

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УДАРНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА В ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

П.В. Гуляев

Институт механики УрО РАН
г. Ижевск

Статья посвящена поиску оптимальных траекторий перемещения ударного привода сканирующего туннельного микроскопа.

Ключевые слова: ударный пьезоэлектрический привод, туннельный микроскоп, безопасный режим.

Ударные пьезоэлектрические приводы находят широкое распространение благодаря относительной простоте конструкции и высокой точности перемещений (единицы-десятки нм) [1, 2]. При использовании данных приводов для манипулирования зондом или инструментом на небольшом расстоянии от поверхности образца возникает задача защиты зонда от повреждений. Наиболее остро эта задача проявляется в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) при сближении зондирующей иглы с исследуемой поверхностью. Как показано в работе [2], траектория шагового перемещения подвижной части ударного привода может иметь форму ступенчатого (шагового) смещения в прямом (заданном) направлении с последующей релаксацией до установившегося положения в обратном направлении. При этом наибольшая скорость перемещения наблюдается в начальной части переходного процесса. Применительно к СТМ это совпадает с перемещением иглы в направлении образца. Учитывая ограниченное быстродействие системы регулирования туннельного промежутка, это может привести к механическому контакту кончика иглы с исследуемой поверхностью. При этом защита от повреждений требует существенного усложнения системы сближения СТМ, поэтому задача поиска путей изменения формы траектории перемещения ударных приводов приобретает большое значение.

Ударный пьезоэлектрический привод (рис.1) содержит безлюфтовую кинематическую пару винт 1 – гайка 2; титановую пластину 3 с прорезями, закрепленную на винте; две пьезопластины 4 и латунную пластину 5, выполняющую функцию инерционного элемента (груза). Привод управляется несимметричными пилообразными сигналами. При по-

даче пологого фронта сигнала пара винт-гайка находится в состоянии покоя и происходит медленное смещение инерционного элемента. При подаче крутого среза происходит относительное смещение элементов кинематической пары, приводящее к повороту и поступательному перемещению винта.

Одним из возможных путей модификации траектории перемещения, не связанным с усложнением конструкции привода, является изменение параметров управляющих сигналов.

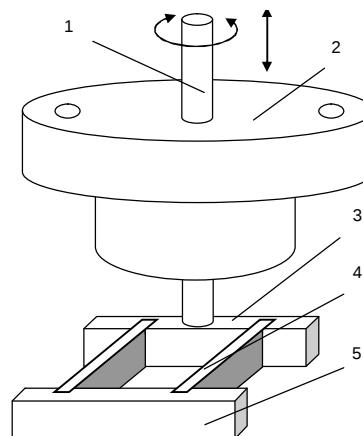


Рисунок 1 – Конструкция ударного пьезоэлектрического привода вращательно-поступательного типа

Для этого будем использовать схемы замещения [3-5], основанные на системе электромеханических аналогий. На рис.2 представлена динамическая модель представленного пьезоэлектрического привода. Источник тока I_1 служит для задания пилообразных управляющих воздействий. Источник тока I_2 моделирует скачкообразное изменение силы сухого трения в зависимости от скорости крепёжной пластины:

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2012

$I_2 = M \cdot \text{sign}(u(C_1))$, где M – момент силы трения, подчиняющийся закону Амонтона; $u(C_1)$ – напряжение на конденсаторе C_1 . Управляемый напряжением ключ K_1 замкнут при относительном покое элементов кинематической пары и разомкнут в обратном случае. Замыкание ключа осуществляется при выполнении следующих условий:

$$i(I_1) - I(L_1) - I(R_1) \leq i_0; \quad u(C_1) = 0,$$

где i_0 – ток, соответствующий величине силы трения скольжения, а размыкание – при выполнении следующего условия:

$$|i(I_1) - I(L_1) - I(R_1)| \geq i_n,$$

где i_n – ток, соответствующий величине силы трения покоя. Индуктивность L_1 используется для представления податливости пьезопластин, а резистор R_1 – для представления их механической проводимости. Нагрузку пьезоэлемента составляют элементы: C_1 – момент инерции крепежной пьезопластины; C_2 – момент инерции инерционного элемента; R_2 – механическая проводимость трения в паре винт-гайка.

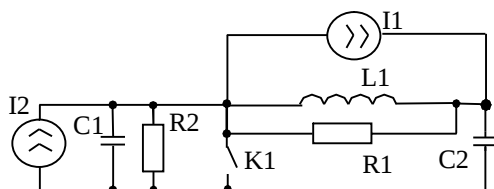


Рисунок 2 – Модель ударного пьезоэлектрического привода вращательно-поступательного типа

При традиционном управлении (медленный фронт и быстрый срез) перед началом формирования среза пьезоэлемент достигает заданной деформации и находится в состоянии равновесия. Смещение привода в сторону образца в момент снятия напряжения с его обкладок обусловлено упругими силами деформированных пьезопластин, стремящимися вернуть его в недеформированное состояние. Направление скачкообразного перемещения винта совпадает с перемещением инерционного элемента во время фронта, а при формировании среза их угловые координаты изменяются по направлению друг к другу. Графики угловых скорости и перемещения винта привода показаны на рис.3. Графики представлены в разном масштабе времени, поскольку скорость переходного процесса в его завершающей стадии имеет малую величину, что обуславливает плавное смещение винта и затрудненность наступления условий относительного покоя элементов кинематической пары [3]. Из рис.3 следует, что скачко-

образное перемещение в начале среза и итоговое перемещение по истечении переходного процесса имеют один знак, при этом плавное перемещение винта осуществляется в обратном направлении, хотя для сближения иглы и образца СТМ более приемлемым был бы противоположный характер переходного процесса. Подобный характер становится возможным, если пьезопластины, по каким либо причинам, в момент снятия напряжения не достигнут заданной величины деформации. В этом случае, в силу инерционных свойств пьезоэлементов, на их концах будут преобладать силы, стремящиеся придать им соответствующую приложенному напряжению деформацию.

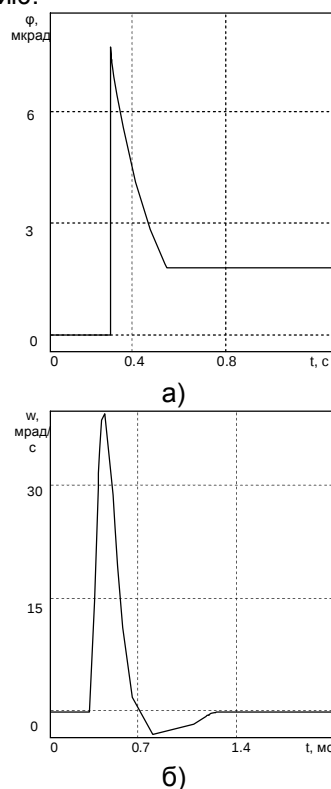


Рисунок 3 – Графики традиционного переходного процесса: а – угловое перемещение; б – угловая скорость

И лишь через некоторое время преобладающее действие будут иметь силы, возвращающие пьезопластины в недеформированное состояние. Такой характер переходного процесса возможен, если скорость нарастания фронта управляющего сигнала превышает допустимую скорость, определяемую быстроедействием пьезоэлемента. Оценить необходимую длительность фронта t_f можно по следующей формуле:

$$t_r < 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1)$$

где m – масса инерционного элемента; k – жесткость пьезопластин. Выражение (1) означает, что если длительность фронта меньше периода колебаний на частоте первого резонанса, то на момент формирования среза управляющего сигнала на пьезоэлементы будут действовать деформирующие силы.

Тогда в момент формирования среза управляющего сигнала угловые координаты винта и инерционного элемента будут изменяться в противоположных направлениях. Как видно из графиков (рис. 4), скачкообразное перемещение винта в начале среза и итоговое перемещение по истечении переходного процесса имеют разный знак. При этом траектория перемещения в направлении, совпадающем с итоговым, имеет плавный характер, что позволяет рекомендовать данный режим для сближения иглы и образца в СТМ. График реальных перемещений винта инерционного пьезоэлектрического привода в режиме безопасного сближения показан на рис. 5.

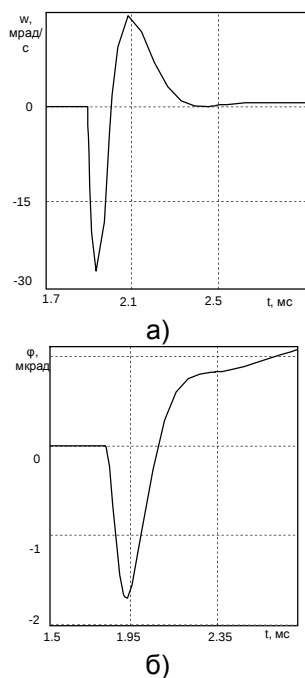


Рисунок 4 – Графики переходного процесса при ускоренном фронте управляющего сигнала: а – угловое перемещение; б – угловая скорость

Особенностью представленного режима работы привода является следующее. Величина перемещения винта во время переходного процесса, вызванного воздействием управляющего сигнала, изменяет знак относительно начального (нулевого) положения. При этом наблюдается первоначальное резкое смещение винта в одном направлении с последующим плавным смещением в противоположном. Таким образом, направление плавного смещения может быть выбрано в качестве основного, а соответствующий режим работы привода – использован в СТМ для безопасного сближения иглы с поверхностью образца.

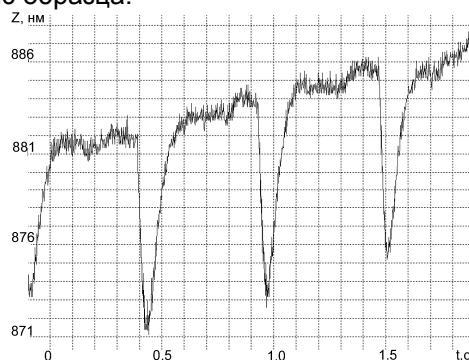


Рисунок 5 – График безопасного сближения зонда и образца СТМ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hongzhuang ZHANG, Ping ZENG, SHunming Hua, Guangming CHENG. Zhigang Yang Impact drive rotary precision actuator with piezoelectric bimorphs //Front. Mech. Eng. China 2008, 3(1). p 71-75.
2. Гуляев П. В., Осипов Н. И., Гафаров М. Р. и др. Автоматизация процесса сближения зондирующей иглы и образца в электрохимическом туннельном микроскопе// Ползуновский вестник, № 3, С. 200-203, 2011.
3. Гуляев П.В. Особенности применения схем замещения при проектировании инерционных пьезоэлектрических приводов.- Электротехника. 2011. № 10. С. 8-13.
4. Ленк А. Электромеханические системы: Системы с распределенными параметрами. М.: Энергоатомиздат, 1982.- 472 с.
5. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие– М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384с.

Гуляев Павел Валентинович – к.т.н., старший научный сотрудник УрО РАН, тел.: (3412) 59-58-04, e-mail: evshelk@mail.ru