

ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СИЛОВОГО РОЛИКОВИНТОВОГО МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Толков А.В.¹, Круглов А.В.¹, Жданов А.В.¹, Филимонов В.Н.¹, Морозов В.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87), zhdanov@vlsu.ru.

В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований долговечности электромеханического привода на базе силового роликвинтового механизма с длинными роликами. Дается описание экспериментального образца, который выполнен на основе патента; дано описание режимов испытаний, обоснован выбор средств измерений, предложена методика измерений, выполнен расчет эквивалентного числа часов работы исполнительного механизма при ускоренных испытаниях на долговечность; описаны исследования мертвого хода и момента холостого хода. Все исследования иллюстрированы экспериментальными графиками. Механизм работал на синусоидальном, треугольном и прямоугольном входном сигнале привода, в ходе испытаний смазывался пластической смазкой. Так величина среднего мертвого хода после испытаний на долговечность с учетом доверительного интервала не превысила 0,14 мрад. Получены величины изменения величин момента холостого хода при выдвижении и втягивании ходовой гайки от торца корпуса от 25 до 160 мм. Увеличение момента холостого хода после 400 ч объясняется изменением взаимного углового положения приработанных поверхностей корпуса и ходовой гайки, вследствие отвинчивания корпуса для добавления смазки. Исследованиями доказано, что исполнительный механизм на базе силового роликвинтового механизма имеет долговечность, превышающую заданную как минимум в 1,6 раза. За эквивалентное время работы зазоры в исследуемом механизме не появились, а величины среднего мертвого хода передачи и промежуточного редуктора с учетом доверительного интервала, и момента холостого хода соответствуют перспективным требованиям, что в отечественной практике получено впервые. Это позволяет сделать вывод о перспективности использования роликвинтовых механизмов в подобных приводах.

Ключевые слова: электромеханический привод, роликвинтовой механизм (РВМ), долговечность, экспериментальные исследования

STUDY OF DURABILITY OF THE POWER ROLLER SCREW MECHANISM OF ELECTROMECHANICAL DRIVE TRANSLATIONAL MOTION

Tolkov A.V.¹, Kruglov A.V.¹, Zhdanov A.V.¹, Filimonov V.N.¹, Morozov V.V.¹

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia (600000, Vladimir, Gorky street, 87), zhdanov@vlsu.ru

The article discusses the results of experimental studies of durability of electromechanical actuator based on the power roller screw mechanism with long rollers. A description of the experimental sample, which is based on a patent; given of describing, of test modes, justified the choice of measuring instruments, the technique of measurement, calculated the equivalent number of hours of operation of the actuator when the accelerated endurance test; describes research backlash and torque idling. All studies illustrated the experimental plots. Mechanism worked for sinusoidal, triangular and rectangular input drive signal, during testing mechanism lubricated by plastic lubricant. Since the average value of the backlash after the durability test based confidence interval does not exceed 0.14 mrad. Obtained values of changes in the values of idling at the moment of the extension and retraction of the spindle nut end of the body from 25 to 160 mm. Increase the time idling after 400 h explained by changes in relative angular position of the run-in surfaces of the housing and spindle nut due to loosening the body to add grease. Studies have shown that the drive on the basis of power roller screw mechanism has durability exceeds a predetermined at least 1.6 times. For the equivalent time of the gaps in the test mechanism did not appear, and the mean backlash transmission and gear unit, taking into account the confidence interval, and the time of idling meet future requirements that domestic practice was first obtained. This leads to the conclusion about the perspectives of using roller screw mechanisms in such drives.

Keywords: electromechanical drive, rollerscrew mechanism (RSM), durability, experimental research

Целью исследования является оценка соответствия долговечности работы электромеханического привода [1] на базе исполнительного механизма (ИМ) с

роликвинтовой передачей с длинными роликами РВПД 66 х 6 заданной долговечности 1000 ч. Функциональная схема испытательного стенда приведена в литературе [2] с учетом рекомендаций [3]. Величина плеча приложения нагрузок, как от электрогидравлического привода, так и на ИМ составляет 520 мм, что соответствует условиям эксплуатации ИМ.

Материал и методы исследования

Испытания ИМ на базе РВПД 66 х 6 проводились в режиме обратного хода [2, 4]. Режим обратного хода для ИМ тяжелее, чем режим прямого хода, потому что КПД обратного хода меньше КПД прямого хода. Для предотвращения поломок ИМ в ходе испытаний были предусмотрены механические ограничивающие упоры и электрические ограничивающие упоры. Для обеспечения заданных усилий частота входного сигнала задавалась выше, чем была запланирована. Режимы проведенных ускоренных испытаний на долговечность приведены в литературе [2, 3, 5]. Время проведенных ускоренных испытаний составило 500 ч. Для оценки состояния ИМ, в процессе испытаний на долговечность, через каждые 50 ч работы производились оценки следующих механических характеристик:

- а) величина мертвого хода в ИМ, приведённого к оси гайки;
- б) момент холостого хода (M_{xx}) в ИМ, демонтированном со стенда;
- в) плавность работы ИМ.

Выбор средств измерения для оценки мертвого хода.

Допуск на ошибку стабилизации принимаем $T_{mx} = 0,05$ мрад. Допускаемая погрешность измерения составляет 35 % от допуска на ошибку стабилизации [2,5], т.е. 0,0175 мрад. Погрешность средства измерения составляет 80 % от допускаемой погрешности измерения, т.е. 0,014 мрад. Погрешность средства измерения, приведенная к оси двигателя должна быть меньше либо равна 7 мрад. Для измерения осевого мертвого хода ИМ использовалась миллиметровая бумага с ценой деления 1 мм и погрешностью измерения 0,25 мм. Погрешность измерения миллиметровой бумаги, приведенная к оси двигателя, равна 6,25 мрад. Таким образом, выбранное средство измерения подходит для измерения величины мертвого хода. Для качественного определения момента выборки мертвого хода использовался индикатор с диапазоном шкалы измерения ± 4 мкм и ценой деления 0,1 мкм.

Измерение мертвого хода передачи производилось следующим образом:

- на обод имитатора двигателя наклеивали миллиметровую бумагу, которая являлась шкалой измерения мертвого хода передачи;
- со стороны имитатора двигателя закреплялась стрелка, располагавшаяся над миллиметровой бумагой;
- ходовая гайка выдвигалась на определенное расстояние от торца корпуса: 25, 60, 95, 130, 160 мм;

- наконечник индикатора упирался в ходовую гайку через концевую меру;
- сначала выбирался мертвый ход в одном направлении вращением имитатора двигателя, и после остановки отмечалось деление на миллиметровой бумаге, которое принималось за начало отсчета;

- имитатор двигателя вращался в направлении, противоположном направлению в котором был выбран мертвый ход, до страгивания стрелки индикатора с места, и записывалось расстояние по миллиметровой бумаге от начала отсчета до страгивания стрелки индикатора.

Выбор средств измерения для оценки момента холостого хода.

Допуск на момент холостого хода составлял $T_{\text{мхх}} = 0,08$ Н·м. Допускаемая погрешность измерения принимается равной 35 % от допуска на момент холостого хода [2, 4, 5], т.е. 0,028 Н·м. Погрешность средства измерения составляет 80 % от допускаемой погрешности измерения, т.е. 0,022 Н·м. Погрешность средства измерения момента холостого хода должна быть меньше либо равна 0,022 Н·м. Измерение момента холостого хода производилось с помощью пружинного динамометра со шкалой измерения от 0 до 60 Н и ценой деления 1 Н, и бечевки, намотанной на обод имитатора. Ошибка измерения момента холостого хода пружинным динамометром равна 0,02 Н·м. Таким образом, выбранное средство измерения подходит для измерения величины момента холостого хода. Измерение момента холостого хода производилось следующим образом:

- ходовая гайка выдвигалась на определенное расстояние от торца корпуса: 25, 60, 95, 130, 160 мм;

- на имитатор двигателя наматывалась бечевка, закрепленная с одной стороны на имитаторе, а с другой – на пружинном динамометре;

- к имитатору прикладывалась окружная движущая сила через пружинный динамометр, и фиксировалось значение этой силы в Н;

- для определения момента холостого хода значение окружной силы умножалось на плечо имитатора 0,04 м.

Плавность работы ИМ исследовалась тактильно: при ручном приводе (когда нагружающий гидропривод выключен) и при измерении момента холостого хода.

Расчет эквивалентного числа часов работы исполнительного механизма на базе РВПД 66 х 6 при ускоренных испытаниях на долговечность

Известно [6, 7], что кривая усталости роликвинтовых передач может быть аппроксимирована степенной зависимостью:

$$F^p N = \text{const} , \quad (1)$$

где F – осевая нагрузка на передачу; N – число оборотов винта; $p = 3$ – показатель степени.

При переменности режима работы, т.е. переменности величины нагрузок F_i и числа циклов N_i при этой нагрузке за расчетную нагрузку можно принять номинальную (заданную), а переменность режима работы учитывать через определение эквивалентного числа циклов N_E [2, 6, 7]:

$$\sum \frac{N'_i}{N_i} = \text{const} = 1, \quad (2)$$

где N'_i – фактическое число циклов действия некоторой нагрузки F_i ; N_i – число циклов до разрушения при той же нагрузке.

В нижеуказанных формулах параметры имеют следующие обозначения:

F_H – номинальная заданная нагрузка, Н; S – величина перемещения гайки за оборот винта, мм; A_H, A_i – номинальная и фактическая амплитуда, мм; v_H, v_i – номинальная и фактическая частота, Гц; t_i – фактическое время на i -той частоте, ч; t_E – эквивалентное время работы, ч.

Умножим числитель и знаменатель в уравнении (2) на F_i^p и выразим N_E :

$$N_E = \sum \left(\frac{F_i}{F_H} \right)^p N'_i, \quad (3)$$

где $N'_i = v_i \cdot \frac{4A_i}{S} \cdot 3600 \cdot t_i$ и $N_E = v_H \cdot \frac{4A_H}{S} \cdot 3600 \cdot t_E$.

Выразив t_E , получим:

$$t_E = \sum \left(\frac{JA_i \omega_i^2}{JA_H \omega_H^2} \right)^p \frac{A_i}{A_H} \cdot \frac{v_i}{v_H} \cdot t_i. \quad (4)$$

Подставляя в последнее уравнение выражения $\omega_i = 2\pi v_i$ и $\omega_H = 2\pi v_H$, $p = 3$ получаем:

$$t_E = \sum \left(\frac{A_i}{A_H} \right)^4 \cdot \left(\frac{v_i}{v_H} \right)^7 \cdot t_i. \quad (5)$$

По указанным формулам проведена оценка эквивалентного числа циклов и эквивалентного времени работы ИМ на базе РВПД 66 х 6 применительно к режимам работы при ускоренных испытаниях на долговечность. Оценка эквивалентного числа часов работы приведена в [2, 7].

При расчетах эквивалентное время работы составило 1666 ч, т.е. превысило заданную долговечность 1000 ч в 1,6 раза. В ходе ускоренных испытаний на долговечность проведены экспериментальные исследования мертвого хода ИМ на базе РВПД 66х6 [2, 8] при синусоидальном, треугольном и прямоугольном входном сигнале. На рис. 1 и 2 представлено

изменение величины мертвого хода ИМ от времени при выдвигании и втягивании ходовой гайки от торца корпуса на следующие расстояния: 25, 60, 95, 130, 160 мм.

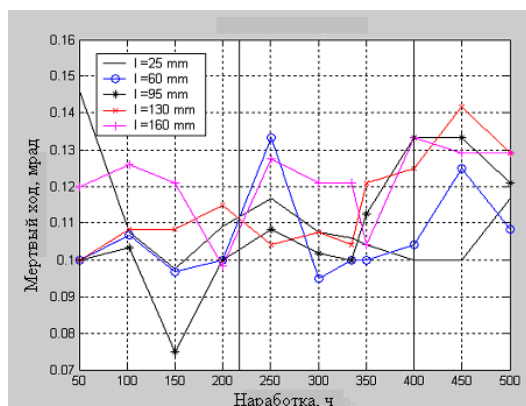


Рис. 1. Зависимость величины мертвого хода ИМ от времени при выдвигании ходовой гайки из корпуса

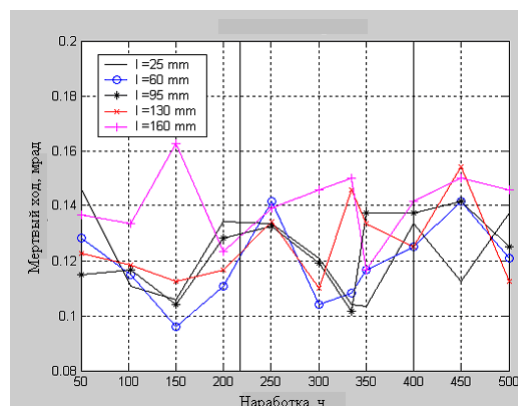


Рис. 2. Зависимость величины мертвого хода ИМ от времени при втягивании ходовой гайки в корпус

Изменение величины мертвого хода передачи от времени представлено на рис. 3. Передача работала от 0 до 217 ч 45 мин на синусоидальном входном сигнале; от 217 ч 45 мин до 400 ч на треугольном входном сигнале и от 400 ч до 500 ч – на прямоугольном входном сигнале. Границы продолжительности входных сигналов показаны сплошными вертикальными линиями. Средняя линия на графике показывает изменение среднего значения мертвого хода при соответствующем времени работы передачи (измеренного при выдвигании и втягивании ходовой гайки относительно корпуса передачи). Нижняя и верхняя границы изменения среднего значения мертвого хода соответствуют доверительному интервалу $\pm 3 \cdot S_i / \sqrt{N-1}$ (здесь S_i – среднее квадратическое отклонение среднего значения мертвого хода, N – число индивидуальных наблюдений за отработанное время).

Колебание измеренного мертвого хода в различные моменты измерений можно объяснить случайными погрешностями методики измерения, зависящими от субъективных (человеческих) факторов. Как видно из рис. 3, величина среднего мертвого хода после испытаний на долговечность с учетом доверительного интервала не превышает 0,14 град. Величина погрешности определяется, в основном, боковыми зазорами в зубчатом редукторе. В ходе ускоренных испытаний на долговечность проводились экспериментальные исследования момента холостого хода ИМ на базе РВПД 66 х 6 [2, 8] при синусоидальном, треугольном и прямоугольном входном сигнале. На рис. 4 и 5 представлено изменение

величины момента холостого хода при выдвигании и втягивании ходовой гайки от торца корпуса на следующие расстояния: 25, 60, 95, 130, 160 мм.

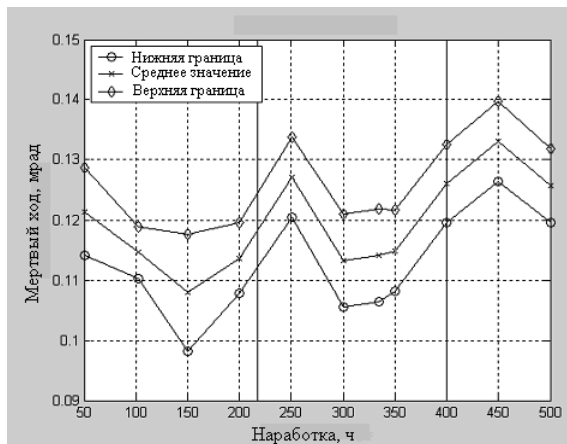


Рис. 3. Изменение величины мертвого хода РВМ от времени

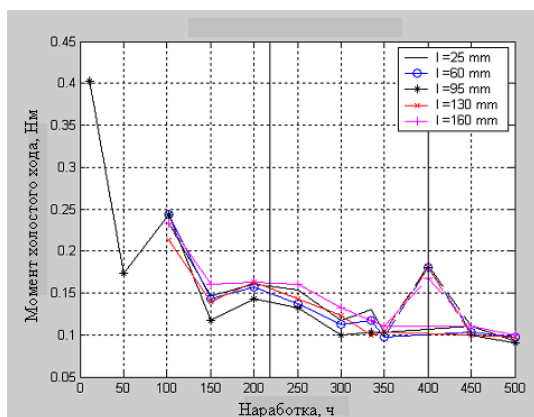


Рис. 4. Зависимость величины момента холостого хода РВМ от времени при выдвигании ходовой гайки из корпуса

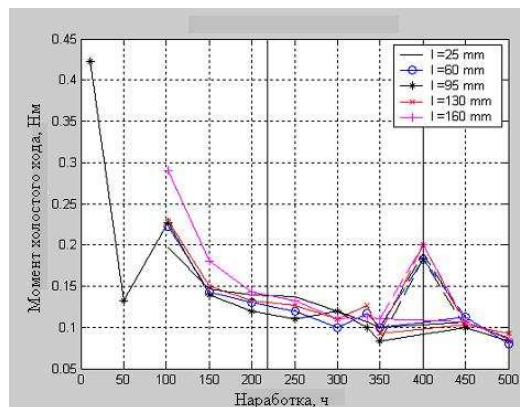


Рис. 5. Зависимость величины момента холостого хода РВМ от времени при втягивании ходовой гайки в корпус

Передача РВПД 66 х 6 в ходе испытаний смазывалась смазкой Литол – 24 ГОСТ 21150-97 два раза: перед началом испытаний и после 400 ч работы. Увеличение момента холостого хода после 400 ч объясняется изменением взаимного углового положения приработанных поверхностей корпуса и ходовой гайки, вследствие отвинчивания корпуса для добавления смазки. Оценка изменения величины момента холостого хода ИМ представлена в [2], а ее графическое представление – на рис. 6.

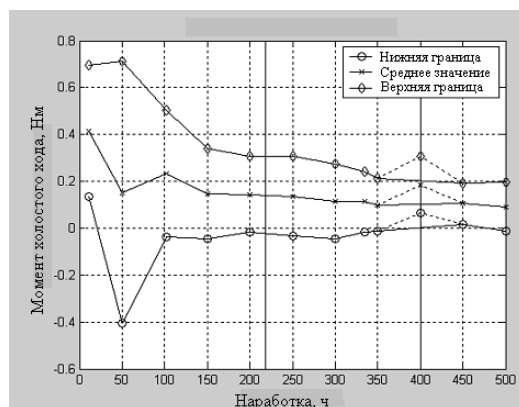


Рис. 6. Зависимость изменения величины момента холостого хода РВМ от времени

Увеличение момента холостого хода после добавления смазки показано на рис. 6, 7, 8 пунктирными линиями. Передача работала от 0 до 217 ч 45 мин на синусоидальном входном сигнале; от 217 ч 45 мин до 400 ч на треугольном входном сигнале и от 400 ч до 500 ч – на прямоугольном входном сигнале. Границы продолжительности входных сигналов показаны сплошными вертикальными линиями. Средняя линия на графике показывает изменение среднего значения момента холостого хода (рис. 8) при соответствующем времени работы передачи (измеренного при выдвигении и втягивании ходовой гайки относительно корпуса передачи).

Нижняя и верхняя границы изменения среднего значения момента холостого хода соответствуют доверительному интервалу $\pm 3 \cdot S_i / \sqrt{N - 1}$ (здесь S_i – среднее квадратическое отклонение среднего значения момента холостого хода, N – число индивидуальных наблюдений за отработанное время). Как видно из рис. 8 средний момент холостого хода за время испытаний на долговечность, вследствие приработки, снизился с 0,4 до 0,1 Н·м.

Выводы

1. С помощью экспериментальных исследований доказано, что ИМ на базе РВПД 66 х 6 имеет долговечность, превышающую заданную (1000 ч) как минимум в 1,6 раза.
2. Доказано, что за эквивалентное время работы 1666 ч зазоры в передаче РВПД 66 х 6 не появились, а величины среднего мертвого хода передачи и промежуточного редуктора с учетом доверительного интервала, и момента холостого хода соответствуют перспективным требованиям, что в отечественной практике получено впервые.

Список литературы

1. Детали машин: Учеб. для ВУЗов/ Под ред. О.А. Ряховского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с.

2. Жданов А.В. Исследование износа роликовинтовых планетарных механизмов с кольцевыми роликами [Текст] / А.В. Жданов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М: Машиностроение, 2011 - №5. – С. 22-26. ISBN 1819-2092.
3. Жданов А.В. Повышение надежности и долговечности роликовинтовых механизмов // Дисс.на соискание ученой степени к.т.н. – Владимир, ВлГУ, 1998. – 134 с.
4. Машины и стенды для испытаний деталей/ Под. ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1979. – 343 с.
5. Новоселов Б.В. Экспериментальные исследования долговечности исполнительного механизма на базе РВПД 66х6х165 [Текст]/ Б.В. Новоселов, В.В. Козырев, Г.К. Слипенко, В.А. Шаталов, А.В. Толков // Вопросы оборонной техники. – 2005. - № 11-12. – С. 32-35.
6. Патент на полезную модель № 127148 Российская Федерация. Электромеханический привод / Мамаев И.М., Крылов А.В., Филимонов В.Н., Шаталов В.А.; поступ. 26.10.2012; опубл. 20.04.2013, бюл. № 8.
7. Толков А.В. Исследование характеристик передачи с длинными резьбовыми роликами как элемента специального следящего привода // Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. – Владимир, ВлГУ, 2006. – 136 с.
8. Якушев А. И., Воронцов Л. Н., Федотов Н. М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учеб. для ВТУЗов. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

Рецензенты:

Гоц А.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры тепловых двигателей и энергетических установок ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир;

Кульчицкий А.Р., д.т.н., профессор, заместитель главного конструктора по испытаниям ООО «ВМТЗ», г.Владимир.