DOI: 10.18411/vntr2024-172-3
УДК 534.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ НА ТРАЕКТОРИЮ ДВИЖЕНИЯ «ТОЧКИ» НА ЛЕНТЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ (СТЕНД «АЛЛИГАТОР 2М»)

© Николай Алексеевич Серков[1], Олег Викторович Пась[2]
[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
Serkov1943@mail.ru
[2]АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева», Москва, Россия

Аннотация. *Рассмотрен вопрос влияния внутреннего трения (упругого зазора) на траекторию движения рабочих органов технологических машин с системами ЧПУ и систем числового программно-копировального управления (ЧПКУ). По результатам проведенных экспериментальных исследований показана общность в искажении (наличие «полки») воспроизведения заданной траектории (синусоиды) движения «точки» на упругой ленте, «точки» на шарике, жестко закрепленном на упругой ленте, и «точки» на упругой полосе (линейке). Представлены результаты моделирования влияния внутреннего трения в материале ленты на траекторию движения «точки» (пятна) на упругой ленте. Для решения этой задачи использовались известные реологические модели материала и законы изменения сил внутреннего трения в процессе циклического деформирования. Моделирование проведено в среде MATLAB.*

Ключевые слова: *точность воспроизведения траектории, алгоритм коррекции, системы ЧПУ, петля гистерезиса, реологическая модель, геометрический зазор, упругий зазор, кинематический зазор.*

Работа выполнена в ИМАШ РАН в рамках бюджетного финансирования по теме: «Получение концептуальных и теоретических основ активных пространственных модульных структур с адаптивной кинематикой для создания роботизированных комплексов». 2022 – 2026 гг.

STUDY OF THE INFLUENCE OF INTERNAL FRICTION ON THE TRAJECTORY OF A "POINT" ON THE BELT DURING EXCITATION OF HARMONIC OSCILLATIONS (STAND “ALLIGATOR 2M”)

© N.A. Serkov[1], O.V. Pas[2]
[1]Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Serkov1943@mail.ru
[2]FSUE "NPO "Technomash", Moscow, Russia

Abstract. *The question of the influence of internal friction (elastic gap) on the trajectory of motion of working bodies of technological machines with CNC systems and numerical program-copying control systems (NPCS) is considered. According to the results of the conducted experimental*

researches the commonality in distortion (presence of a "shelf") of reproduction of a given trajectory (sinusoid) of motion of a "point" on an elastic tape, a "point" on a ball rigidly fixed on an elastic tape, and a "point" on an elastic strip (ruler) is shown. The results of modeling the influence of internal friction in the tape material on the trajectory of a "point" (spot) on the elastic tape are presented. To solve this problem, we used to know rheological models of material and laws of change of internal friction forces in the process of cyclic deformation. Modeling was carried out in MATLAB environment.
Keywords: *trajectory reproduction accuracy, correction algorithm, CNC systems, hysteresis loop, rheological model, geometric gap, elastic gap, kinematic gap.*

Acknowledgements. *The work was carried out at IMASH RAS within the framework of budget financing on the topic: "Obtaining conceptual and theoretical foundations of active spatial modular structures with adaptive kinematics for the creation of robotic complexes". 2022 – 2026.*

Введение. Развитие машиностроения тесно связано с необходимостью повышения быстродействия и точности выполняемых операций технологическим оборудованием, в частности оснащенном системами ЧПУ.

Среди многочисленных факторов, влияющих на несущую систему многокоординатной машины с ЧПУ и «искажающих» заданную траекторию движения рабочих органов, следует выделить динамические, проявляющиеся в процессе движения как на уровне узлов и деталей, так и на уровне конструкционных материалов. Среди этих факторов, в первую очередь, следует выделить геометрические и «упругие» зазоры.

Вредное влияние зазоров на точность воспроизведения пространственной траектории пытаются уменьшить путем усовершенствования конструкции и методами цифровой коррекции через систему ЧПУ.

Удачными «конструктивными» методами являются:

1. Переход от конструкций с зазорами к конструкциям с натягом (направляющие качения, шарико-винтовые передачи).
2. Упрощение приводов подачи путем перехода к (direct drive).
3. Замена подвижных соединений с трением скольжения на подвижные соединения с трением качения.
4. «Охват» обратной связью в следящих приводах элементов с зазорами несущей системы машины и др.

Однако конструктивными методами, хотя и удаётся существенно уменьшить вредное влияние зазоров, сил трения и гистерезиса в деформируемых элементах несущей системы на точность воспроизведения заданной траектории, но полностью устранить не удаётся. Кроме того, не всегда удается охватить элементы конструкции с зазорами обратными связями. Это вредное влияние указанных факторов особенно начинает сказываться в работе прецизионного оборудования с требованиями к точности воспроизведения траектории порядка 0,1 – 10 мкм [1-11]. В этих работах рассматривается влияние гистерезиса в пьезоактюаторе на точность отработки заданной траектории рабочего органа многокоординатного прецизионного технологического оборудования. В качестве примера, на рис. 1 показан вид гистерезиса при работе пьезоактюатора [1].

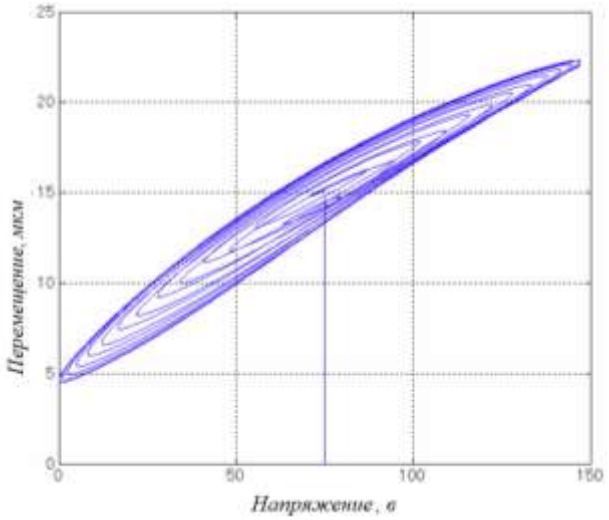


Рис. 1. Перемещение выходного звена пьезоактюатора в функции приложенного напряжения.

В данной статье представлено устройство точного позиционирования с пьезоэлектрическим приводом, интегрированным в опорно-несущий узел ШВП. Благодаря этому вся система может выполнять позиционирование стола на длине рабочего хода с высоким разрешением пьезоэлектрического привода. Применяя систему коррекции по результатам калибровки станка, можно существенно увеличить его точность позиционирования.

В связи с этим становится актуальным вопрос исследования природы возникновения (наличия) «упругого» зазора в несущих системах машин и, в частности, в упругих элементах деталей, изготавливаемых из конструкционных материалов.

Настоящая работа посвящена результатам исследования влияния внутреннего трения на траекторию движения точки (светового пятна ∅ 0,1 мм) на ленте, закрепленной с двух концов (стенд «Аллигатор 2М» [12]) при гармоническом возбуждении.

Искажение траектории движения точки (светового пятна ∅ 0,1 мм) на ленте, закрепленной с двух концов в каретках стенда. При исследовании колебаний упругой ленты из бериллиевой бронзы с напаянными шариками было замечено, что устойчиво наблюдается «срез» вершин синусоиды при многочисленных экспериментах. Например, на рис. 2 [12] представлено движение шарика № 5 в направлении оси Y при возбуждении ленты синусоидальным сигналом только с помощью правой каретки.

Аналогичное поведение шарика № 5 наблюдается и при возбуждении только левой каретки на частоте собственных колебаний в направлении оси Y.

Для выяснения причины возникновения такого явления были проведены дополнительные исследования:

1) измерены колебания якоря электровозбудителя мод. 11075 № 1 и № 2,
2) измерены свободные колебания кусочка той же самой ленты, которая использовалась на стенде,
3) измерены колебания стальной ленты (измерительная линейка – «метр», закрепленная с концов на каретках).

1. Колебания якоря электровозбудителя, отсоединенного от каретки с лентой. На рис. 3 показан общий вид измерений колебаний якоря вибровозбудителя № 2 лазерным датчиком ILD1320-10 при отсоединенной левой каретке.

При возбуждении синусоидальным сигналом якорь электровозбудителя совершает колебания, временной сигнал которых представлен на рис. 4. Здесь явно просматривается наличие среза (симметричного) вершины синусоиды.

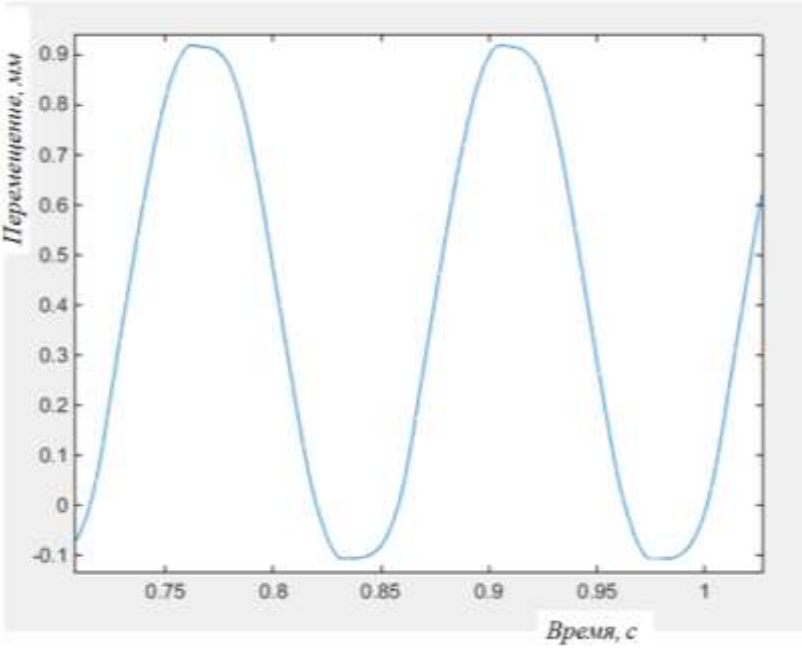


Рис. 2. Характерное поведение шарика № 5 при возбуждении правой каретки на частоте собственных колебаний в направлении оси Y.



Рис. 3. Общий вид измерений колебаний якоря электровозбудителя.

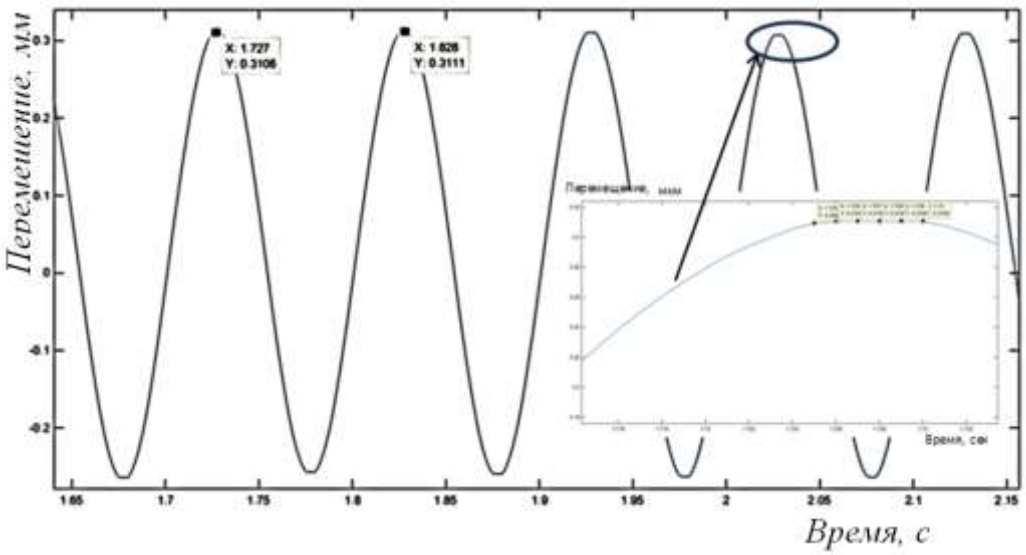


Рис. 4. Временной сигнал перемещения якоря вибровозбудителя при синусоидальном сигнале с генератора $f_в$= 10 Гц

2. Свободные колебания «кусочка» ленты, консольно зажатого, с одной стороны, в тисках.
Аналогичная картина «среза вершины синусоиды» наблюдается при свободных колебаниях кусочка бериллиевой ленты, закрепленной с одного конца в слесарных тисках (рис. 5)

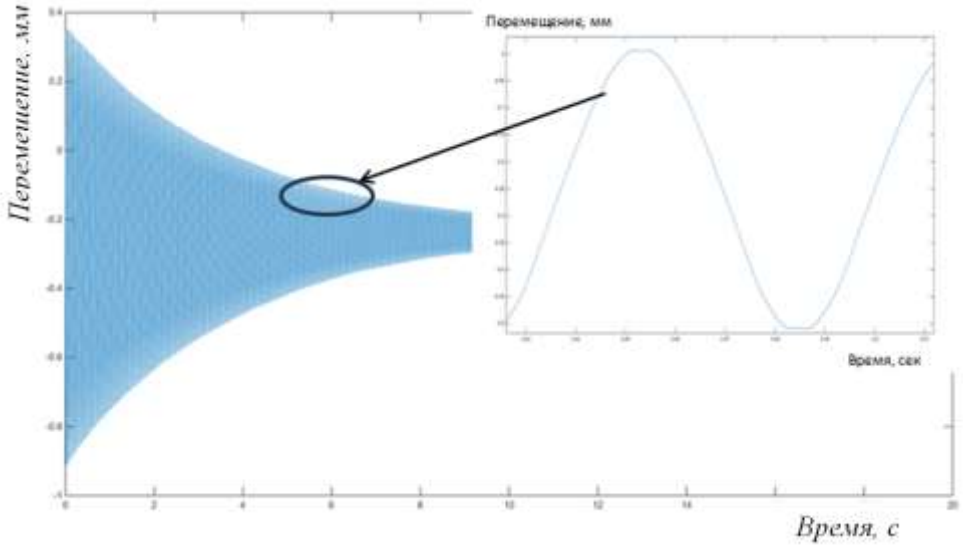


Рис. 5. Свободные колебания «точки» на кусочке бериллиевой ленты, закрепленной с одного конца

3. Колебания стальной ленты, в качестве которой использована «измерительная линейка» – «метр», закрепленная с концов на каретках. На рис .6 представлен общий вид стенда «Аллигатор 2М» с линейкой, закрепленной с двух концов в каретках.



Рис. 6. Общий вид стенда «Аллигатор 2М» с линейкой, закрепленной с двух концов в каретках

На рис. 7 представлены свободные колебания «точки» на линейке, закрепленной с двух концов в крайних упорах № 1 и № 10.
Четко видна «полка» при реверсе.
Аналогичная картина наблюдается при возбуждении полосы с одного конца на частоте16,6 Гц, близкой к собственной. На рис. 8 представлены вынужденные колебания «точки» на линейке при гармоническом возбуждении одной из кареток на частоте, близкой к первой собственной (f = 16 Гц).

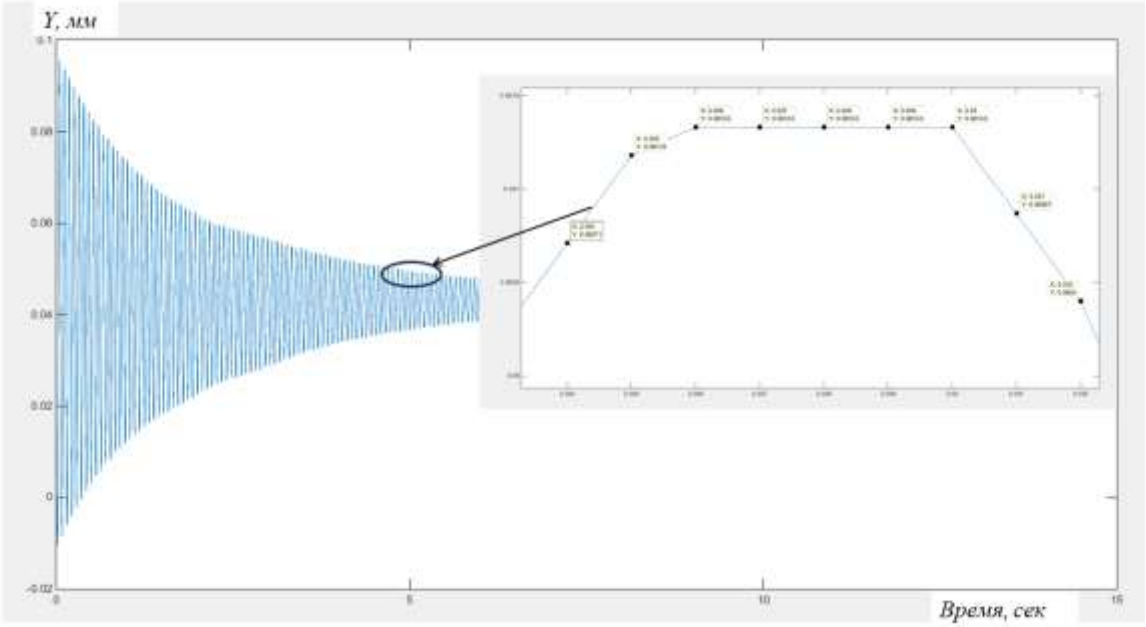


Рис. 7. Свободные колебания точки на ленте (линейке), закрепленной с двух концов в крайних упорах № 1 и № 10.

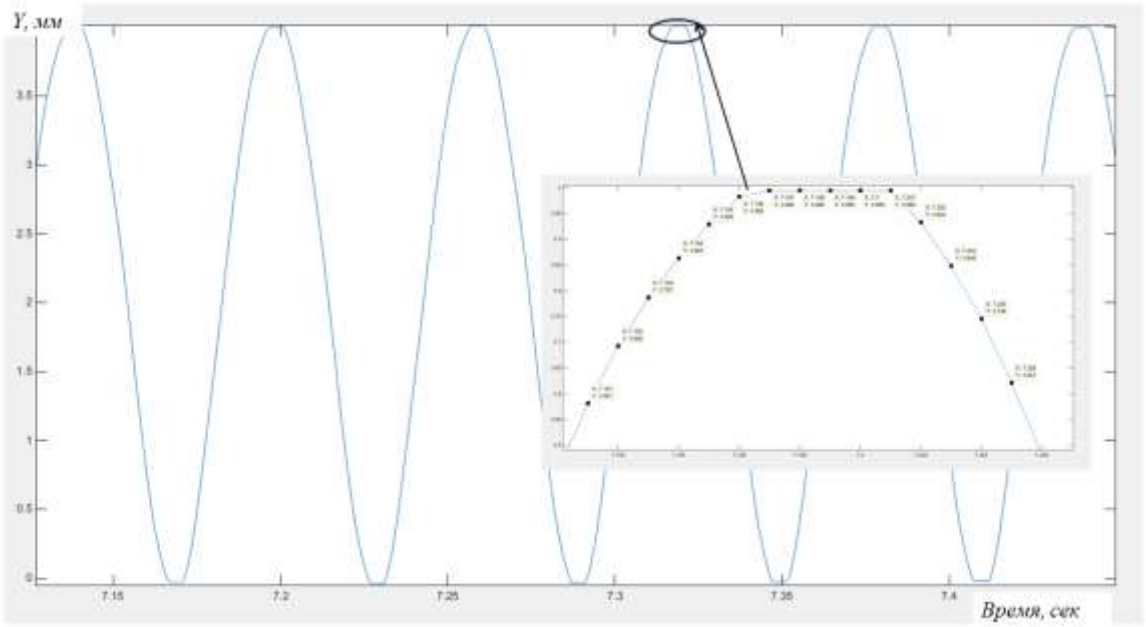


Рис. 8. Вынужденные колебания «точки» на линейке на частоте близкой к собственной f = 16 Гц.

На рис. 9 показан сигнал с генератора, который подается на электровозбудитель, и на котором отсутствует срез «вершины синусоиды».

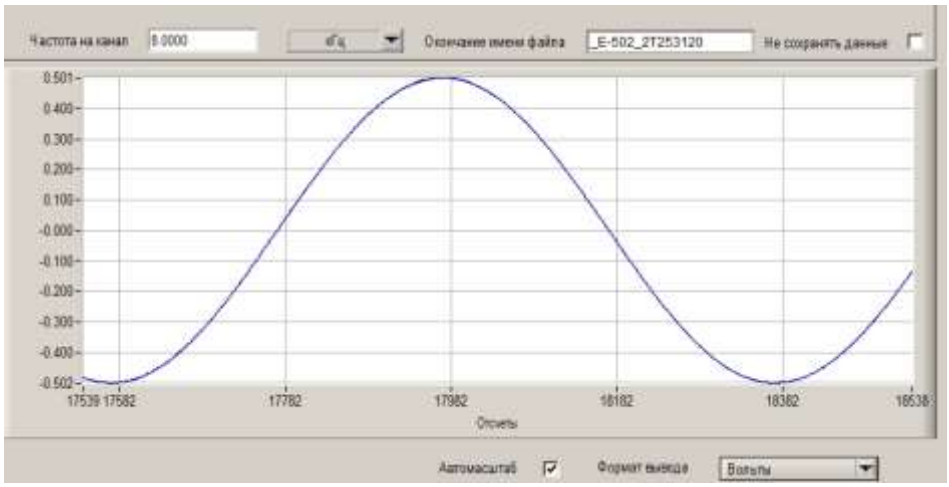


Рис. 9. Сигнал с генератора, подаваемый на электровозбудитель.

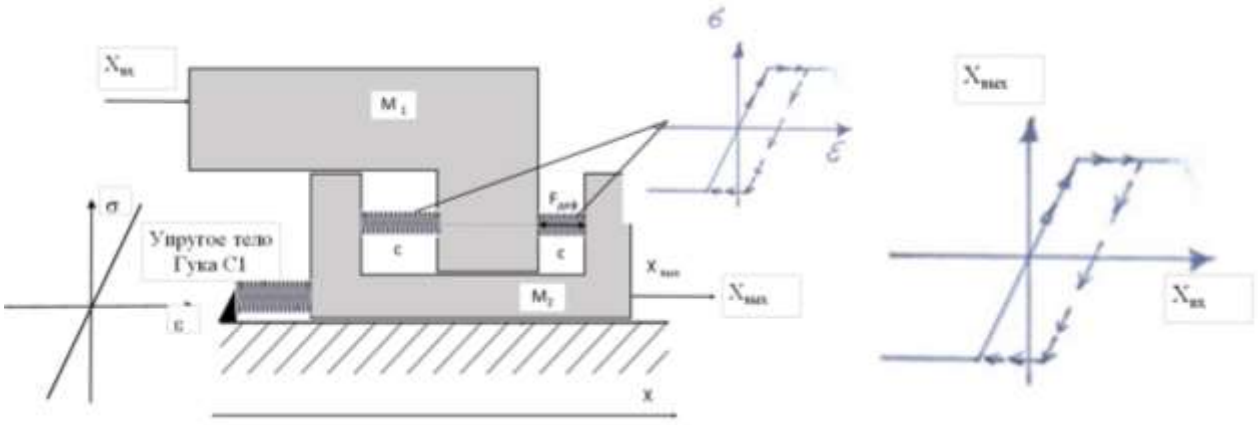
Вывод: по результатам проведенных экспериментов просматривается общность в искажении воспроизведения заданной траектории (синусоиды) движения «точки»: на упругой ленте, «точки» на шарике, жестко закрепленном на упругой ленте, и «точки» на упругой полосе (линейке).

Моделирование влияния внутреннего трения в материале ленты на траекторию движения «точки» (пятна) на упругой ленте. В работах [13-16] отмечается, что изучению колебаний упругого тела при наличии внутреннего трения посвящено множество работ. Подавляющее большинство из них направлено на изучение влияния внутреннего трения (сил внутреннего неупругого сопротивления в материале) на рассеивание энергии внутри самой колебательной системы. Однако, как мы видим, круг задач расширяется и требуется исследовать влияние внутреннего трения на траекторию движения упругого тела или его части [11]. Для решения такого вида задач можно использовать известные реологические модели материала [16] и законы изменения сил внутреннего трения в процессе циклического деформирования, которые в обобщенном виде представляются в форме гистерезисных петель [13].

На рис. 10, а) представлена модель квазистатического деформирования пружины с внутренним трением, описываемым гипотезой упругого гистерезиса с петлей, соответствующей режиму «насыщения» (диаграмма Прандтля, идеальное упругопластическое тело) рис. 10, б).

На рис. 11 представлены исходные данные, необходимые для проведения моделирования процесса квазистатического деформирования пружины с внутренним трением (режим насыщения). На вход системы подается синусоидальный входной сигнал $X_{вх} = sin\ (\omega t)$ и требуется определить выходной сигнал $X_{вых}$. Жесткости пружин равны между собой $C1=c$.

Следует отметить, что при режиме квазистатического деформирования силы инерции не учитываются (кинематическое представление).



а) б)

Рис. 10. Модель квазистатического деформирования пружины с внутренним трением, описываемым гипотезой упругого гистерезиса: а) – механическая модель С1=с, б) петля упругого гистерезиса

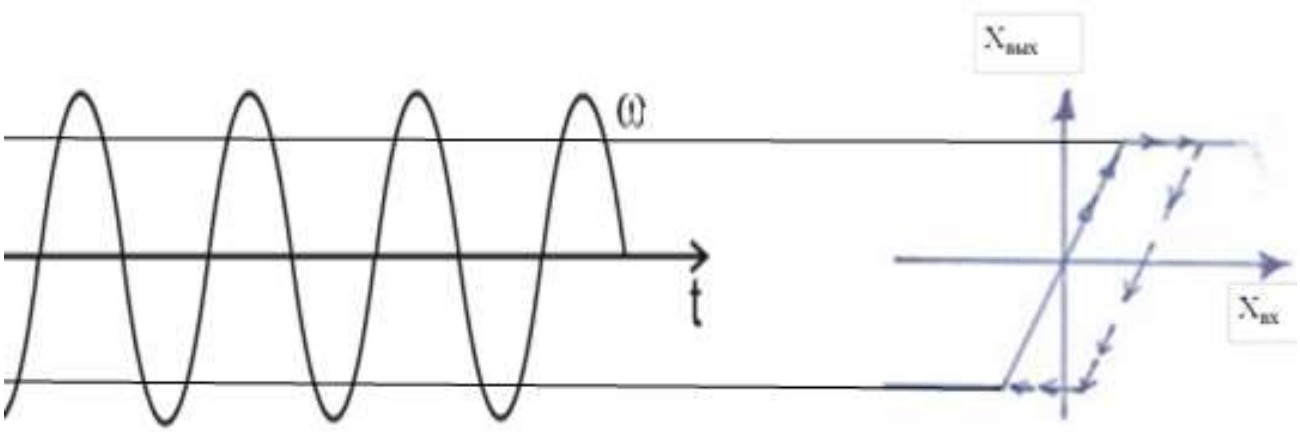
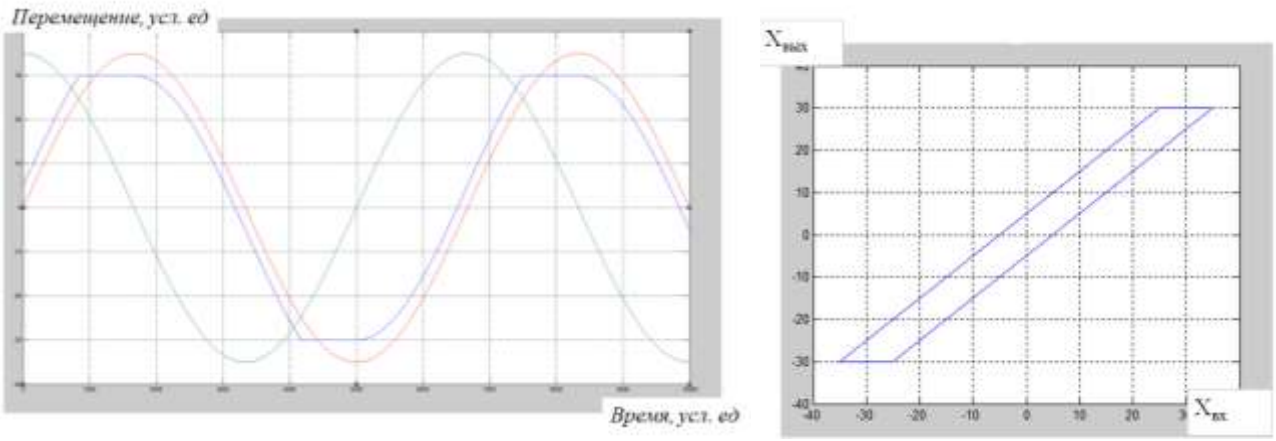


Рис. 11. Исходные данные, необходимые для проведения моделирования процесса квазистатического деформирования пружины с внутренним трением (режим насыщения).

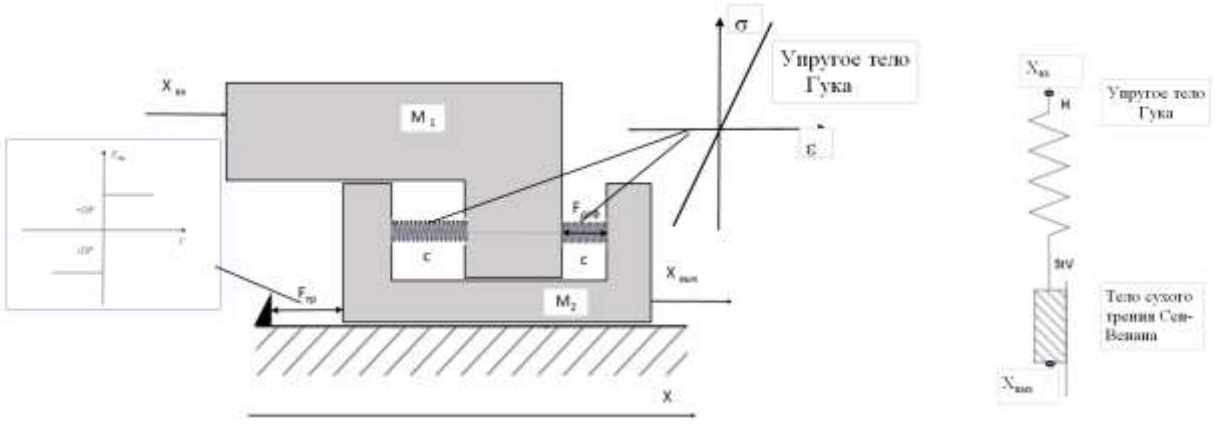
На рис. 12 представлены результаты моделирования (моделирование удобно проводить в среде матлаб).

Ниже для сравнения показаны результаты моделирования процесса квазистатического деформирования пружины для аналогичной механической системы с упругим зазором (рис. 13, а), соответствующей реологической модели (рис. 13, б).



а) *б)*

Рис. 12. Результаты моделирования: а) синяя кривая - $X_{вых}$; красная кривая – $X_{вх}$ (синусоида); зеленая кривая – сигнал скорости входного сигнала; б) петля гистерезиса

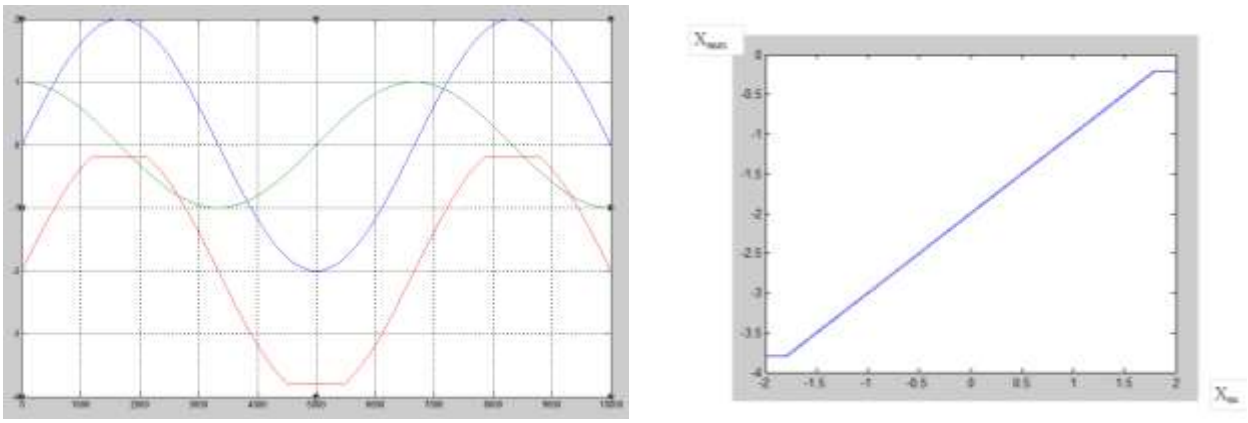


а) *б)*

Рис. 13. Модель квазистатического деформирования пружины (упругое тело Гука), последовательно соединенное с телом сухого трения: а) – механическая модель, б) реологическая модель

На рис. 14 представлены результаты моделирования механической системы с упругим зазором.

Представленные результаты моделирования поведения механической системы с упругим зазором существенно отличаются от поведения механической системы деформирования пружины с внутренним трением, описываемым гипотезой упругого гистерезиса с петлей, соответствующей режиму «насыщения» (диаграмма Прандтля) или от поведения механической системы с кинематическим (геометрическим) зазором [17]. Этот вывод важен для выработки алгоритма коррекции траектории движения в многокоординатном технологическом оборудовании с ЧПУ [18].



а) б)

Рис. 14. Результаты моделирования: а) синяя кривая - Хвх(синусоида); красная кривая – Хвых; зеленая кривая – сигнал скорости входного сигнала; б) «петля гистерезиса» - гистерезис отсутствует, наблюдается нелинейность

Выводы.

1. Проведенные экспериментальные исследования на стенде «Аллигатор 2М» позволили выявить общность в искажении воспроизведения заданной траектории (синусоиды) движения «точки» на упругой ленте, «точки» на шарике, жестко закрепленном на упругой ленте, и «точки» на упругой полосе (линейке).
2. Разработана методика моделирования влияния внутреннего трения в материале ленты на траекторию движения «точки» (пятна) на упругой ленте с использованием известных реологических моделей материала и законов изменения сил внутреннего трения в процессе циклического деформирования в среде MATLAB.
3. Результаты моделирования конкретных механических систем являются основой для выработки алгоритмов коррекции управления многокоординатным технологическим оборудованием с системами ЧПУ и ЧПКУ.
4. Кривая искажения воспроизведения заданной траектории (синусоиды) может служить индикатором для диагностики точности работы несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ.

Список литературы

1. Matsubara A., Fujita T., Kono D., Tanaka N. & Watanabe Y. Nano-positioning Drive with Piezoelectric Actuator Integrated into Support Bearing Unit of Ball Screw / Proceedings of the 35th International MATADOR Conference. – P. 323–326.
2. Otsuka J., Ichikawa S., Masuda T. and Suzuki K. Development of a small ultraprecision positioning device with 5 nm resolution / Meas. Sci. Technol. - 16 (2005) 2186–2192.
3. Futami S., Furutani A. and Yoshida S. Nanometer position and its micro-dynamics // Nanotechnology. - 1 (1990). - 31-37.
4. Tiana Y., Zhanga D., Shirinzadehb B. Dynamic modelling of a flexure-based mechanism for ultra-precision grinding operation // Precision Engineering. - 35 (2011). - 554–565.

5. Gu G.-Y., Zhu L.-M., Su Ch.-Yi, Ding H., and Fatikow S. Modeling and Control of Piezo-Actuated Nanopositioning Stages: A Survey / IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING. - VOL. 13, NO. 1, JANUARY 2016. – P. 313-332.
6. Kim J.-D. and Nam S.-R. AN IMPROVEMENT OF POSITIONING ACCURACY BY USE OF PIEZOELECTRIC VOLTAGE IN PIEZOELECTRIC DRIVEN MICROPOSITIONING SYSTEM SIMULATION / Mech. Mach. Theory. – 1995. -Vol. 30, No. 6. - P. 819-827.
7. Zhanga D., Chetwyndb D.G., Liub X., Tiana Y. Investigation of a 3-DOF micro-positioning table for surface grinding // International Journal of Mechanical Sciences. - 48 (2006). - 1401–1408.
8. Lia Z., Satoa R., Shirasea K., Iharab Y., Milutinovicc Dragan S. Sensitivity analysis of relationship between error motions and machined shape errors in five-axis machining center - Peripheral milling using square end mill as test case - // Precision Engineering. - 60 (2019). – P. 28–41.
9. Zucca S., Firrone C. M. Nonlinear dynamics of mechanical systems with friction contacts: Coupled static and dynamic Multi-Harmonic Balance Method and multiple solutions // Journal of Sound and Vibration. - 333 (2014). – P. 916–926.
10. S. Guo et al. Preparation, characterization and investigation of molecular films coated on diamond-like carbon substrate // Precision Engineering. - 65 (2020). – P. 44–52.
11. Zhu Y., Qiu B., Li W. Trajectory optimization method based on ellipse model for dynamic motion control of piezoelectric transducer in an optical resonance cavity // Precision Engineering. - 85 (2024). - P. 154–165.
12. Асташев В.К., Серков Н.А. и Пась О.В. Тестирование экспериментального стенда «АЛЛИГАТОР 2М» и определение собственных частот упругой ленты с шариками, закреплённой на концах // Вестник научно-технического развития. - 2020. - № 9(157). - С.3-17. [Электронный ресурс] URL: http:// www.vntr.ru (дата обращения: 28.07.2023).
13. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. - М.: Физматгиз, 1960. – 193 с.
14. Кочнева Л.Ф. Внутреннее трение в твердых телах при колебаниях. - М.: Наука, 1979. - 96 с.
15. Гоздек В.С. О модели материала с внутренним трением // Ученые записки ЦАГИ. - 1982. – Том XIII, №2. – С.142-146.
16. Пальмов В.А. Колебания упругопластических тел. – М: Наука, 1976. – 328 с.
17. Серков Н.А. и Пась О.В. Исследование процессов коррекции отклонения траектории движения исполнительного органа многокоординатной машины с ЧПУ при наличии кинематического зазора в среде Matlab – Simulink//Вестник научно-технического развития. - 2023. - № 3. - С. 42-50. [Электронный ресурс] URL: http:// www.vntr.ru
18. Пась О.В. и Серков Н.А. Анализ точности фрезерования остаточного полотна с вафельным фоном и синтез алгоритма коррекции на станках типа "СВО" // Вестник НПО «Техномаш». – 2023. - Выпуск № 2(23). - С. 45-53.

Дата поступления: 28 февраля 2024 г.