

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНЦЕРН FESTO
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «СИНЕРГИЯ»
ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
БАЛТИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ВОЕНМЕХ» ИМ. Д. Ф. УСТИНОВА
СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АВТОМАТИЗАЦИЯ, МЕХАТРОНИКА, ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Материалы
VIII Международной научно-технической интернет-конференции
молодых ученых

(Россия, Омск, 16 мая 2018 года)

AUTOMATION, MECHATRONICS, INFORMATION TECHNOLOGIES

International Scientific and Technical Internet Conference of Young Scientists

(Russia, Omsk, 16 May 2018)

Омск
Издательство ОмГТУ
2018

А.В. Михалев, В.И. Осипов, В.А. Королёв, А.В. Киев Насос гидродинамического демпфера	80
А.А. Тарасов, А.Г. Нефёдов, В.А. Цветков, В.В. Попов Выбор способа горизонтирования транспортных платформ в зависимости от требований точности и нагрузки	85
Б.Н.Фешин, Л.Г.Шпакова Задачи оптимального управления электроприводами робота-манипулятора.....	91
Ю. В. Титов, Д. С. Реченко, Д.Г. Балова, А. Ю. Андрейчук Разработка установки для получения «чистых» поверхностей и ультрадисперсного порошка высокоскоростным способом в криогенной среде.	94

Секция 3

ПРОГРАММНОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

И.Ю. Шевченко, С.С. Поярков Программное обеспечение управления автономным тренажером «МТО».....	101
А.А. Новиков, В.В. Заводов, М.С. Пешко Оптимизации подбора термометров сопротивления с помощью программного пакета MATLAB Simulink.....	106
В. Ф. Филаретов, А. С. Губанков, И. В. Горностаев Особенности формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов промышленных роботов с избыточными степенями подвижности	114
А.О. Строев , А. Н. Кужель , И. М. Зуга, В. Г. Хомченко Автоматизация синтеза схем внешних кабельных проводок на ортогональном поле с использованием волнового алгоритма	119
А.О. Строев, А. Н. Кужель, И. М. Зуга, В. Г. Хомченко Синтез схем внешних кабельных проводок на основе волнового алгоритма с использованием окрестности Мура.....	122
И.И. Малахов, Е.И. Моренко, К.А. Лузарев, М.А. Семиколенов Моделирование и кинематический анализ кривошипно-ползунного механизма.....	125

Секция 4

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Г.С. Нурмаганбетова Косвенные методы определения активного сопротивления и температуры статора асинхронного электродвигателя.....	130
Ю.А. Жуков, М.И. Надежин Моделирование трения в линейном приводе системы управления гексаподом космического назначения	134
Р. Ю. Сухарев, Е. И. Пастухова Нечеткое регулирование в АСУТП гидроочистки дизельного топлива.....	143

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕНИЯ В ЛИНЕЙНОМ ПРИВОДЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕКСАПОДОМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ю. А. Жуков¹, М. И. Надежин¹

¹БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация – Представлена имитационная модель динамики гексапода с линейными приводами на основе шаговых двигателей, реализованная в среде MATLAB® и SIMULINK®. Дано математическое описание составных частей модели: механической части гексапода, электромагнитной части шагового двигателя, модели трения Лягу. Отражены результаты моделирования позиционного управления гексаподом, отмечены особенности модели, перспективы и пути развития имитационной модели гексапода.

Ключевые слова – гексапод, линейный привод, трение Лягу, шаговый двигатель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа проведена в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 (ПРОЕКТ 218) в рамках НИОКТР, выполняемой при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0160). Работы выполняются в организации Головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» и АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнева ведется совместная работа по созданию ряда многостепенных механизмов с параллельной кинематикой для обеспечения точного позиционирования и стабилизации бортовых приборов и устройств космического назначения.

Успешное создание подобных систем невозможно без предварительного компьютерного моделирования, позволяющего качественно оценить возникающие в процессе конструирования структурные, функциональные, алгоритмические решения.

Система управления гексаподом должна осуществлять позиционное и контурное управление подвижной платформой, в процессе которого на основании решения обратной задачи кинематики [1] вычисляются задающие воздействия для линейных приводов и по сигналам с датчиков обратной связи минимизируется ошибка управления. Кроме того, система управления должна решать прямую задачу кинематики [1] для оценки текущего положения и ориентации платформы [2].

Управление должно осуществляться с учетом эффектов трения, возникающих в механической передаче винт-гайка. Для анализа трений в механизме используется динамическая модель Лягу [3].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования является цифровая система управления механизмом с параллельной кинематикой с шестью степенями свободы («Гексапод»). Гексапод, изображенный на Рис.1, состоит из неподвижного основания 2 и подвижной платформы 1,

которые механически соединены посредством шести идентичных звеньев – ног (штанг, стоек). Каждая нога представляет собой линейный привод и состоит из двух полуштанг 3 и 4, соединенных с основанием и платформой двухосевыми шарнирами 6 и 5 соответственно. Шаговый двигатель в каждой ноге формирует линейное перемещение полуштанги 3 относительно полуштанги 4. Это движение реализуется за счет механической передачи редуктор-«винт-гайка» в конструкции ноги, преобразующей вращательное движение вала шагового двигателя в линейное (поступательное) движение полуштанги 3.

В конструкции линейного привода с целью увеличения точности позиционирования предусмотрены люфтовыбирающие механизмы, которые являются сильными источниками трений. Для устройства с высокой кинематической точностью необходимо учитывать эти эффекты и их влияние на динамику системы.

Основной целью настоящей работы является разработка имитационной динамической модели системы управления гексаподом с учетом нелинейностей шагового двигателя и потерь на трение в линейных приводах ног, позволяющей оценить влияние параметров составных частей устройства и алгоритмов управления приводами на качество функционирования гексапода.

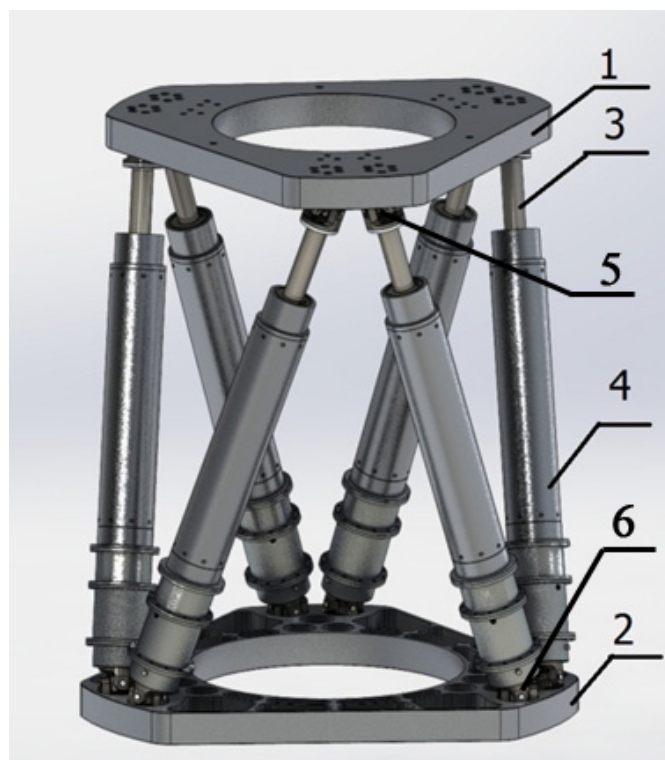


Рис. 1. Эскиз гексапода

III. ТЕОРИЯ

Для высокой точности и дискретности перемещения в линейном приводе применяется гибридный шаговый двигатель. Использование в составе привода датчика положения ротора позволяет решить проблему пропуска шагов.

Математическая модель электромагнитной части двухфазного ШД описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L\dot{I}_a = U_a - I_a R + \omega K_m \sin(p\theta) \\ L\dot{I}_b = U_b - I_b R - \omega K_m \cos(p\theta) \\ T_e = -K_m I_a \sin(p\theta) + K_m I_b \cos(p\theta) - T_{dm} \sin(2p\theta) \end{cases},$$

где I_a, I_b – токи в обмотках статора, U_a, U_b – напряжения питания на обмотках статора, R – сопротивление обмотки статора, L – индуктивность обмотки статора, K_m – постоянная момента, создаваемая магнитом, p – число пар полюсов, θ – угловое положение вала двигателя, ω – скорость вращения вала двигателя, T_{dm} – остаточный электромагнитный тормозящий момент двигателя, T_e – создаваемый электродвигателем выходной электромагнитный момент на валу.

Достаточно полно смоделировать эффект трения в линейном приводе возможно благодаря динамическим моделям трения. В [4] проводится их сравнительный анализ и экспериментальные исследования. Среди исследователей и разработчиков мехатронных систем наибольшую популярность получила модель ЛуГре, описываемая системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} F &= \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \\ \frac{dz}{dt} &= v - \frac{|v|}{g(v)} z \\ \sigma_0 g(v) &= F_C + (F_S - F_C) e^{-\left(\frac{v}{v_S}\right)^2}, \end{aligned}$$

где F – сила трения, v – скорость между двумя соприкасающимися поверхностями, z – переменная, характеризующая отклонение микронеровностей, расположенных между соприкасающимися поверхностями, σ_0 – коэффициент упругой жесткости, характеризующий пружиноподобное поведение системы с трением для малых смещений, σ_1 – коэффициент диссипации/демпфирования, σ_2 – коэффициент вязкого трения для высоких скоростей, F_C – уровень Кулонова трения, F_S – уровень статического трения (сила отрыва), v_S – параметр, называемый скоростью Штрибека и характеризующий скорость перехода от статического трения к Кулонову трению, функция $g(v)$ учитывает эффект прилипания и эффект Штрибека.

На Рис. 2 представлена схема трения ЛуГре.

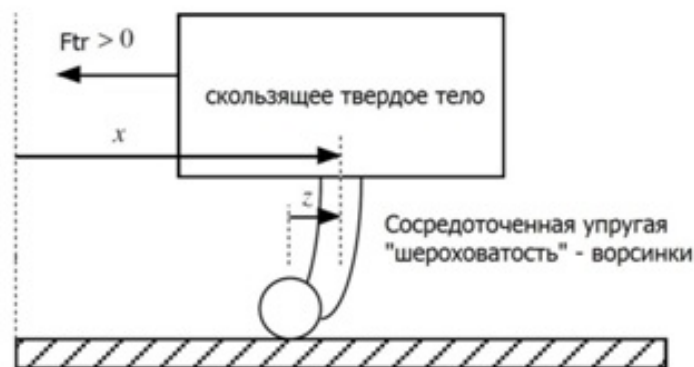


Рис. 2. Схема трения ЛуГре

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В среде MATLAB® и SIMULINK® разработана имитационная модель гексапода (Рис.3). К основанию Base, неподвижно закрепленному блоками Ground и Weld, и платформе Plate присоединяются ноги (Leg1...Leg6). Блок Body Sensor является элементом информационной системы и фиксирует положение платформы. Блок Machine Environment определяет параметры симуляции (вектор гравитации, режим анализа, линеаризацию, визуализацию, допустимые отклонения при расчетах).

Управление гексаподом осуществляется следующим образом: задается требуемое положение и ориентация платформы, по которому вычисляются необходимые изменения длин ног, а далее рассчитывается необходимый угол поворота для каждого двигателя. Таким образом, управление гексаподом реализуется посредством раздельного управления каждым приводом в цифровой следящей системе.

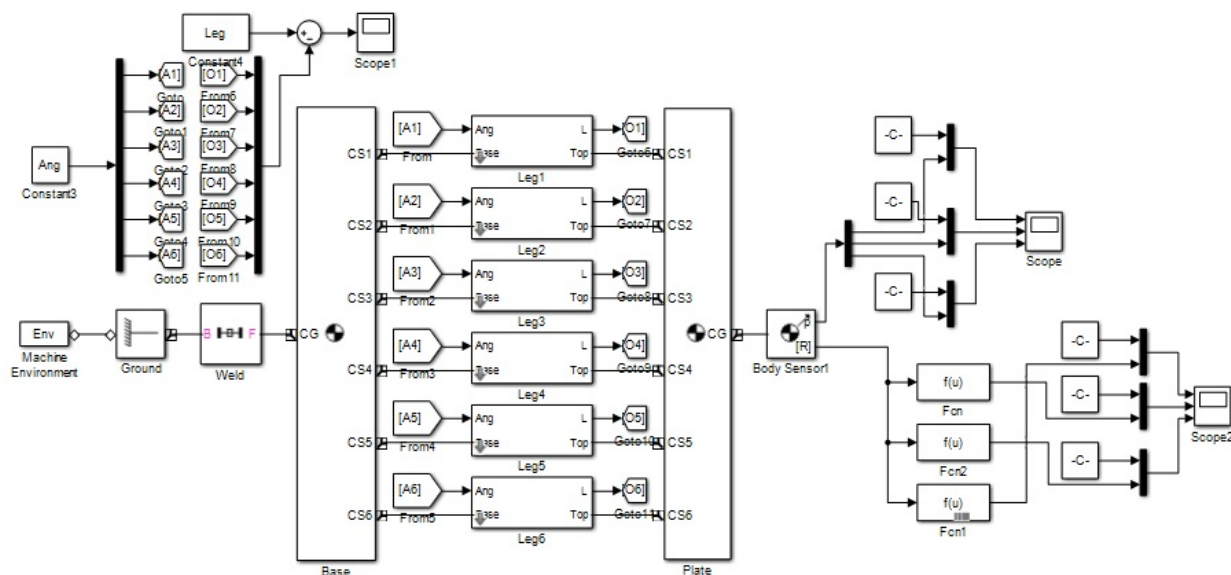


Рис. 3. Имитационная модель гексапода

На Рис. 4 представлена модель ноги гексапода, включающая в себя модели шагового привода и трения Лунге, реализованные по их математическим моделям.

Модель шагового двигателя состоит из двух подсистем: «Обмотки» (Рис.5) и «ЭМ» (Рис.6).

Блок «Обмотки» (Рис.5) имитирует обмотки электродвигателя. В блок приходит напряжение питания, значения текущего противо-ЭДС, потокосцепления, формируемого зубцами статора и угла. Далее происходит поэтапное преобразование напряжения в фазные токи и дальнейший их переход в электромагнитный момент, который через редуктор поступает на гайку.

В блоке «ЭМ» (Рис.6) происходит распределение управления по фазам, формируется ЭДС и считается значение по шагам электродвигателя на основании углов, положения и частоты вращения.

Регулятор реализован с помощью блока s-function. На вход блока приходит текущее значение ошибки обработки задающего сигнала, в соответствии с которым происходит формирование управляющих напряжений для фаз электродвигателя. Блок использует скрипт sfun.m, в котором написан алгоритм управления электродвигателем.

Квантователи имитируют цифровое преобразование задающего сигнала и обратной связи. Шаг квантования равен одному шагу двигателя и меняется в зависимости от вида управления (для полношагового управления шаг = $2\pi/(200 \cdot i_p) = 0.000628$ рад).

Механическая часть ноги была составлена с использованием библиотеки SimMechanics.

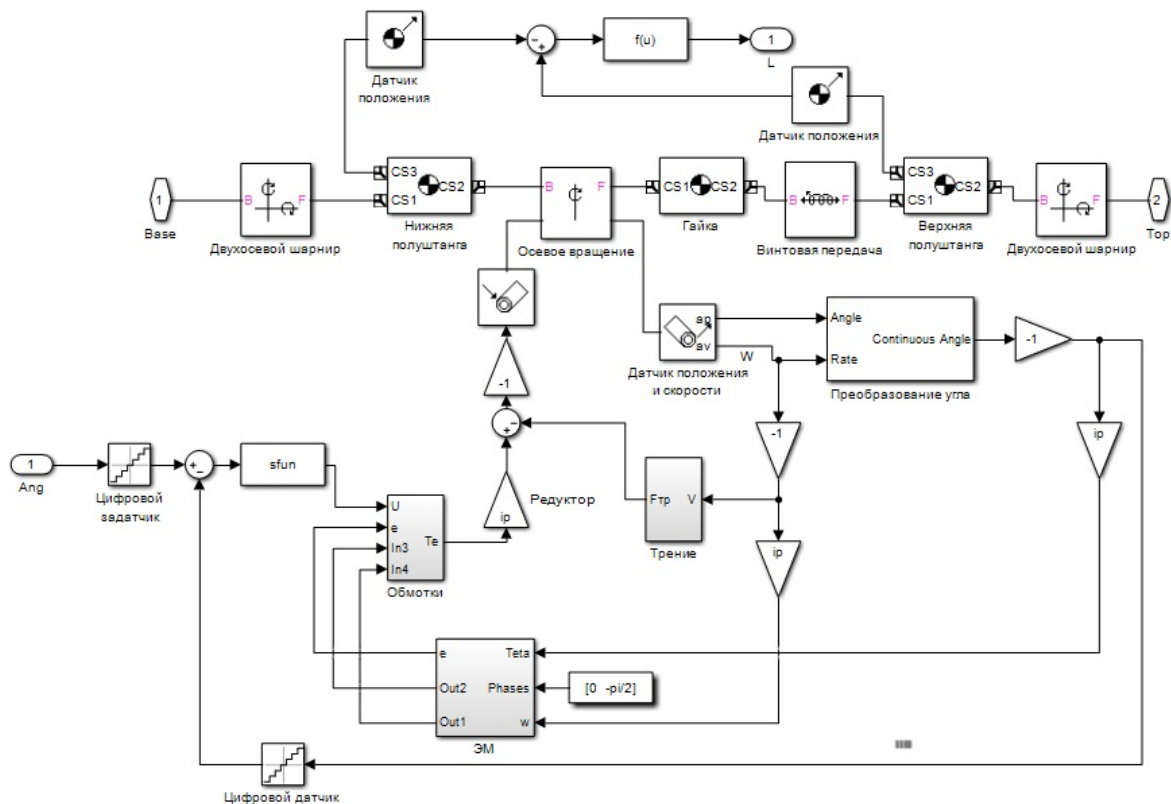


Рис. 4. Имитационная модель ноги гексапода

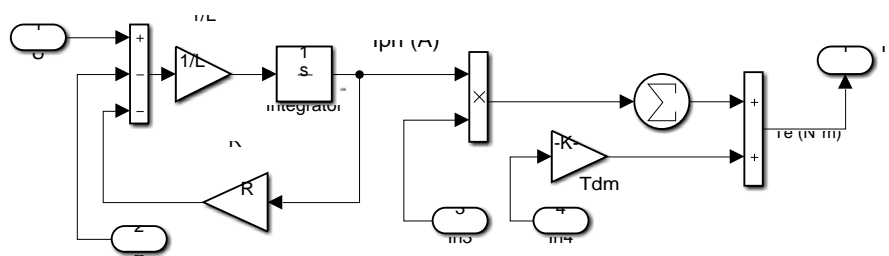


Рис. 5. Устройство блока Обмотки

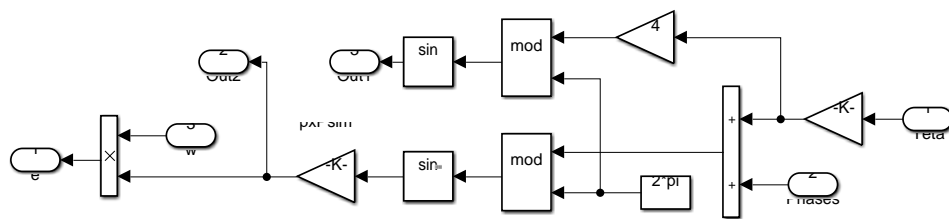


Рис. 6. Устройство блока ЭМ

В подсистеме «Трение» реализована модель ЛуГре (Рис.7). На вход блока поступает скорость вращения гайки, на выходе – сила трения, возникающая между гайкой и винтом.

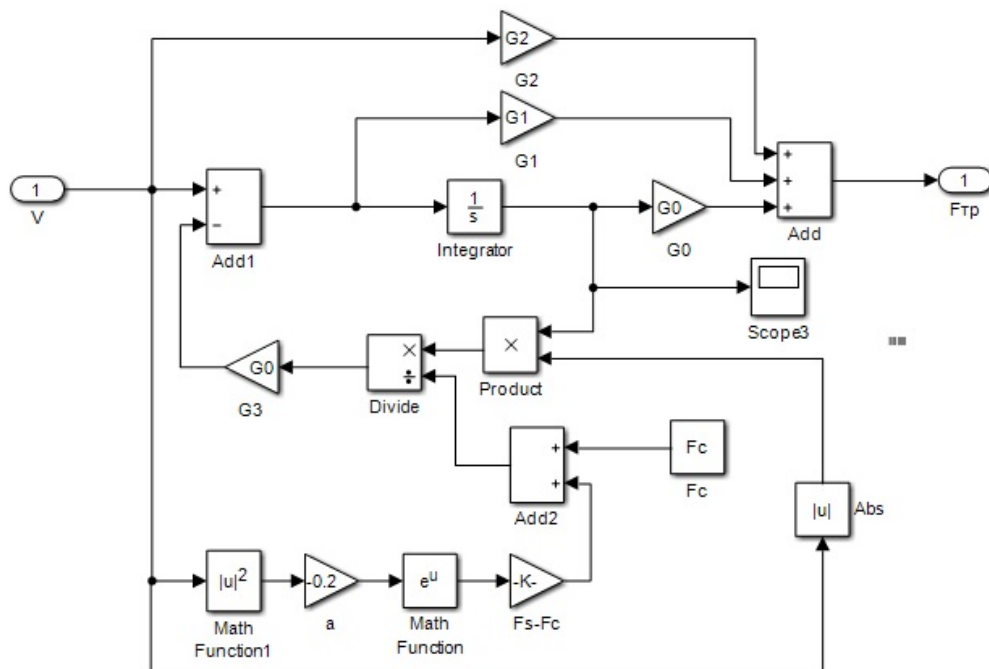


Рис. 8. Подсистема, реализующая трение ЛуГре.

Привод развивает усилие 50 Н, исходя из этого, выберем $F_S = 10 \text{ Н}$ и $F_C = 5 \text{ Н}$.

С точки зрения высокоточного управления приводом необходимо, чтобы отклонение щетинок, расположенных между соприкасающимися поверхностями, было меньше, чем необходимая точность позиционирования. Например, если необходима микронная точность позиционирования линейного привода, тогда отклонение щетинок должно быть порядка 10^{-7} м, поэтому выберем коэффициенты:

$$\sigma_0 = 1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}, \sigma_0 = 0, \sigma_0 = 10 \text{ Н*сек/м}, v_s = 2500 \text{ м/сек}.$$

С целью проверки работоспособности модели ноги гексапода было проведено моделирование процесса отработки гайкой заданного положения (Рис.9). Управление двигателем микрошаговое с дроблением шага 1/8. Ошибка управления – $1,881 \cdot 10^{-5}$ рад.

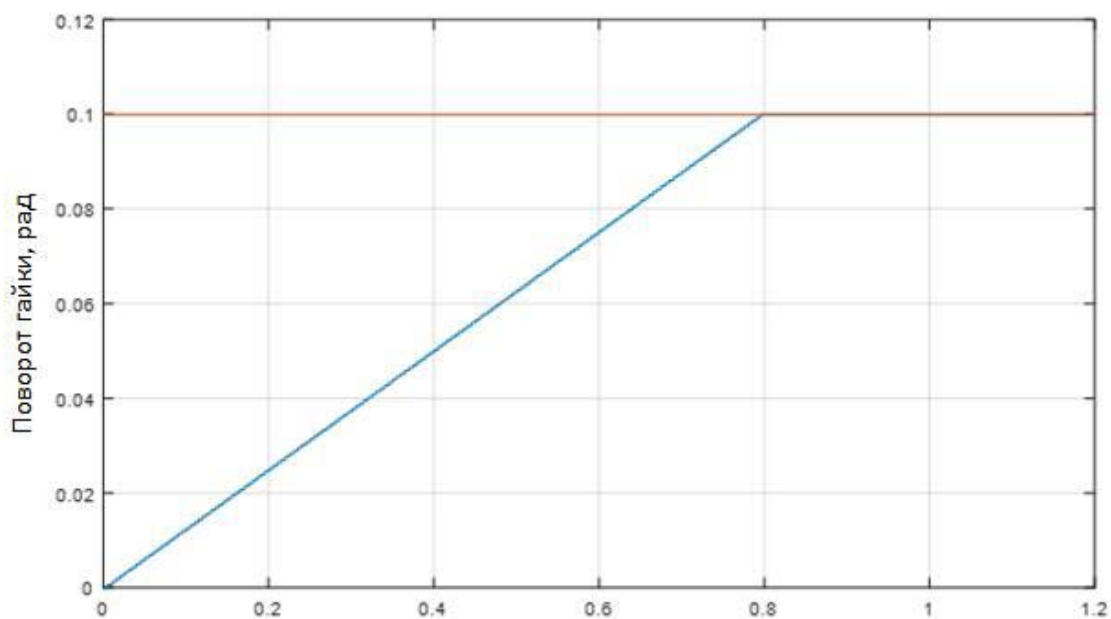


Рис. 9 – График отработки гайкой требуемого положения

Как видно из Рис.9 гайка отрабатывает требуемое положение с учетом эффектов трения в передаче винт–гайка, следовательно, модель составлена верно, а коэффициенты подобраны корректно.

Следующим этапом является исследование модели всего механизма. Анализируется гексапод со следующими параметрами механики: начальная высота $h=0.4$ м, диаметр основания 0.4 м, диаметр платформы – 0.3 м, расстояние между точками крепления смежных шарниров в основании и платформы – 0.05 м, масса платформы с инерционной нагрузкой – 100 кг, главные моменты инерции платформы $J_{xx}=4900$ кг*м², $J_{yy}=4900$ кг*м², $J_{zz}=6300$ кг*м². Массоинерционные параметры полуштанг вычисляются из представления их цилиндрами, зная плотность материала и размеры полуштанг.

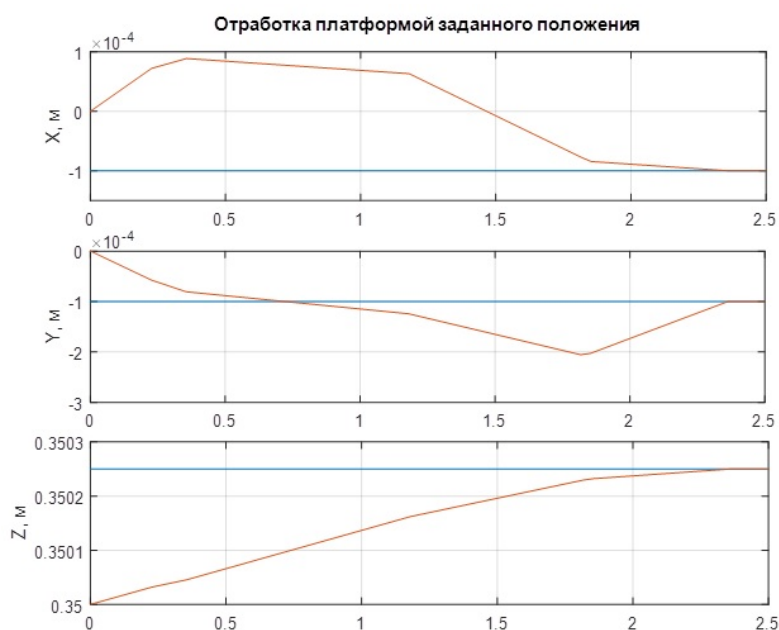


Рис. 9. График отработки положения платформой гексапода

Шаговый двигатель с параметрами по паспортным данным модели FL57STH56: $p=50$, $R=1.8 \text{ Ом}$, $L=0.0025 \text{ Гн}$, $K_m=0.5 \text{ Нм/А}$, $U=30 \text{ В}$, $T_{dm}=0.05 \text{ Нм}$. Коэффициент передачи редуктора с винтовой парой – $K_w=1.57 \cdot 10^5 \text{ рад/м}$.

Передаточное число редуктора $i_p = 50$.

На Рис.8 представлен график отработки платформой заданного положения. Управление двигателями микрошаговое с дроблением шага $1/8$.

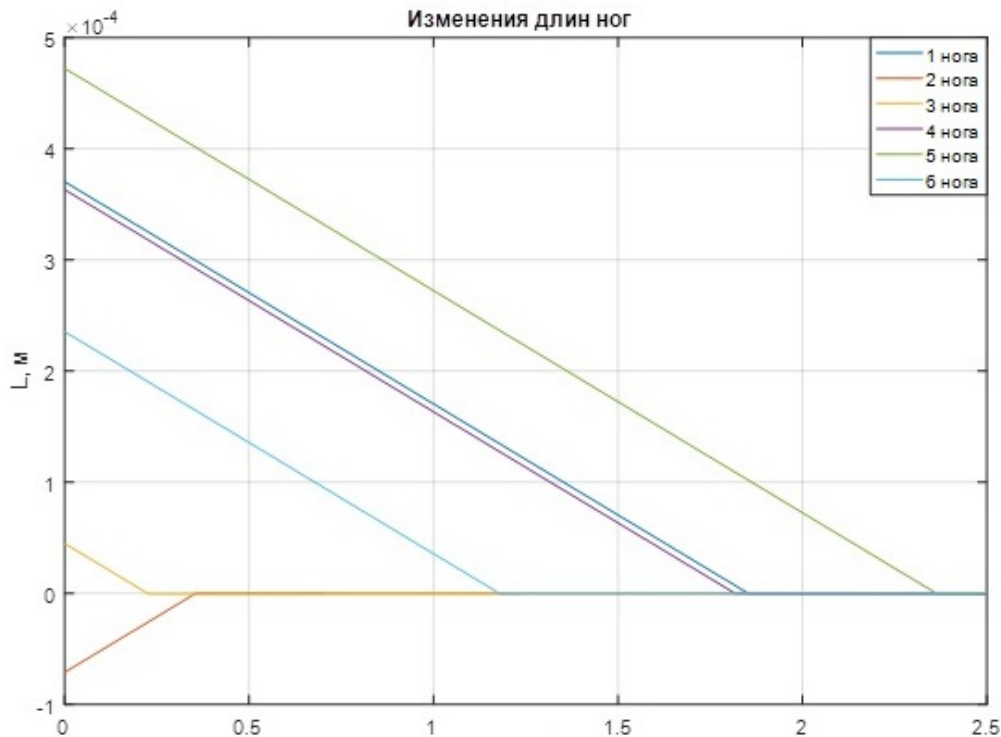


Рис. 10. График изменения длин ног гексапода

По графикам можно сделать вывод о полной работоспособности модели.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты моделирования отражают корректность разработанных имитационных моделей. В ходе исследований найдены параметры модели трений ЛуГре. Система управления решает задачу точного позиционирования и ориентации платформы в микрошаговом режиме регулирования шаговыми приводами. Погрешность позиционирования и ориентации не выходит за допустимые пределы.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана имитационная модель гексапода с цифровой системой управления, в которую были интегрированы модели шагового привода и трения ЛуГре. По результатам исследований модель оказалась полностью работоспособна и позволяет оценить режимы управления шаговыми линейными приводами, влияние конструктивных параметров, инерционной нагрузки и нелинейных сил трения на качество переходных процессов.

В перспективе планируется провести идентификацию параметров модели трения по данным испытаний линейного привода на специальном испытательном стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гавриленко В.А., Жуков Ю.А., Мороз А.В. Реализация задач кинематики на микропроцессоре ARM-архитектуры для мехатронных систем управления гексаподом // Вопросы радиоэлектроники. 2016. №8. С. 92–98.
- [2] Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В. Имитационная модель цифровой системы управления гексаподом с линейными приводами на базе шаговых двигателей// Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 35–42.
- [3] Karl Johan °Aström, Carlos Canudas de Wit. Revisiting the LuGre friction model. IEEE Control Systems Magazine, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, 28 (6), pp.101-114.
- [4] Захаров Ю.А. Анализ динамики гиросприборов в карданных подвесах с учетом эффекта предварительного смещения в трении: дис. к. техн. н. СГТУ, Саратов 2010.