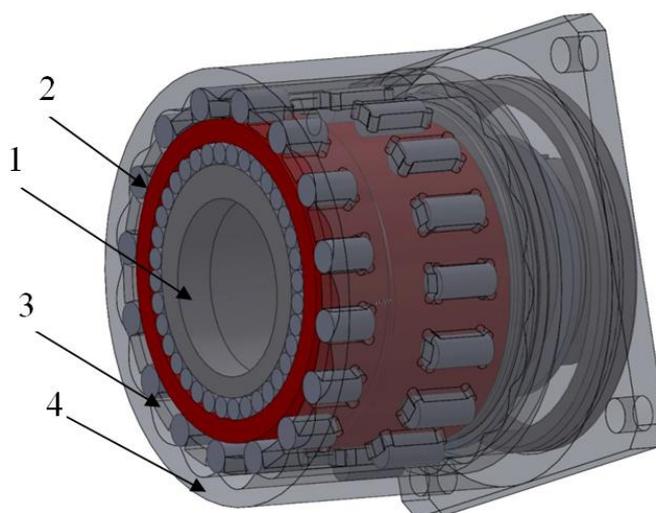


Рис. 2. Промежуточная волновая передача с телами качения: 1 – входной вал, 2 – дисковый эксцентриковый волнообразователь, 3 – тела качения (ролики), 4 – жесткое колесо.

Целью выходной передачи является преобразование вращательного движения в поступательное. Рассматриваются два вида механических передач поступательного действия, отличающихся конструктивно, а также по принципу работы: шариковинтовая передача с сепаратором [1] и волновая передача поступательного действия [3, 4] (см. рис. 3).

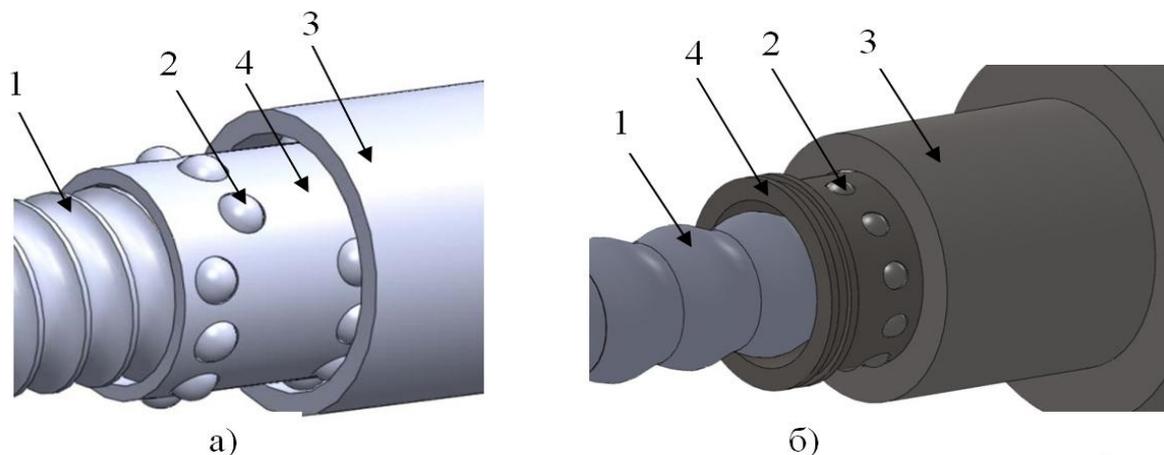


Рис. 3. Типы механических передач, преобразующих вращательное движение в поступательное: а) шариковинтовая с сепаратором; б) волновая.
1 – выходной винт (вал), 2 – тела качения, 3 – гайка, 4 – сепаратор.

Шариковинтовая передача с сепаратором, приведенная на рис. 3а, конструктивно состоит из: выходного винта с резьбой круглого профиля, в качестве промежуточных тел, используются шарики, которые расположены по винтовой линии в отверстиях тонкостенного сепаратора. Гайка передачи выполнена с внутренней гладкой, цилиндрической поверхностью. Сепаратор вращаясь, передает усилие на шарики, которые заставляют винт совершать поступательное движение. Так же каждый шарик находится в отдельном отверстии и отсутствует канал перепуска шариков, шарики не контактируют друг с другом, что исключает вероятность заклинивания. КПД этой передачи не хуже чем 0,9.

Волновая передача поступательного действия приведена на рис. 3б [3]. Эта передача имеет выходной вал с профилем, который соответствует профилю развернутого жесткого колеса вращательной волновой передачи. Промежуточные тела – шарики. Сепаратор имеет отверстия для шариков, которые расположены по винтовой линии. Корпус выполняет роль волнообразователя и имеет внутреннюю эксцентриковую поверхность. КПД такой передачи, также не менее 0,9.

Эти две механические передачи позволяют реализовать один и тот же коэффициент передачи, который зависит от шага резьбы выходного винта в шариковинтовой передаче с

сепаратором, а во второй зависит от шага винтовой линии в сепараторе, поэтому для упрощения анализа будем в обеих передачах оперировать шагом резьбы.

Коэффициент передачи для них будет:

$$S = \frac{P}{2\pi}, \text{ мм/рад}, \quad (1)$$

где P - шаг резьбы.

Объемы шариковинтовой передачи с сепаратором и волновой передачи поступательного действия будем рассматривать как объемы занимаемые гайками, без учета длины винта.

Отметим, что конструктивно эти две передачи очень похожи, размеры обоих передач зависят от следующих параметров: наружного диаметра выходного звена, диаметра и числа тел качения. Эти параметры выбираются по развиваемой нагрузке. Отличие габаритов этих передач заключается в конструкции гайки. У волновой передачи поступательного действия, гайка имеет более сложную форму, и, следовательно, больший наружный диаметр.

Рассмотрим математические выражения объемов шариковинтовой передачи с сепаратором и волновой передачи поступательного действия.

Номинальный диаметр резьбы выходного винта [1]:

$$d_0 = \sqrt{\frac{F}{30}}, \text{ мм}, \quad (2)$$

где F – максимальное усилие, развиваемое исполнительным механизмом привода, Н;

Диаметр шарика:

$$d'_{uu} = 0,6 \cdot P, \text{ мм}, \quad (3)$$

где P - шаг резьбы, выбираемый по ГОСТ, мм.

Число шариков в передаче:

$$z = \frac{F}{F_1}, \quad (4)$$

где F_1 - сила, воспринимаемая одним шариком:

$$F_1 = 20d'^2_{uu}, \text{ Н}. \quad (5)$$

Число шариков в одном витке:

$$z_1 = \frac{\sqrt{P^2 + (\pi \cdot d_0)^2}}{1,3 \cdot d'_{uu}}. \quad (6)$$

Число витков:

$$n_{uw} = \frac{z}{z_1} \quad (7)$$

Наружный диаметр шариковинтовой передачи с сепаратором:

$$D_{uw}' \approx d_0 + 2,33 \cdot d_{uw}', \text{ мм.} \quad (8)$$

Длина шариковинтовой передачи с сепаратором:

$$L_{uw}' \approx 1,5 \cdot n_{uw}' \cdot P, \text{ мм.} \quad (9)$$

В результате подстановки объем шариковинтовой передачи с сепаратором в зависимости от развиваемого усилия определяется следующим выражением:

$$W_{ШВ}(F) = L_{uw}' \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{uw}'^2}{4} \right) = 1,5 \cdot \frac{F}{F_1} \cdot \frac{1,3 \cdot d_{uw}'}{\sqrt{P^2 + \frac{\pi^2 \cdot F}{30}}} \cdot P \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{uw}'^2}{4} \right), \text{ мм}^3. \quad (10)$$

Наружный диаметр волновой передачи поступательного действия примем:

$$D_{ВП}' \approx 1,6d_0, \text{ мм} \quad (11)$$

Для определения объема волновой передачи поступательного действия используем зависимости (2)-(7), (11):

$$W_{ВП}(F) = L_{uw}' \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{uw}'^2}{4} \right) \approx 4,4 \cdot n_{uw}' \cdot P \cdot \left(\sqrt{\frac{F}{30}} \right), \text{ мм}^3. \quad (12)$$

Графики зависимости объема от развиваемого усилия приведены на рис. 4.



Рис. 4. Зависимости объемов механических передач поступательного действия от развиваемого усилия

Как видно из графика, шариковинтовая передача с сепаратором имеет меньший габаритный размер, при этом как было отмечено ранее, конструктивно обе передачи очень похожи, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только шариковинтовую передачу с сепаратором.

Для проведения анализа выбора параметров передач, влияющих на габаритные размеры, построим зависимость объема шариковинтовой передачи с сепаратором в зависимости от усилия для трех различных шагов – 2,5 мм, 5 мм и 10 мм. Результат представлен на рис. 5.

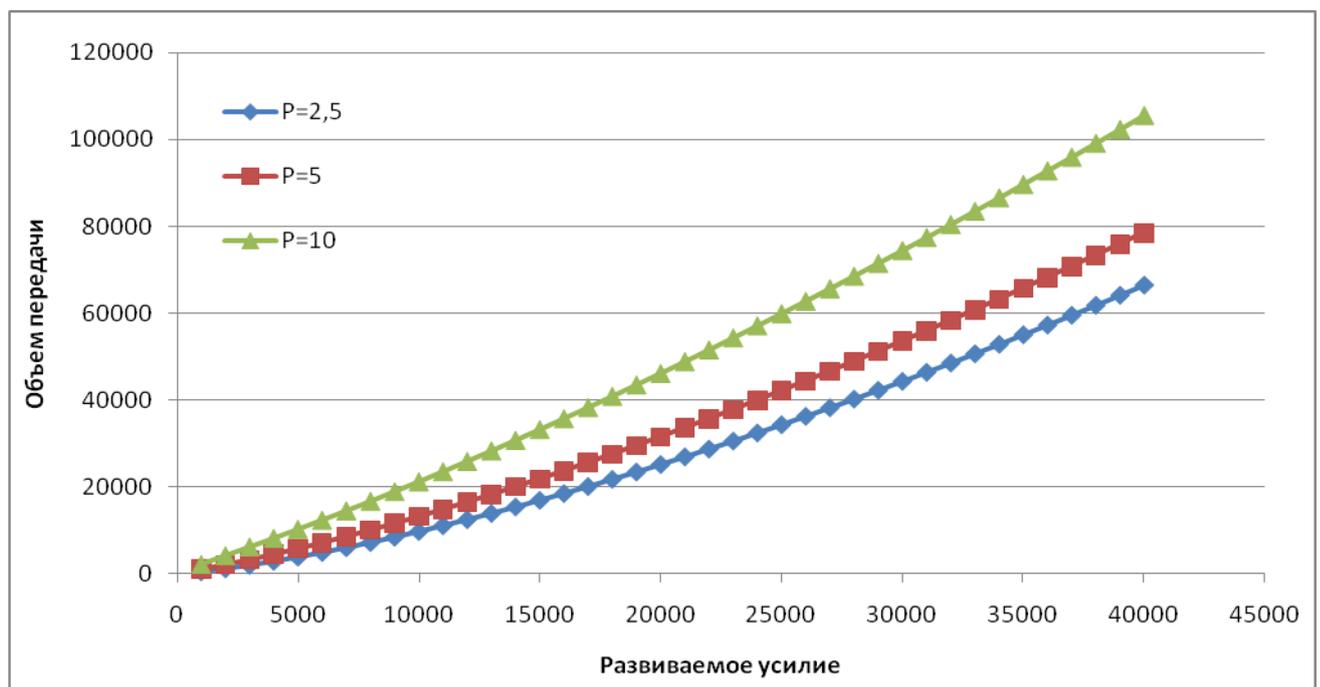


Рис. 5. Зависимости объемов шариковинтовой передачи от развиваемого усилия

Как видно из графиков, наименьший габаритный размер шариковинтовой передачи соответствует наименьшему шагу.

Используя выражения (2) - (9) выведем зависимость объема шариковинтовой передачи с сепаратором от числа шариков в передаче. Конечная зависимость выглядит следующим образом:

$$W(z) = 1,5 \cdot \frac{z}{z_1} \cdot P \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{ш}^{\prime 2}}{4} \right), \text{ мм}^3. \quad (13)$$

Графические зависимости объемов шариковинтовой передачи, отнесенные к развиваемому усилию, от числа шариков в передаче приведены на рис. 6.

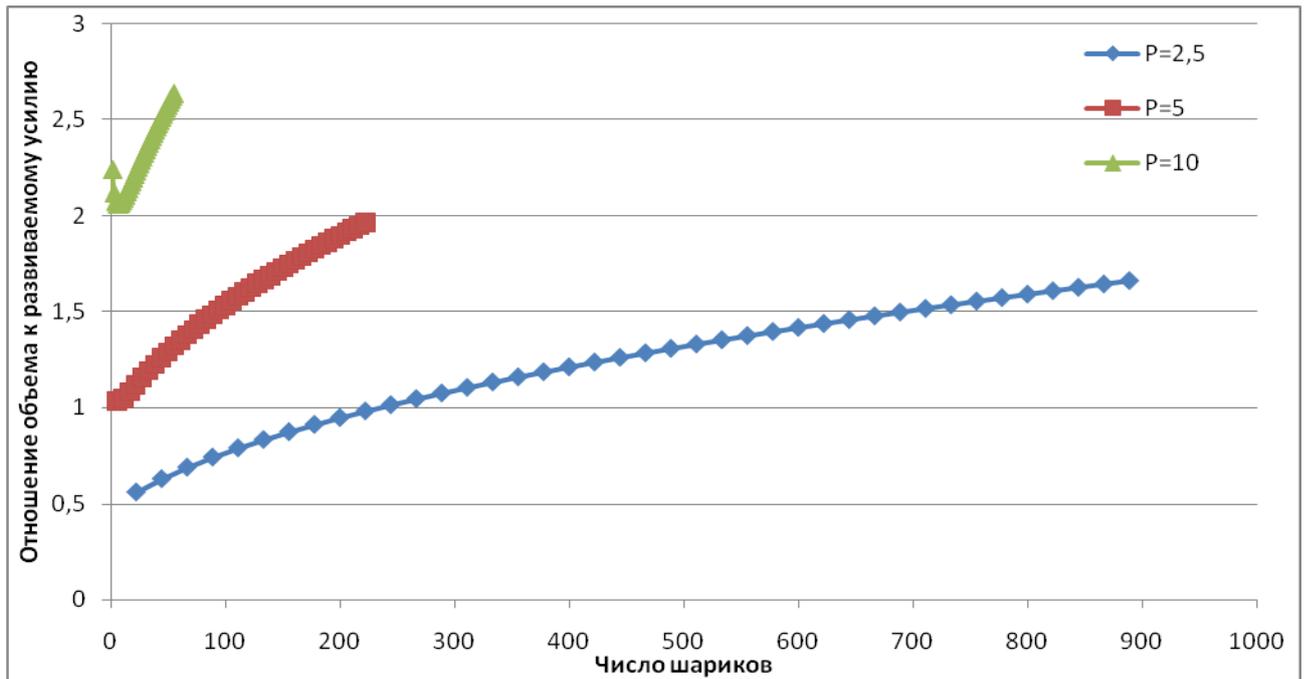


Рис. 6. Зависимости объемов шариковинтовой передачи, отнесенные к развиваемому усилию, от числа шариков

Для определения массогабаритных показателей всего исполнительного механизма, надо дополнительно рассмотреть промежуточную волновую передачу с телами качения.

Для определения её объёма использованы выражения для определения диаметра шариков и наружного диаметра передачи представленные в [3, 4].

Диаметр шариков:

$$d_{ш} \geq \sqrt{\frac{241 \cdot M_z \cdot \sin \frac{\pi}{z_{ш}}}{z_{ш} \cdot n}}, \text{ мм}, \quad (14)$$

где M_z – момент на гайке (сепараторе) шариковинтовой передачи, в Нм; $z_{ш}$ – число шариков, n – число рядов тел качения.

Наружный диаметр волновой передачи с телами качения:

$$D_n = \left(\frac{2,06}{\sin \frac{\pi}{z_{ш}}} + 1,8 \right) d_{ш}, \text{ мм}. \quad (15)$$

Длина волновой передачи с телами качения:

$$L = 4,2 d_{ш}, \text{ мм}. \quad (16)$$

Внутренний диаметр передачи (диаметр диска волнообразователя):

$$d_{\text{вн}} = \left(\frac{2,06}{\sin \frac{\pi}{z_{\text{жс}}}} - 1,6 \right) d_{\text{ш}}, \text{ мм.} \quad (17)$$

Для волновой передачи с телами качения с остановленным жестким колесом:

- передаточное число и число шариков:

$$z_{\text{ш}} = q; \quad (18)$$

- число впадин жесткого колеса:

$$z_{\text{жс}} = q + 1. \quad (19)$$

Решаем эти уравнения с учетом следующих допущений:

1) выходной винт имеет наружный диаметр, который проходит внутри волновой передачи с телами качения. Между выходным звеном шариковинтовой передачи с сепаратором и внутренней поверхностью диска волнообразователя расположен игольчатый подшипник с целью сокращения трения и устранения вибраций из-за вращения эксцентриковых валов, т.е.

$$d_{\text{вн}} = k d_0, \text{ мм,} \quad (20)$$

где $k = 2$ – эмпирический коэффициент, обеспечивающий необходимый зазор;

2) наименьшее число рядов тел качения $n = 2$;

3) рассматривается одно значение общего передаточного отношения исполнительного механизма содержащего шариковинтовую передачу с сепаратором и однокаскадную волновую передачу с телами качения при трех значениях шага, т.е. при $P = 2,5 \text{ мм} - q = 15$, при $P = 5 \text{ мм} - q = 30$ и при $P = 10 \text{ мм} - q = 60$;

4) для упрощения расчетов принимается:

$$\sin \frac{\pi}{z_{\text{жс}}} = \sin \frac{\pi}{q+1} = \frac{\pi}{q+1}; \quad (21)$$

$$\sin \frac{\pi}{z_{\text{ш}}} = \sin \frac{\pi}{q} = \frac{\pi}{q}; \quad (22)$$

5) диаметр шарика волной передачи с телами качения для достижения технологичности конструкции должен быть: $d_{\text{ш}} \geq 3 \text{ мм}$.

В результате подстановки выражений (15) - (16) объем волновой передачи с телами качения:

$$W(F) = L \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{ш}}^2}{4} \right) = 3,3 d_{\text{ш}}^3 \cdot (0,65q + 1,8)^2, \text{ мм}^3, \quad (23)$$

где d_u удовлетворяет выражениям (14), (17) и условию 5.

Графическое отображение зависимости объемов волновой передачи с телами качения от развиваемого усилия – $W = f(F)$ приведено на рис. 7.

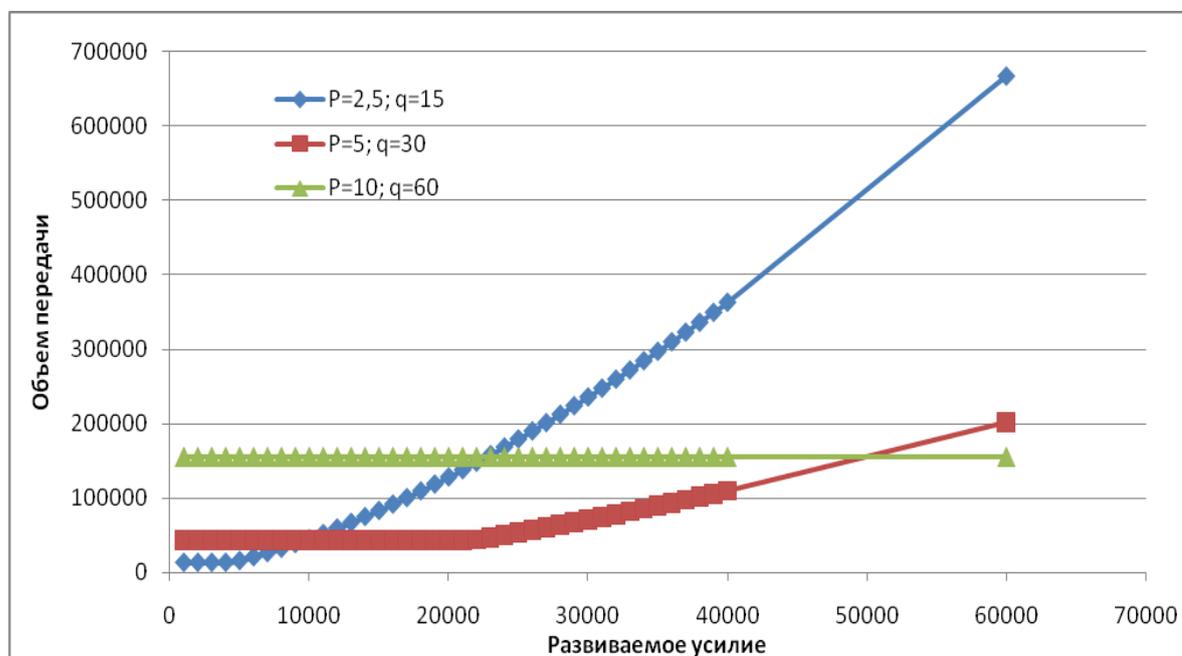


Рис. 7. Зависимости объемов волновой передачи с телами качения вращательного действия от развиваемого усилия

Как видно, из рис. 7, зависимости первоначально имеют ярко выраженный горизонтальный участок. Это объясняется введением условия 5 (ограничение по минимальному диаметру шарика). В свою очередь диаметр шарика влияет на наружный диаметр и длину волновой передачи с телами качения.

На рис. 8, 9 и 10 приведены зависимости диаметра шариков в промежуточной волновой передаче с телами качения от развиваемого усилия на выходном звене исполнительного механизма, при рассмотренных ограничениях.

Суммируя объёмы шариковинтовой передачи с сепаратором (рис. 5) и волновой передачи с телами качения (рис. 7), получаем зависимость объёма механического редуктора силового минипривода поступательного действия от развиваемого усилия на выходном звене (см. рис. 11).

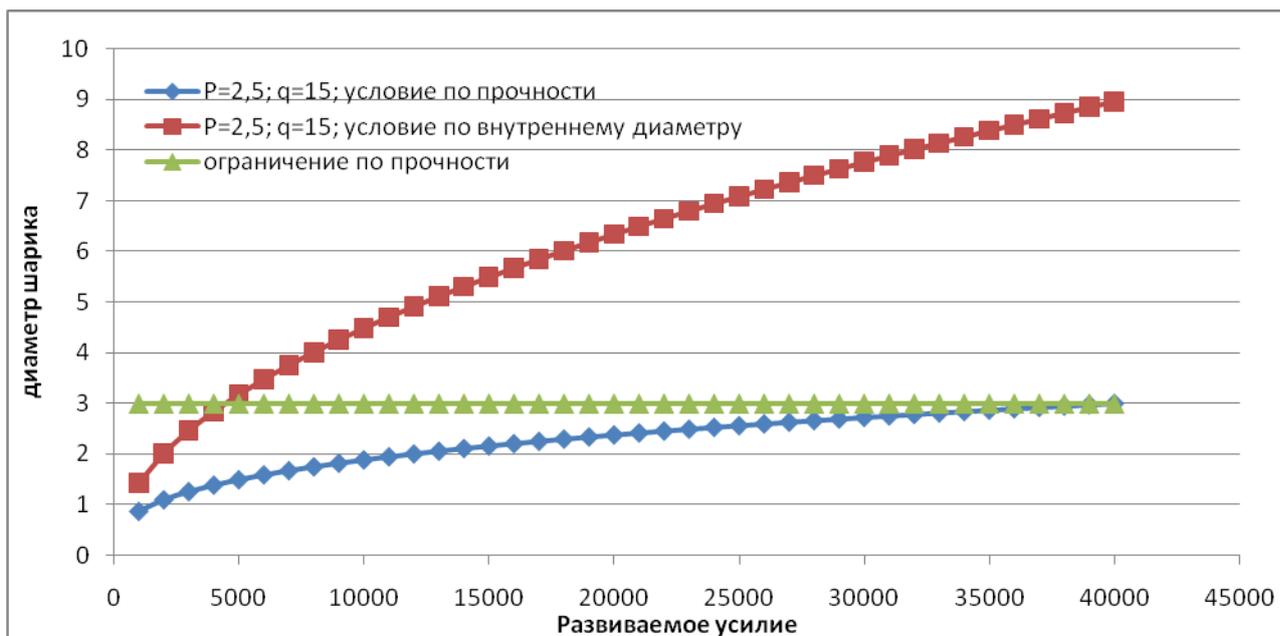


Рис. 8. Зависимости диаметров шариков от развиваемого усилия на выходном винте при шаге винта равном 2,5 мм, и передаточном числе волновой передачи с телами качения 15

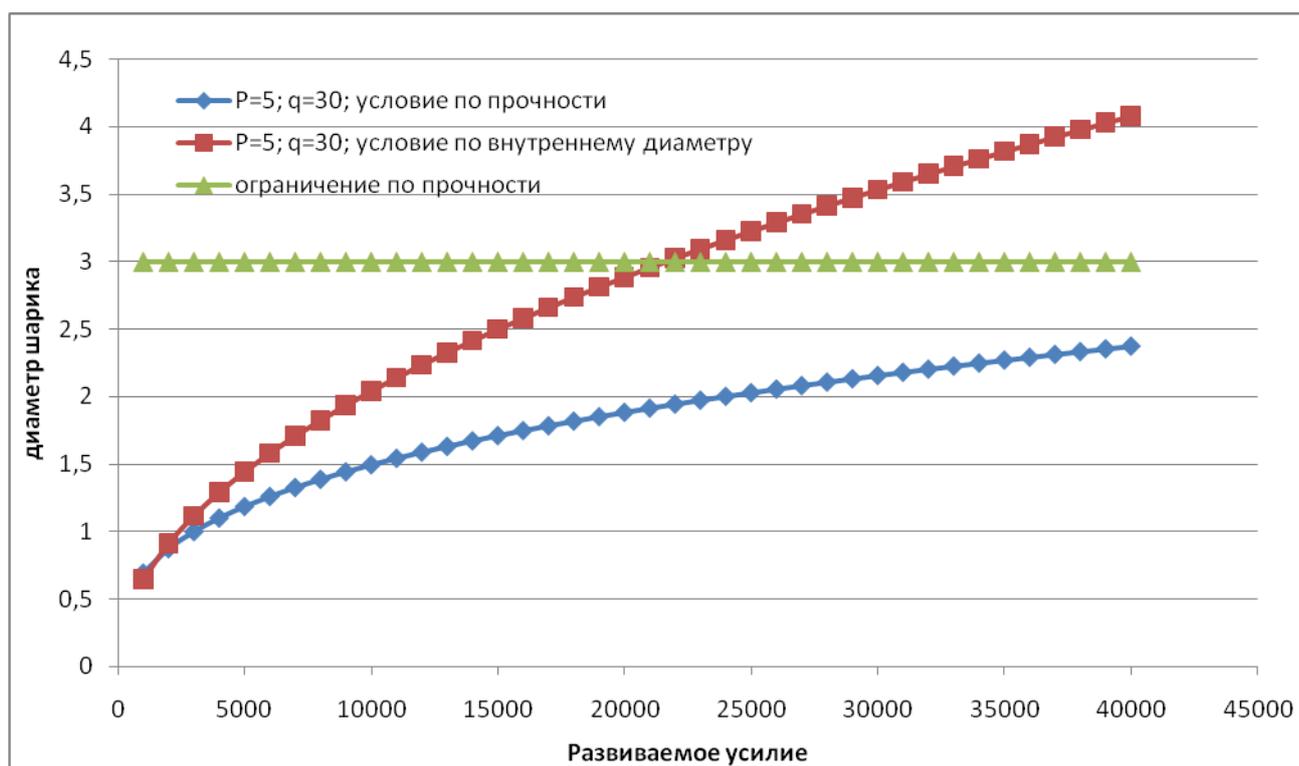


Рис. 9. Зависимости диаметров шариков от развиваемого усилия на выходном винте при шаге винта равном 5 мм, и передаточном числе волновой передачи с телами качения 30

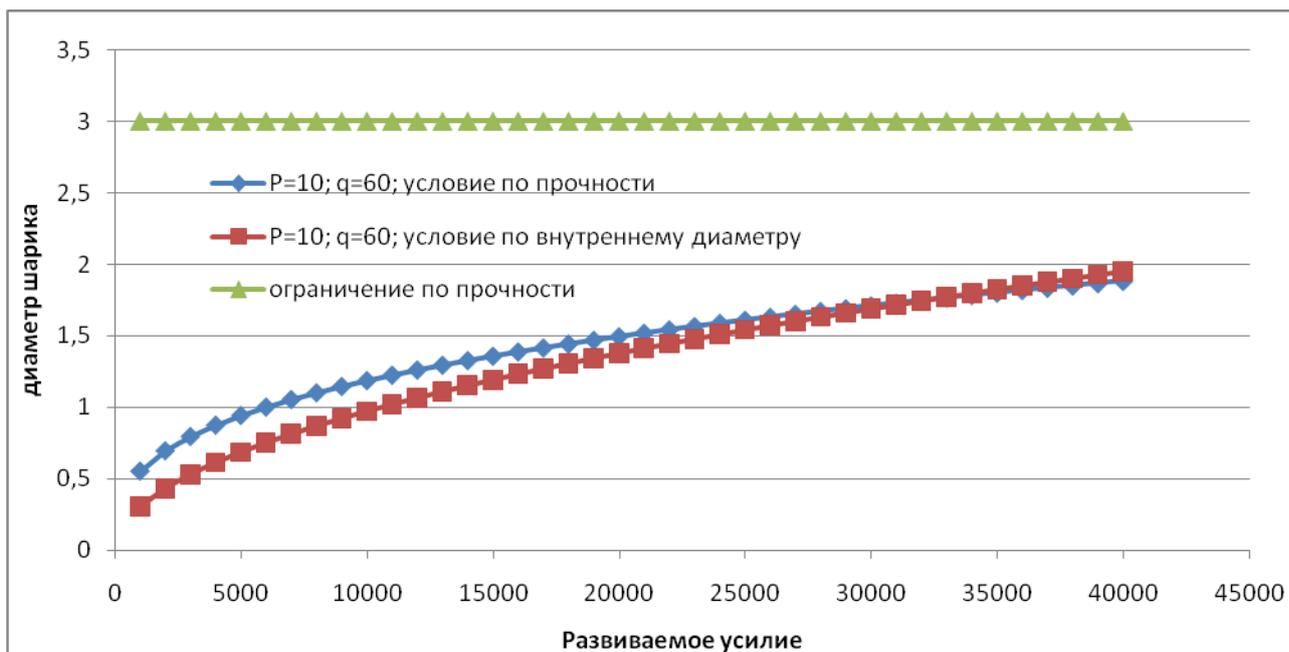


Рис. 10. Зависимости диаметров шариков от развиваемого усилия на выходном винте при шаге винта равном 10 мм, и передаточном числе волновой передачи с телами качения 60

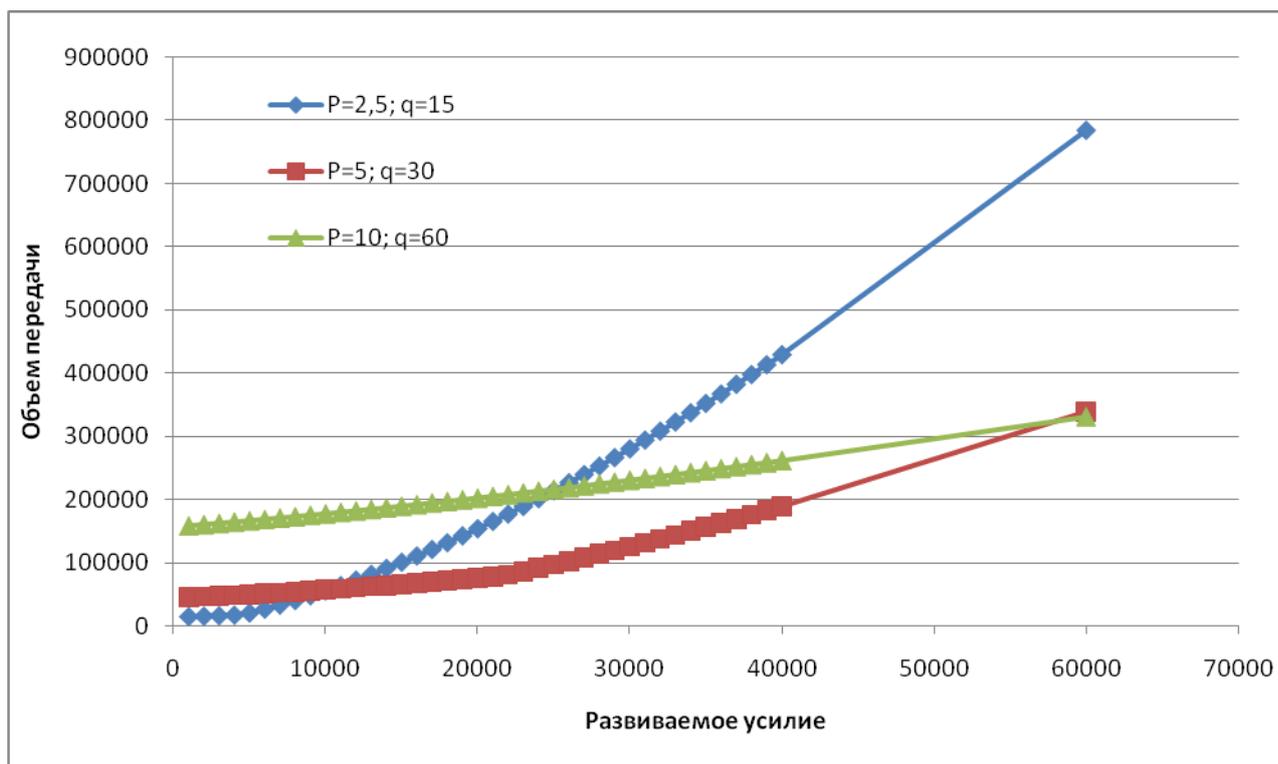


Рис. 11. Зависимости объемов исполнительного механизма силового минипривода от развиваемого усилия на выходном винте

Используя полученные характеристики можно сформулировать рекомендации по проектированию исполнительного механизма с выходным звеном движущимся поступательно.

Для получения наименьшего объема редуктора, необходимо использовать следующее правило: выбирать наименьший шаг резьбы выходного винта для требуемых нагрузок. Как видно из рис. 11, при нагрузках до 10 кН минимальный объем при шаге 2,5 мм, в интервале от 10 кН до 60 кН наименьший объем при шаге 5 мм, а начиная с нагрузок более 60 кН, наименьший объем будет при шаге 10 мм.

Таким образом, подбирая шаг резьбы выходного винта, можно уменьшить габариты исполнительного механизма, при этом, увеличение коэффициента передачи шариковинтовой передачи с сепаратором, компенсируется также за счет увеличения передаточного числа в промежуточной волновой передаче с телами качения.

Библиографический список

1. Борисов М.В., Самсонович С.Л. «Обоснование выбора схемы электропривода с выходным звеном, движущимся поступательно». Изд-во ТулГУ Технические науки №1 за 2012 год стр. 15-20.
2. Самсонович С.Л., Степанов В.С. Сравнительный анализ габаритов различных типов механических передач в зависимости от передаточного числа // Сборник докладов VII-й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» Москва, МАИ, 25-27 мая 2005 г. / Редкол.: В.А.Полковников (пред.). – М.: Изд-во МАИ, 2005.
3. Самсонович С.Л., Константинов С.А. Исполнительные механизмы на основе волновой передачи. Патент РФ №2265147. Оpubл. 27.11.2005 Бюл. №33.
4. Геращенко А.Н., Постников В.А., Самсонович С.Л. Пневматические, гидравлические и электрические приводы летательных аппаратов на основе волновых исполнительных механизмов: Учебник. – 2 е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010.

Сведения об авторах

Борисов Михаил Васильевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш.,4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: 8(905)586-10-94; e-mail: one2k.bmw@gmail.com

Самсонович Семён Львович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш.,4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-50-00