DOI: 10.18411/vntr2023-170-3

УДК 621.9.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРЕКЦИИ ОТКЛОНЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ С ЧПУ ПРИ НАЛИЧИИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ЗАЗОРА В СРЕДЕ MATLAB – SIMULINK

© 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. *Приведены результаты исследование процессов коррекции отклонения траектории движения исполнительного органа многокоординатной машины с ЧПУ при наличии кинематического зазора в среде Matlab – Simulink. Исследованы два метода коррекции: 1 - коррекция по возмущению и 2 – коррекция методом самонастройки.*
Ключевые слова: *кинематический зазор, отклонение от заданной траектории, коррекция по возмущению, коррекция методом самонастройки, Matlab – Simulink.*

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.

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF CORRECTION OF THE DEVIATION OF THE TRAJECTORY OF THE EXECUTIVE BODY OF A MULTI–AXIS CNC MACHINE IN THE PRESENCE OF A KINEMATIC GAP IN THE MATLAB - SIMULINK ENVIRONMENT

© 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 results of the study of the processes of correcting the deviation of the trajectory of the executive body of a multi–axis CNC machine in the presence of a kinematic gap in the Matlab - Simulink environment are presented. Two correction methods are investigated: 1 - correction by perturbation and 2 – correction by self-adjustment.*
Keywords: *kinematic gap, deviation from a given trajectory, perturbation correction, self–adjustment correction, Matlab - Simulink.*

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 совершенствованием технологического оборудования, а именно, с повышением быстродействия и точности выполняемых на нем операций. В связи с этим постоянно возрастают требования к повышению точности движения исполнительных органов технологического оборудования с ЧПУ.

Среди многочисленных факторов, вызывающих искажения заданной траектории движения рабочих органов многокоординатного станка с ЧПУ, следует особенно выделить динамические факторы, проявляющиеся в процессе движения одних деталей и узлов относительно других. К таким факторам, в первую очередь, относятся: зазоры в подвижных соединениях, силы трения, силы инерции, силы рабочих процессов и деформации.

Вредное влияние указанных факторов на точность воспроизведения пространственной траектории рабочих органов пытаются уменьшить совершенствованием конструкции и методами цифровой коррекции через систему ЧПУ.

В качестве удачных решений совершенствования конструкции многоцелевых станков с ЧПУ можно отметить [1]:

1) переход от конструкций с зазорами к конструкциям с натягом (направляющие качения, ШВП),

2) уменьшение количества звеньев в приводах – переход к приводам «прямого» действия (direct drive) с современными датчиками обратной связи,

3) применение механизмов с параллельной кинематикой,

4) применение встроенных в системы ЧПУ высокоскоростных компьютеров и др.

Конструктивными методами удаётся существенно уменьшить вредное влияние зазоров, сил трения и гистерезиса в деформируемых элементах несущей системы на точность воспроизведения заданной траектории, но, только, до определенного предела. Вредное влияние указанных факторов особенно сильно начинает сказываться в работе прецизионных машин с допусками на точность воспроизведения траектории в пределах 0,1 – 10 мкм [2-5].

В работах [6,8] рассмотрено влияние «геометрического» (кинематического) зазора на точность воспроизводства траектории на многокоординатных машинах с ЧПУ. На рис. 1 представлена модель механизма перемещения массы М2 под действием массы М1 при наличии зазора [6], а на рис. 2 показано, как трансформируется в квазистатическом режиме перемещение X1 = sin (ωt) массы М1 (входной сигнал) в перемещение М2 (выходной сигнал) при наличии зазора. Здесь: Синяя кривая – входной сигнал без коррекции (б.к.), красная кривая – выходной сигнал без коррекции (б.к.), жёлтая кривая – входной сигнал с коррекцией (с к.), зелёный сигнал – выходной с коррекцией (с к.).

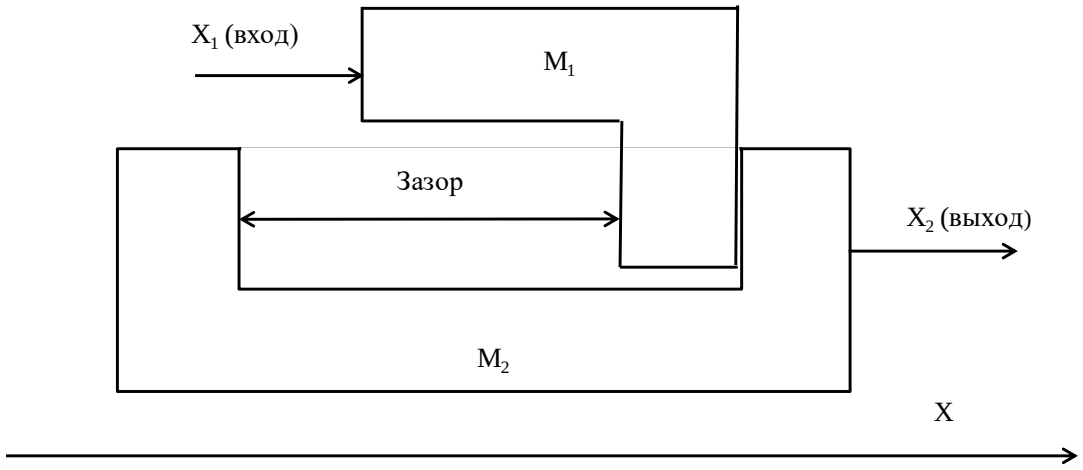


Рис. 1. Модель «геометрического» (кинематического) зазора в механической системе.

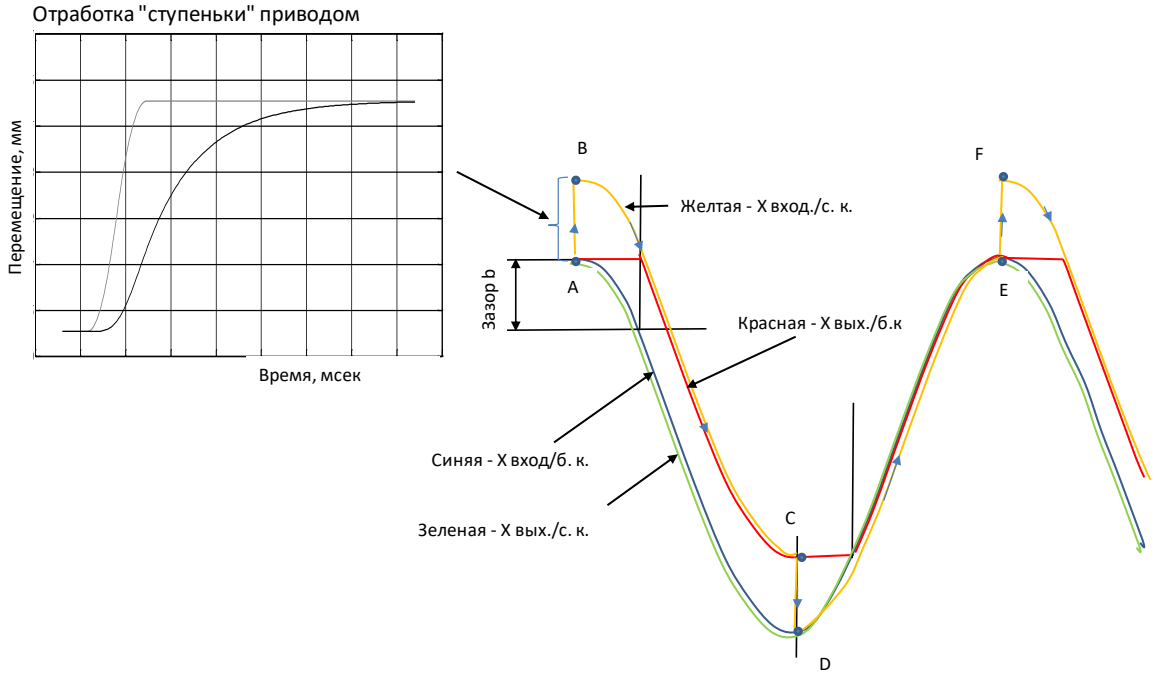
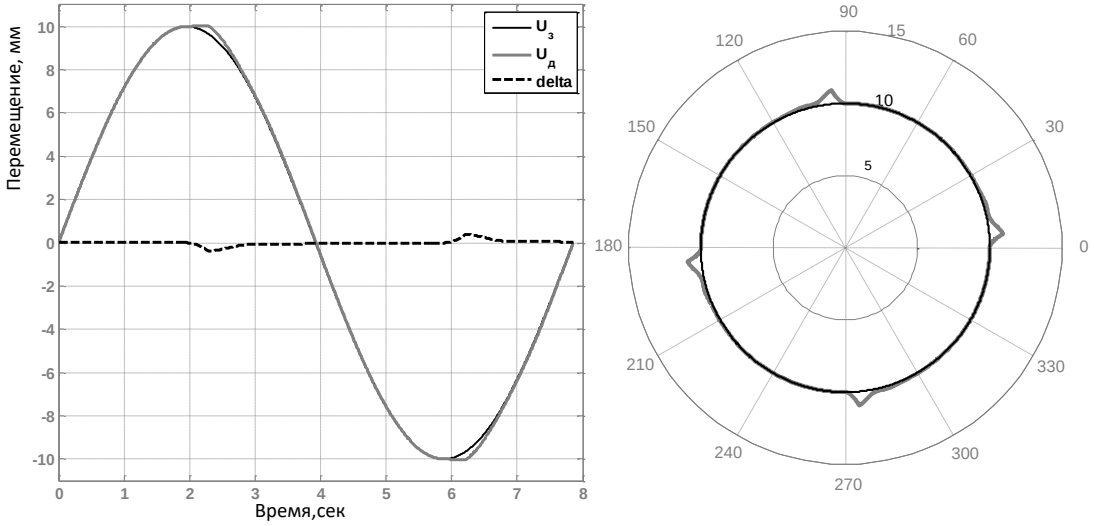


Рис. 2. Влияние зазора на «отработку» входного перемещения $X_1 = \sin(\omega t)$ в квазистатическом режиме.

Поведение системы с зазором, охваченным обратной связью рассмотрено в работе [6]. При отработке зазора наблюдается характерный всплеск, показанный на рис. 3.

Здесь: Радиус эталонной окружности – 10 мм, зазор – 0,4 мм, обход против часовой стрелки. Для построения указанных отклонений в полярной системе координат используются блоки U_zad и U_delta передачи данных из Simulink в Matlab.



а) б)

Рис. 3: а) Отклонения при воспроизведения эталонного движения - синусоиды (амплитуда – время) при наличии зазора в механической части, охваченной обратной связью. б) Отклонения от воспроизведения эталонной окружности в полярной системе координат.

На рис. 4 представлена схема прохождения сигнала задания движения по одной управляемой координате в типовой схеме станка с ЧПУ в случае, когда в НС станка имеется зазор (погрешность обратного хода), не охваченный обратной связью следящего привода.



Рис. 4. Схема «прохождения сигнала» в станке с ЧПУ с зазором в НС, не охваченном обратной связью.

Прохождение сигнала в системе по рис. 4 можно исследовать с помощью модели в среде Matlab - Simulink, представленной на рис. 5. На графиках по оси абсциссы отложено время, сек, а по оси ординаты – перемещение в условных единицах, задаваемых в блоках: Sine Wave, Backlash.

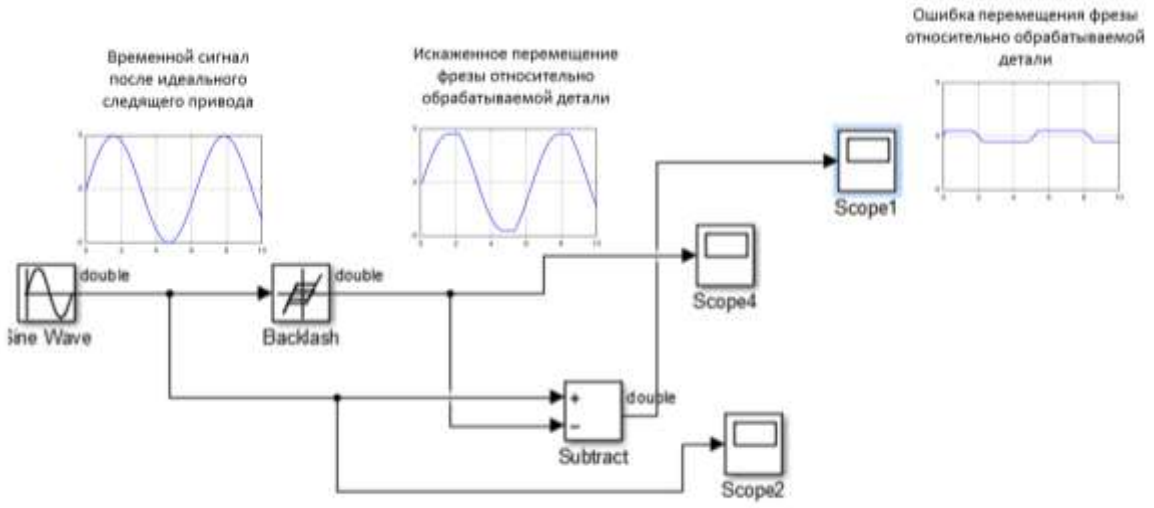


Рис. 5. Модель «прохождения сигнала» в станке с ЧПУ с зазором в НС, не охваченном обратной связью (среда матлаб (Simulink)).

Кинематический (геометрический) зазор моделируется блоком blacklash.
Ошибка перемещения фрезы относительно обрабатываемой детали, вызванная зазором в НС станка, неохваченным следящей системой привода, может быть устранена следующими способами:

1. Конструкторскими и технологическими приёмами (в настоящей работе не рассматривается).

2. Изменением сигнала на входе следящего привода «коррекцией по возмущению» с использованием априорной информации о величине зазора и направлении скорости движения):

2.1. Предыскажением сигнала на входе следящего привода в системе ЧПУ (коррекция с помощью команды «коррекция зазора»).

2.2. Предыскажение управляющей программы.

3. Коррекцией методом самонастройки: измерение ошибки движения на выходе системы и коррекция управляющей программы [7].

Ниже последовательно рассмотрены способы: 2.2 и 3.

«Коррекция по возмущению» (априорная информация о величине зазора и направлении скорости движения) (коррекция на входе следящего привода)

На рис. 6 показано прохождение сигнала в модели Matlab – Simulink, реализующей схему по рис. 2 и рис. 4 при запаздывании откорректированного сигнала на величину 0 сек. (Transport Delay) (имитация отработки «ступеньки» приводом).

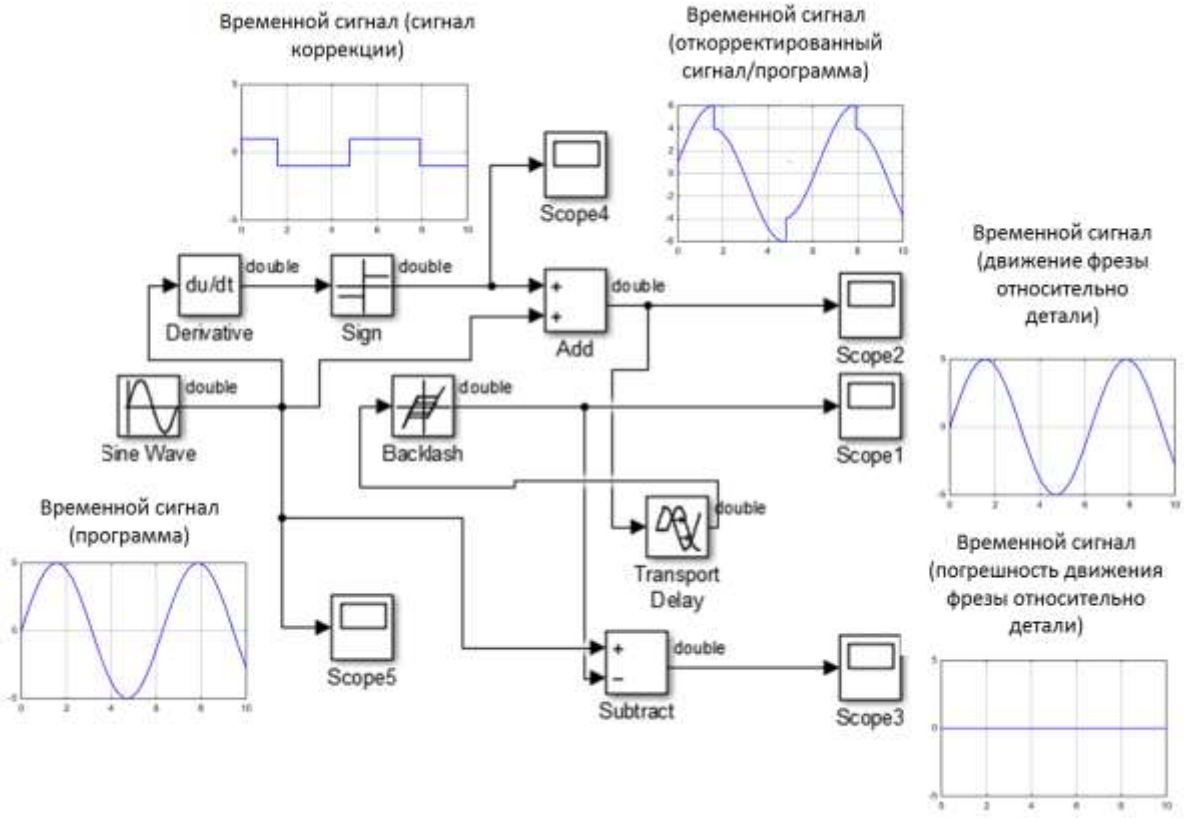


Рис. 6. Модель Simulink для исследования влияния неточности отработки корректирующего сигнала при коррекции зазора по возмущению.

Результаты моделирования показывают, что при запаздывании откорректированного сигнала на величину 0 сек погрешность движения фрезы относительно детали «нулевая». При запаздывании на величину Transport Delay 0,3 сек погрешность движения фрезы существенно возрастает (рис. 7).

На рис. 7 показано прохождение сигнала в модели при запаздывании откорректированного сигнала на величину 0,3 сек.

Следует отметить, что способ коррекции по возмущению зазора, не охваченного обратной связью, имеет как достоинства, так и недостатки.

Достоинство:

1) **Простота реализации,**
2) Эффект коррекции с «первого раза».

Недостатки:

1) В сигнале коррекции всегда есть «ступенька», равная зазору,

2) Высокая чувствительность к быстродействию привода, отрабатывающего откорректированный сигнал.

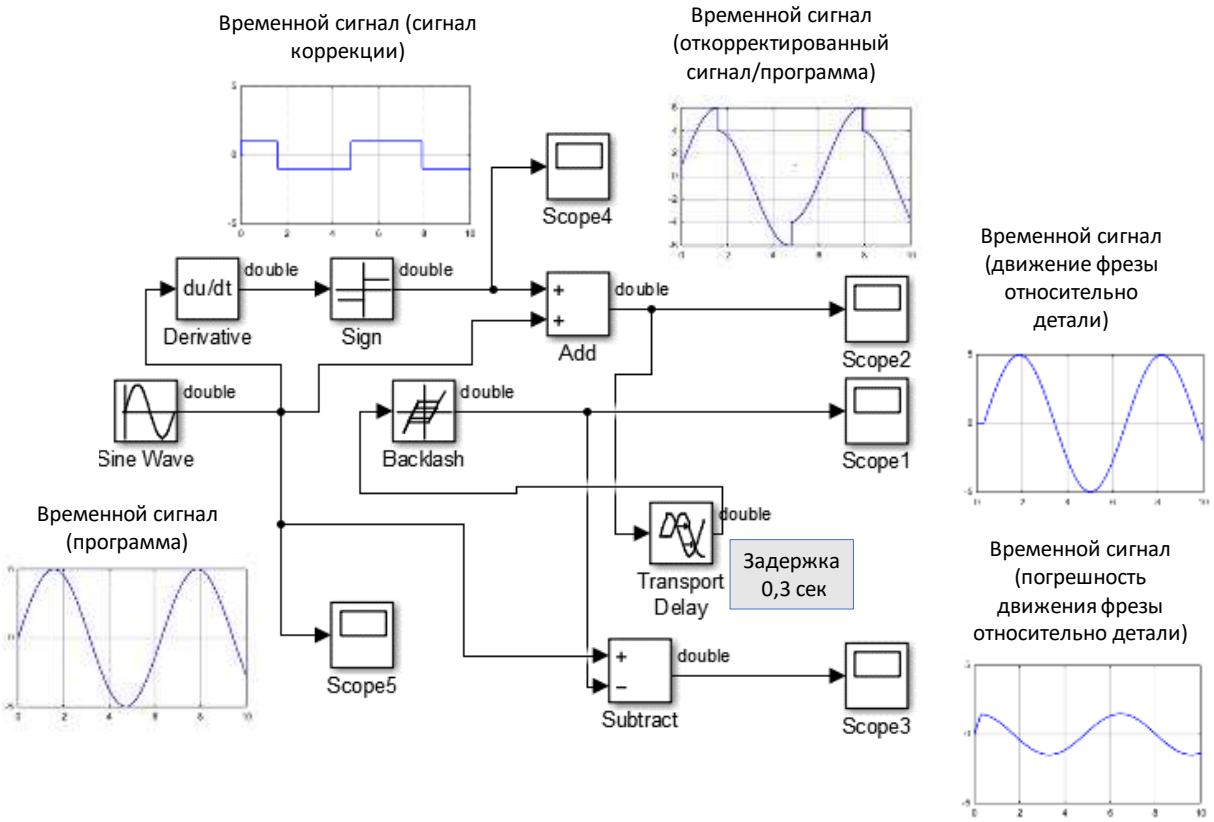


Рис. 7. Модель Simulink процесса коррекции зазора при Transport Delay 0,3 сек.

Влияние указанных недостатков можно уменьшить применением дополнительных отдельных приводов коррекции с высоким быстродействием и точностью, но это требует дополнительных затрат.

Таким образом, при «идеальном» приводе на выходе получается «идеальная» траектория. В действительности привод отрабатывает сигнал коррекции с запаздыванием в соответствии с ФЧХ привода и, в результате, при отработке траектории, в частности окружности, в точках реверса наблюдаются всплески отклонений от контура. Однако, при выполнении операции позиционирования по одной координате сигнал коррекции отрабатывается «идеально» (рис. 6)

Коррекция методом самонастройки

На рис. 8 представлена схема прохождения сигнала в станке с ЧПУ с использованием метода самонастройки по одной управляемой координате в случае, когда имеется в НС станка зазор (погрешность обратного хода), не охваченный обратной связью следящего привода.

На рис. 9 показаны результаты проведения самонастройки при одноразовой коррекции.

На рис. 10 показана модель в среде Matlab – Simulink, позволяющая моделировать процесс самонастройки при двукратной коррекции

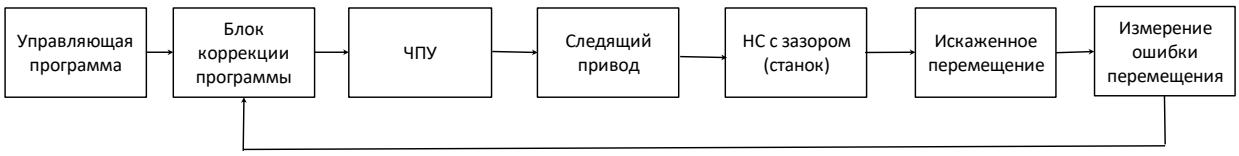


Рис. 8. Схема прохождения сигнала в станке с ЧПУ с использованием метода самонастройки.

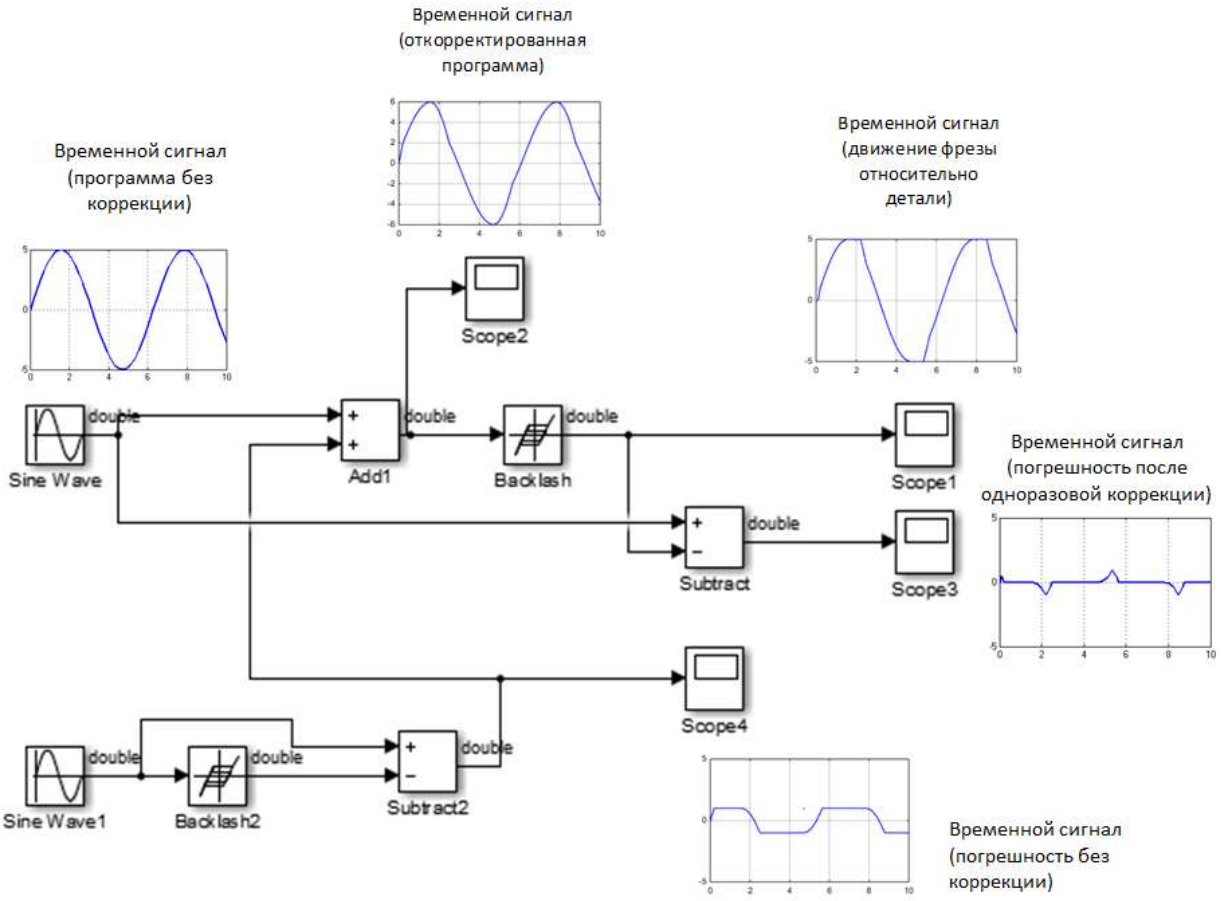


Рис. 9. Модель процесса самонастройки при одноразовой коррекции.

На рис. 11 представлены результаты моделирования процесса самонастройки в среде Matlab – Simulink. На графиках по оси абсциссы отложено время, сек, а по оси ординаты – перемещение в условных единицах, задаваемых в блоке Backlash.

В работе [9] показано, что при большом числе воспроизведений (коррекций) управляющей программы динамическая ошибка стремится к нулю.

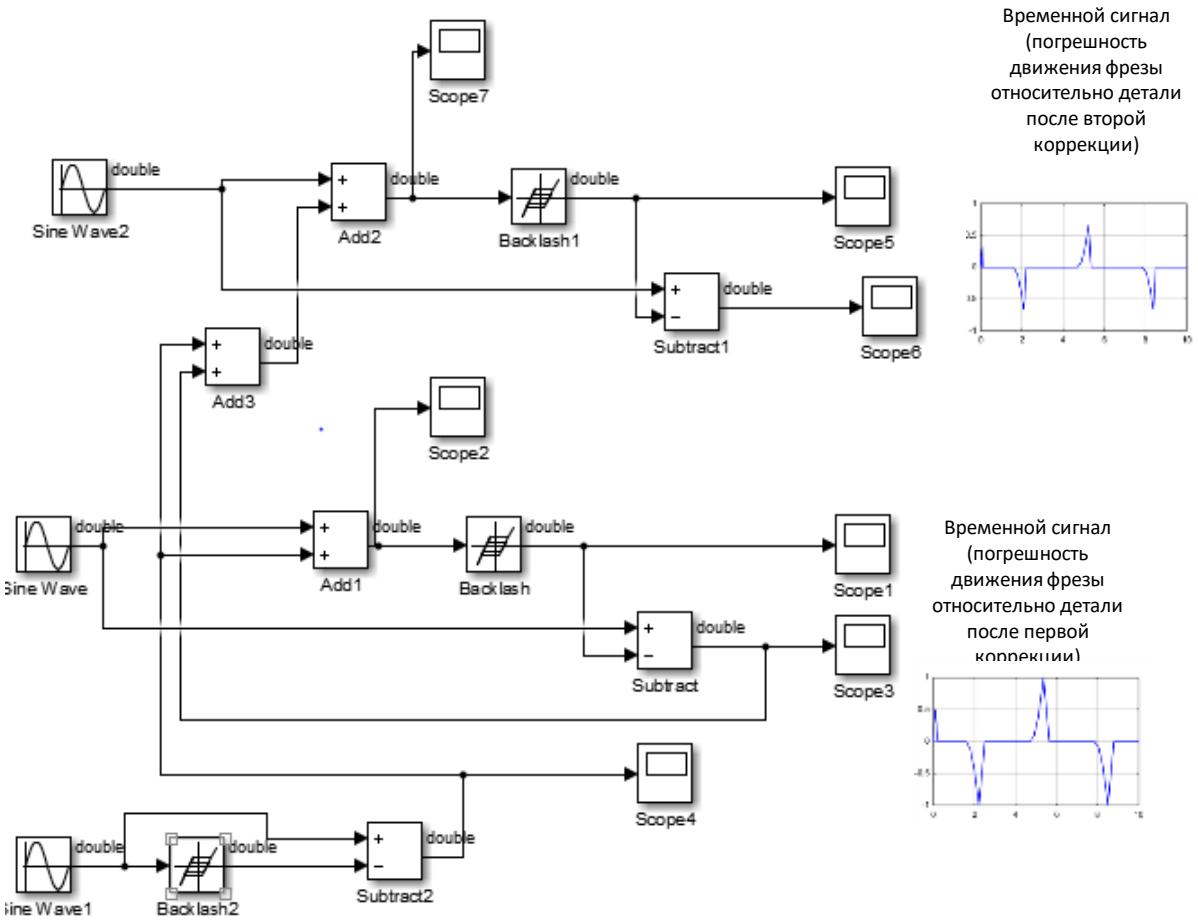
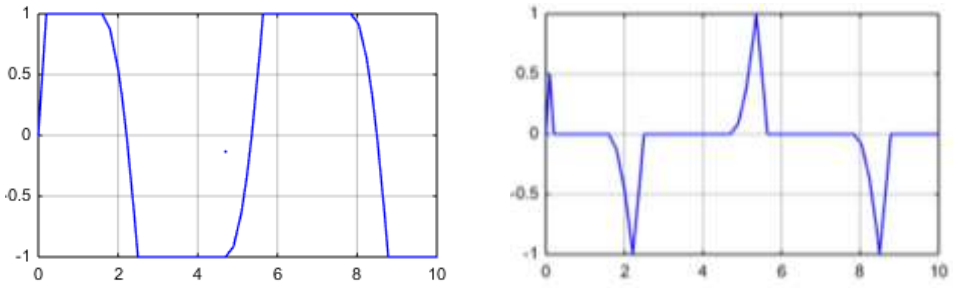
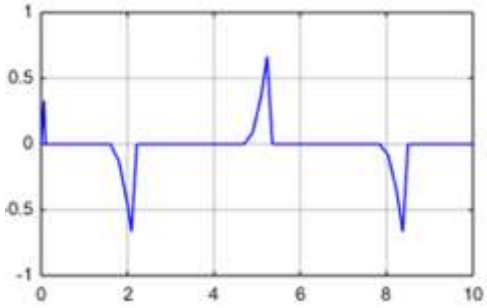


Рис. 10. Модель Simulink процесса самонастройки при двукратной коррекции



а) без коррекции, *б) после первой коррекции*



в) после второй коррекции

Рис. 11. Результаты моделирования процесса самонастройки в среде матлаб – Simulink (временной сигнал погрешности движения фрезы) при двукратной коррекции.

Заключение. Проведенные исследования по моделированию процессов коррекции погрешности воспроизведения (отработки) траектории движения рабочего органа многокоординатной машины с ЧПУ методом моделирования в среде Matlab - Simulink показали:

1. Среда Matlab - Simulink является эффективным средством моделирования процесса коррекции погрешности воспроизведения траектории движения рабочего органа многоцелевого станка с ЧПУ.
2. Коррекция по возмущению приводит к полному устранению погрешности воспроизведения траектории, вызванной геометрическим (кинематическим) зазором, при априорном знании о величине зазора и «идеальном» приводе, отрабатывающем коррекцию.
3. Коррекция, осуществляемая по принципу самонастройки, устраняет погрешности воспроизведения траектории, вызванные как геометрическим (кинематическим) зазором, так и другими вредными факторами (это преимущество метода самонастройки). Однако, для удовлетворительного устранения погрешности воспроизведения траектории требуется сравнительно большое число итераций (коррекций) (3-5) и при этом возрастает случайная составляющая погрешности из-за многократных измерений отклонений.
4. Необходимо продолжить исследования по моделированию процессов коррекции погрешности воспроизведения (отработки) траектории движения, вызванной «упругим» зазором, образующимся за счет действия внутреннего трения и наличия упругости в конструкционных материалах, используемых в НС прецизионного технологического оборудования.

Список литературы

1. Серков Н.А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. - М.: ЛЕНАНД, 2015. - 304 с.
2. Gu G. Y., Zhu L. M, Su Ch. Y., Ding H., and Fatikow S., Modeling and control of piezo-actuated nano positioning stages: A survey / IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, VOL. 13, NO. 1, JANUARY 2016 P. 313-332.
3. Kim J. D. and SOO-RYONG NAMAN S. R. IMPROVEMENT OF POSITIONING ACCURACY BY USE OF PIEZOELECTRIC VOLTAGE IN PIEZOELECTRIC DRIVEN MICROPOSITIONING SYSTEM SIMULATION / Mech. Mach. Theory Vol. 30, No. 6, P. 819-827, 1995.
4. 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). P.1401–1408.
5. Tian Y., Zhang D., Shirinzadeh B. Dynamic modelling of a flexure-based mechanism for ultra-precision grinding operation / Precision Engineering. Vol. 35. Issue 4, October 2011, P. 554-565.
6. Серков Н.А., Пась О.В. Влияние зазора в приводах на точность воспроизведения траектории в многокоординатной машине с ЧПУ// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2015. - № 5. - С.3-10.
7. Кобринский А.Е. Числа управляют станком. 2-е доп. изд. - М.: Наука, 1967. - 263 с.
8. Serkov N.A., Pas’ O.V. Influence of the Gap and the Friction on Trajectory Reproduction Accuracy in a Multiaxis Machine with CNC / JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Oct. 2016, Vol. 8. P. 483-488.
9. Андрейчиков Б.И., Методы коррекции динамических ошибок в станках с программным управлением / Автомат. и телемех., 23:9 (1962), С.1165–1178
10. URL: https://www.mathnet.ru/links/ea1c296be45393478c1763f99578721d/at12071.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

Дата поступления: 19 июля 2023 г.