

УДК 621.9.06

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА И ТРЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ В МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИНАХ С ЧПУ

© Олег Викторович Пась, Николай Алексеевич Серков

ИМАШ РАН, Москва, Россия

o.pa88@yandex.ru serkov1943@mail.ru

Аннотация. Прецизионные многокоординатные станки с ЧПУ и промышленные роботы являются основой современного машиностроения. Постоянно повышаются требования к точности воспроизведения траектории движения рабочих органов технологического оборудования с ЧПУ. Одним из основных факторов, влияющих на точность воспроизведения траектории, являются нелинейности, типа зазоры и трение в приводах. Описаны результаты исследования влияния зазоров и трения в механизмах приводов, охваченных и не охваченных обратной связью по положению, на точность воспроизведения траектории методом имитационного моделирования.

Ключевые слова: многокоординатная машина с ЧПУ, имитационная модель, сервопривод, модель зазора, модель трения, тест на эталонной окружности, цифровая коррекция.

INFLUENCE OF THE GAP AND THE FRICTION ON TRAJECTORY REPRODUCTION ACCURACY IN A MULTIAXIS MACHINE WITH CNC

© Oleg Pas' and Nikolay Serkov

IMASH RAN, Moscow, Russia

o.pa88@yandex.ru serkov1943@mail.ru

Abstract. Precision multiaxis machining centers with CNC and industrial robots are the base of modern mechanical engineering. The requirements of reproduction accuracy of the motion trajectory of operative parts of the NCaided manufacturing equipment are constantly increasing. Gaps and a friction in drives are a main factor affecting the accuracy of trajectory reproduction. The results of the investigation into the influence of gaps and a friction in drive mechanisms covered and not covered by position feedback loop on the accuracy of trajectory reproduction by the imitation modeling method are described.

Keywords: Multiaxis machine with CNC, simulation model, servodrive, backlash model, friction model, reference circle test, digital correction.

1. Введение

Развитие машиностроения тесно связано с расширением и ужесточением требований к современным машинам, в частности, повышению быстродействия и точности выполняемых операций. Постоянно возрастают требования к точности движения исполнительных органов технологического оборудования с ЧПУ. Среди многочисленных факторов, действующих на несущую систему многокоординатной машины с ЧПУ и вызывающих дополнительные относительные смещения рабочих органов, следует выделить динамические, проявляющиеся в процессе движения отдельных деталей и узлов. К таким факторам, в первую очередь,

относятся: зазоры в подвижных соединениях, силы трения, инерции и силы, возникающие при выполнении рабочих процессов.

На рис. 1, в качестве примера, представлены отклонения воспроизведения окружности радиусом 100 мм: (а) для станка ФП 27 для приводов с зазором в механической системе, неохваченной обратной связью (1 – «ступенька»), (b) для станка МС 300 для приводов с зазором в механической системе, охваченной обратной связью по положению (2 – «всплеск»).

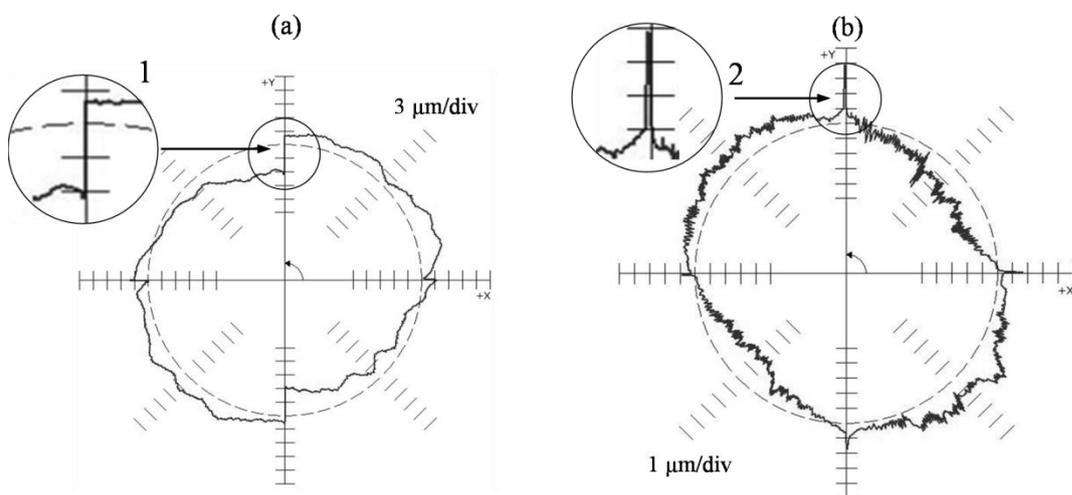


Рис. 1. Отклонения при воспроизведении эталонной окружности: (а) станок ФП 27 ($F = 500$ мм/мин), (b) станок МС 300 ($F = 2000$ мм/мин)

Вопросу устранения вредного влияния зазоров, сил трения и гистерезиса в деформируемых элементах несущей системы машины с ЧПУ методами синтеза систем и алгоритмов управления приводами посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ. Работы [1-3] являются характерными для этого направления исследований. Однако требуются дальнейшие исследования, направленные на поиски новых наиболее эффективных способов устранения вредного влияния зазоров, сил трения и гистерезиса на точность воспроизведения пространственной траектории. Эффективным методом исследования в данном случае является моделирование в среде Matlab (Simulink) и экспериментальные исследования обработки образцов изделий [3-4].

2. Модель привода по линейной координате машины с ЧПУ.

На рис. 2 представлена в качестве примера механическая часть, охваченной ОС, схема привода подачи с использованием шариковой винтовой передачи (ШВП). В работе [4] описана методика создания имитационной модели привода по линейной координате машины с ЧПУ.

На рис. 3 представлена имитационная модель [5] привода при наличии кинематического зазора в механической части, охваченной обратной связью по положению.

3. Влияние зазора на точность воспроизведения траектории

3.1. Зазор в механической системе, неохваченной обратной связью по положению

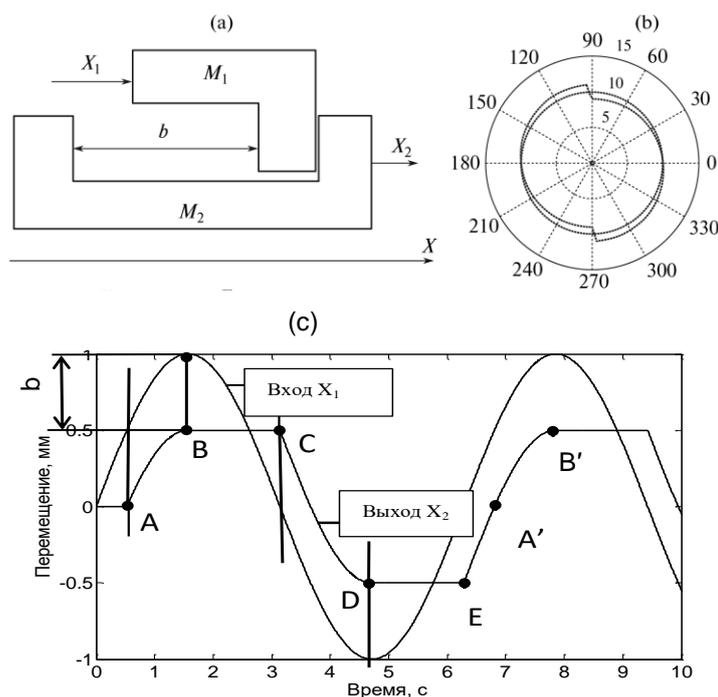


Рис. 4. Зазор в механической системе, неохваченной обратной связью по положению: (а) модель взаимодействия двух тел M_1 и M_2 ; (б) отклонения при воспроизведении эталонной окружности, (с) перемещение тела M_2 в квазистатическом режиме

На рис. 4 (с) показано, как трансформируется перемещение $X = \sin(\omega t)$ (входной сигнал X_1 , перемещение массы M_1 при воспроизведении эталонной окружности) в перемещение M_2 (выходной сигнал X_2) при наличии зазора. Величина зазора равна отрезку b , $\omega = 2\pi/10$.

Если мы рассматриваем воспроизведение синусоидального сигнала $X_1 = \sin(\omega t)$ без зазора и $Y_1 = \sin(\omega t + \pi/2)$ с зазором, мы получим картину отклонений, изображенную на рисунке 4, (с) (получено с помощью моделирования). Здесь входные сигналы X_1 и Y_1 изображены пунктирной линией (эталонная окружность), тогда как выходные сигналы X_2 и Y_2 изображены сплошной линией (фактическая траектория). Рассматриваемый случай соответствует воспроизведению траектории типа «окружность» приводом по координате X без зазора и приводом по координате Y с зазором, неохваченным обратной связью по положению.

3.2. Зазор в механической системе, охваченной обратной связью по положению

Характер влияния зазора на воспроизведение входного сигнала в механической части, охваченной обратной связью по положению, сильно отличается.

Применительно к моделированию несущей системы привода по линейной координате отклонение действительного положения исполнительного органа от заданного показано на рис. 5, (а). На осциллографе «Scope_backlash» высвечиваются следующие кривые: 1 - задающее воздействие по углу поворота двигателя, 2 – показания датчика угла поворота при движении системы с зазором, 3 - сигнал рассогласования (разность между заданным и действительным углом поворота выходного вала – исполнительного органа (ИО)), поступающему на вход регулятора. Как видно из графика, изменение направления движения привода сопровождается характерным «выступом» (кривая 2), когда сигнал с датчика угла поворота показывает

постоянное значение какое-то время. Если рассматривать движение ИО по эталонной окружности, реализуемой двумя линейными приводами расположенными ортогонально относительно друг друга, то отклонения действительной траектории от заданной принимают вид, показанный на рис. 5, (b). Здесь: Радиус эталонной окружности – 10 мм, зазор – 0,4 мм, обход против часовой стрелки, 1 – эталонная окружность, 2 – фактическая траектория. Для построения указанных отклонений в полярной системе координат используются блоки U_zad и U_delta (рис. 3) передачи данных в Simulink.

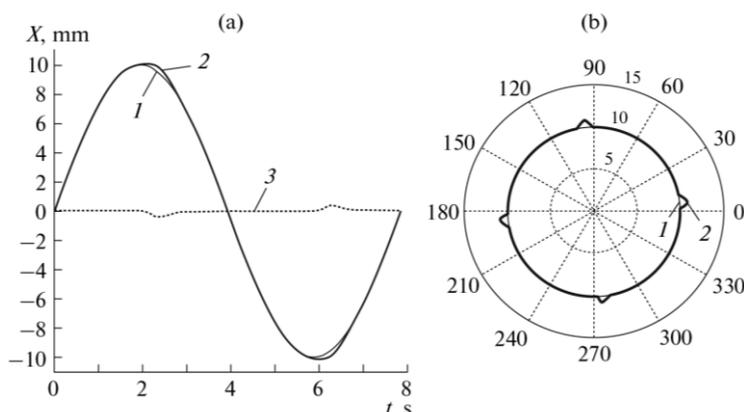


Рис. 5. Отклонения при воспроизведении эталонного движения: (а) отклонения при воспроизведении синусоиды при наличии зазора, охваченного обратной связью по положению; б) отклонения при воспроизведении эталонной окружности

Зазор в механической части привода, принципиально по-разному влияет на точность воспроизведения траектории типа «окружность» в зависимости от того, охвачена или не охвачена механическая часть привода обратной связью по положению.

Величина зазора в механической части, охваченной обратной связью по положению, равна величине «всплеска» в момент реверса при воспроизведении эталонной окружности двумя линейными приводами, расположенными ортогонально относительно друг друга, при отсутствии нелинейностей других типов («трение», «упругий гистерезис» и др.).

4. Влияние трения на точность воспроизведения траектории

4.1. Модель трения

Сухое трение в модели реализовано с помощью одноименного блока, вырабатывающего возмущающий момент M_{fr} в зависимости от фактического значения скорости ω_{act} (рис. 6, (a)). На рис. 6, (б) показана реализация блока «сухое трение» в среде Simulink.

На рис. 7 представлена имитационная модель привода при наличии трения в механической части, охваченной обратной связью по положению. Для повышения точности отработки заданной траектории движения в модели вводится предсказание уставки по скорости.

Суммарное корректирующее воздействие при этом складывается из выходного сигнала блока комбинированного управления (блок FFC на схеме) и блока компенсации сухого трения.

Блок компенсации сухого трения выполняет коррекцию в момент реверса привода для уменьшения ошибки. Форма сигнала коррекции, выдаваемая блоком компенсации сухого трения для данного привода, определяется 2-мя параметрами: амплитудным значением сигнала Δn и постоянной времени T_{comp} , определяющей скорость убывания сигнала.

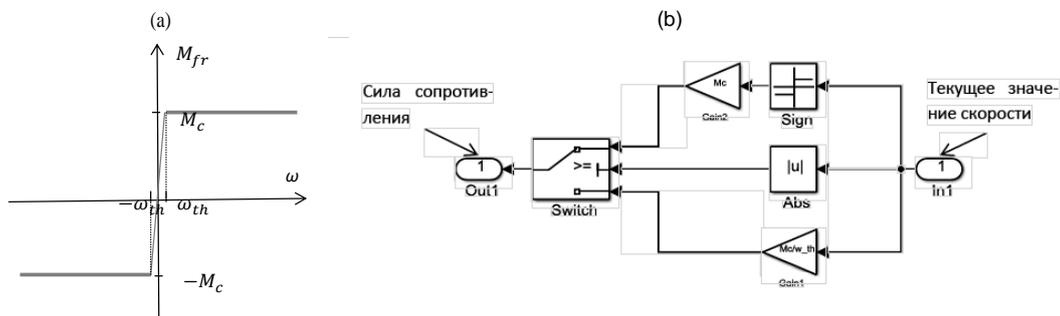


Рис. 6. Реализация сухого трения в модели: (а) зависимость $M(\omega)$, (б) блок «сухое трение», реализованный в среде Simulink.

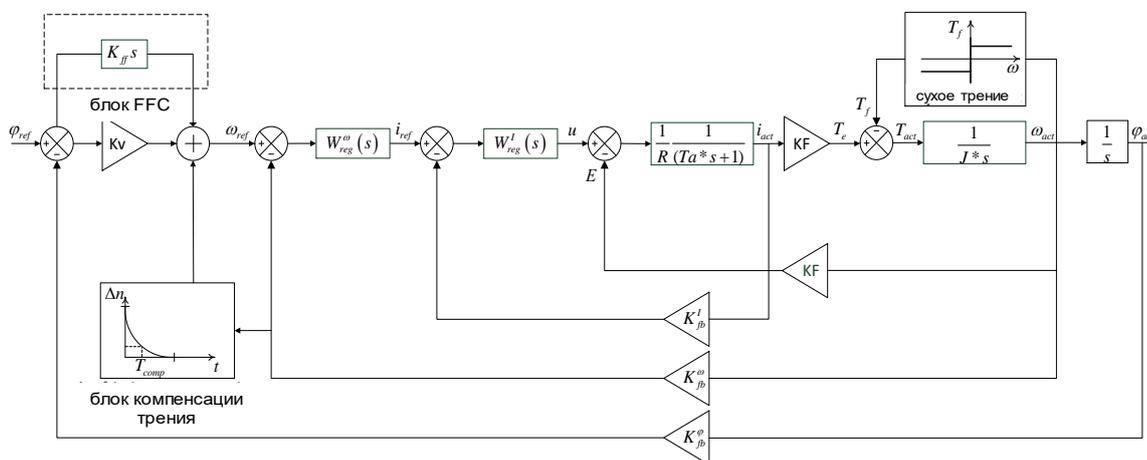


Рис. 7. Имитационная модель при наличии трения (блок «сухое трение»)

4. 2. Моделирование системы с трением

На рис. 8, (а) представлены результаты моделирования воспроизведения эталонного синусоидального движения по одной координате: 1- задающее воздействие по углу поворота двигателя, 2 – показания датчика угла поворота при движении системы с трением, 3 – момент сопротивления движению, 4 – вращательный момент, развиваемый электродвигателем, 5 – скорость вращения вала двигателя, 6 – сигнал рассогласования.

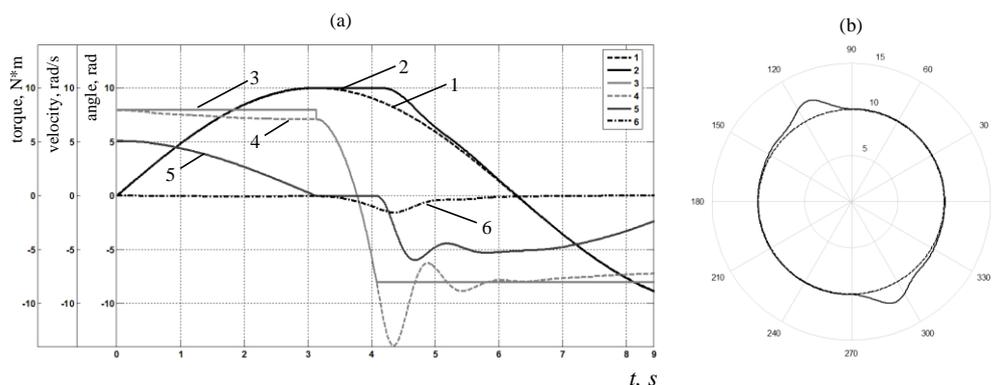


Рис. 8. Результаты моделирования системы с трением: (а) воспроизведение синусоидального движения по одной координате, (б) воспроизведение эталонной окружности

Результаты моделирования воспроизведения эталонной окружности, реализуемого двумя линейными приводами, расположенными ортогонально относительно друг друга, представлены на рис. 8, (б). Характер всплеска близок к тому, который наблюдается при наличии зазора, охваченного обратной связью по положению (Рис. 5, (б)).

Эффект от трения проявляется в наличии характерного «застоя» в момент реверса привода, т.е. участка, на котором вал двигателя остается неподвижным. Данный эффект объясняется скачком возмущающего момента при изменении знака скорости. Система будет оставаться неподвижной, пока вращающий момент на валу двигателя не превысит значение момента сопротивления.

При работающем блоке компенсации в момент реверса дополнительный сигнал суммируется с уставкой по скорости. В этом случае увеличивается разница между задающим и фактическим значением скорости, возросшее значение ошибки подается на вход регулятора тока, вследствие чего быстрее достигается вращающий момент, необходимый для преодоления момента сопротивления сухого трения.

Оптимальные значения Δn и T_{comp} для реального станка подбираются опытным путем в процессе выполнения наладки оборудования по результатам измерений выбросов на приборе Ballbar. Выброс компенсируется примерно на 80 % [5]. Следует отметить, что эти значения будут оптимальными только для контурной скорости, на которой производился подбор параметров.

Выводы

1. Цифровая коррекция входного сигнала следящего привода является эффективным средством уменьшения динамической ошибки типа «выброс» при обработке плавных траекторий на «скульптурных» поверхностях (лопатки турбин).
2. Картины отклонений при воспроизведении эталонной окружности визуально похожи в системе с нелинейностью типа «зазор» и в системе с нелинейностью типа «трение».

Список литературы

1. Marchi J.A. Modeling of Dynamic Friction, Impact Backlash and Elastic Compliance Nonlinearities in Machine Tools, with Applications to Asymmetric Viscous and Kinetic Friction Identification. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, 1998. <http://www.perihelia.com/doc/phdweb.pdf>

2. Armstrong-Helouvry B., Dupont P., De Wit C.C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. *Automatica*, vol. 30, no. 7, 1994, p. 1083–1138.
3. Андрейчиков Б. И. Динамическая точность систем программного управления станками. М.: Машиностроение, 1964. 368 с.
4. Пась О. В., Серков Н. А. Моделирование отклика несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ на ступенчатое силовое воздействие // Научные труды III Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении” FRITME-2014, ИМАШ РАН, Москва, Россия, 13-15 мая 2014 г. С.225-227.
5. Пась О.В., Серков Н.А. Коррекция динамических ошибок следящих приводов, вызванных сухим трением // Научные труды III Международной школы-конференции молодых ученых «Нелинейная динамика машин» School-NDM, ИМАШ РАН, Москва, Россия, 12-15 апреля 2016 г. С. 245-251

Дата поступления статьи: 28 сентября 2016 года.