

УДК 629.7.054

ТОГРУЛ ИСА ОГЛЫ КАРИМЛИ, ВАСИФ АЙДЫН ОГЛЫ НЕЙМАТОВ*Национальная Академия Авиации Азербайджана, Баку, Азербайджан***МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ**

Построена система начальной выставки пьезоэлектрических акселерометров, исключающая образования паразитной поперечной чувствительности. Обсуждены вопросы, принципы построения подобных систем без привлечения дополнительных датчиков положения и выяснены режимы работы системы начальной выставки. Составлены схемы и логические условия для подключения акселерометров, как в качестве задающего устройства, так и в качестве датчика обратной связи. Обосновано использование двух идентичных акселерометров с целью обеспечения максимальной продольной чувствительности по одной оси. Полученные осциллографы от симуляции составленной модели разработанной системы подтверждают достоверность составленных алгоритмических уравнений управления.

Ключевые слова: акселерометр, продольная чувствительность, грубая и точная выставка.

1. Введение

Как известно, особенность применения пьезоэлектрических акселерометров заключается в проведении измерения между акселерометром и конструкцией объекта, что может оказать существенное влияние на отклик конструкции, на выходной сигнал акселерометра или на все вместе взятое [1]. Существуют несколько методов установки, которые значительно действуют на коэффициент передачи высокочастотного сигнала [2]. Несмотря на тщательно разработанные рекомендации закрепления и установки акселерометров, ни один из них не способен обеспечить исключения такого побочного и нежелательного эффекта, как возникновение поперечной чувствительности. Проблема возникновения эффекта поперечной чувствительности и отсутствия системы контроля положения установленного акселерометра с методом механического крепления, характерна для таких сложных объектов как летательные аппараты, в том числе и для беспилотных.

В данной статье предлагается система начальной выставки (СНВ) пьезоэлектрических акселерометров (ПЭА), которая позволяет в автоматическом режиме установить акселерометр таким образом, чтобы исключить возможность возникновения поперечной чувствительности. Наличие такой системы также позволило бы, по мере эксплуатации акселерометров, на основе специальной разработанной программы, в полуавтоматическом режиме внести корректировки для устранения нарушений положения точной установки впоследствии многократных

механических воздействий, например после некоторых часов работы.

2. Постановка задачи

При установке акселерометров следует ориентировать корпус акселерометра таким образом, чтобы его ось максимальной чувствительности (рабочая ось) совпадала с направлением измеряемого виброускорения, а направление минимальной чувствительности к колебаниям в поперечном направлении совпадало с направлением последних. Наиболее распространенными способами крепления акселерометров являются резьбовое соединение, приклеивание и магнитное крепление. Иногда используется механическое поджатие и редко вакуумное крепление [3, 4].

Общие недостатки названных способов крепления — это сложность ориентировки акселерометра на установочной плоскости в случае необходимости и вероятности самоотвинчивания без дополнительной фиксации при длительной эксплуатации акселерометров с механическим креплением. В широко распространенных акселерометрах с фланцевым креплением, обладающих высокой надежностью и позволяющих их установку в фиксированном положении, снижается частота установочного резонанса из-за увеличения массы и габаритов за счет фланца, а также из-за неравномерного усилия поджатия по контактной поверхности.

Клеевой способ крепления используется при невозможности выполнения в месте установки акселерометров крепежных отверстий. Этот способ, также имеет некоторые недо-

статки: клеи, содержащие растворитель, не обеспечивают высокую жесткость соединения по всей установочной поверхности; меньшая надежность и прочность клеевого соединения по сравнению с резьбовым соединением; ограничение рабочего диапазона температур (для большинства клеев до 80⁰С), а также сложность демонтажа датчика без его повреждения.

К недостаткам различных вариантов крепления ПЭА, следует отнести эффект возникновения поперечной чувствительности, причиной которой является неточность перпендикулярного направления продольной оси акселерометра к поверхности крепления и недостаточная надежность в сохранении своего исходного положения крепления во время длительной эксплуатации.

Применение ручного шупа обеспечивает самое быстрое крепление акселерометра, но, при этом значительно увеличивается погрешность и понижается воспроизводимость результатов измерений. Это связано с низкой частотой установочного резонанса (1 – 2 кГц), отклонением оси датчика от нормали и непостоянным усилием поджатия.

Таким образом, возникает необходимость в разработке специального автоматизированного электромеханического узла, с помощью которого, после механического крепления контактных акселерометров на местах установки, в зависимости от углового рассогласования между их продольных осей выполняется их точная ориентация по направлению координатной оси.

3. Решение поставленной задачи

Следует отметить, что в работе [5] уже рассматривалась аналогичная задача, но для исполнительных механизмов космического аппарата – двигателей – маховиков (ДМ), где предлагается для одной оси использовать два жестко связанных между собой, а для трех осей шесть маховиков. В этой работе рассмотрены вопросы, связанные с определением оптимальной структуры расположения двигателей-маховиков на космическом аппарате по сравнению с установленным стандартом NASA и известной фирмой General Electric. Обосновано, что альтернативный вариант по сравнению с названными при отказах ДМ обладает большей эффективностью.

Для объяснения сути предложенного способа, рассмотрим схему, представленную на рис 1.

Как видно из схемы, два акселерометра, установленные на одной и той же поверхности, имеют погрешность установки и их

продольные оси не полностью перпендикулярны к поверхностям, с которыми должны иметь механический контакт для измерения ускорений или вибраций. Для определения перпендикулярности, к поверхности каждого акселерометра необходимо выполнить

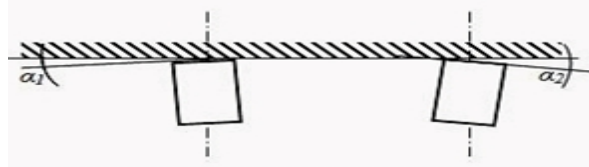


Рис.1. Погрешности установки двух акселерометров на одну и ту же поверхность

некоторые измерительные процедуры, для чего пришлось бы использовать дополнительные стендокалибровочные приспособления и оборудование. Но, если взять абсолютно идентичные два акселерометра и сравнить их выходные сигналы, то легко можно будет определить, насколько ровно они установлены по продольной оси (по нормали к поверхности).

На рис. 2. представлена конструктивная схема системы начальной выставки акселерометров (СНВ), которая основана на вышеуказанном предположении.

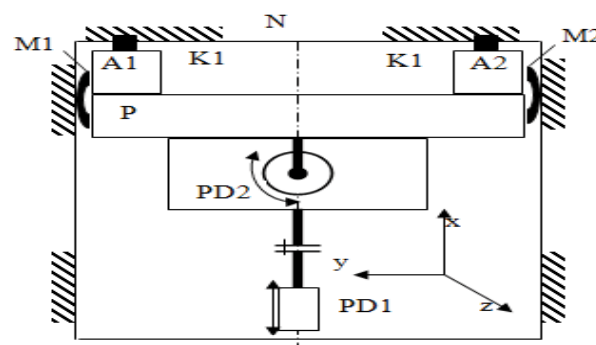


Рис. 2. Схема компоновки СНВ

A1, A2 – пьезоэлектрические акселерометры;
K1, K2- механические контакты с инерционными массами акселерометров, M1 M2 – электромагнитные тормоза; P – подвижная платформа, имеющая линейное перемещение вдоль оси симметрии;
PD1- следящий электропривод с двигателем постоянного тока PD2- пьезоэлектрический двигателя привода поворотного стола; N-корпус подвижного объекта

Рассмотрим работу СНВ, в которой процесс выставки ПЭА состоит из двух последующих этапов: грубой выставки и точной выставки.

Грубая выставка выполняется для высокоскоростного приближения платформы P к неподвижной стенке корпуса N по оси X и завершается касанием одного из механических контактов K1, K2 на акселерометрах A1 или

А2. Завершение грубой выставки происходит автоматически, при получении сигнала от выходов одного из акселерометров А1 или А2. Этот сигнал в режиме грубой выставки предназначен для одновременного отключения следящего электропривода PD1 и включения поворотного привода с двигателем PD2. Таким образом выходные сигналы акселерометров А1, А2 являются командой для старта второго этапа, т.е. этапа точной выставки.

На этом этапе поворотный привод с реверсивным PD2 поворачивает стол, на котором жестко закреплена платформа Р с ПЭА А1, А2 вокруг оси z по или против часовой стрелки до тех пор, пока на выходе сравнивающего устройства, куда поступают выходные сигналы от А1, А2, не образуется нулевой сигнал. Так как, акселерометры являются абсолютно идентичными и при идентичной ориентации относительно неподвижного корпуса, то разность их выходных сигналов будет равно нулю. А это означает, что их продольные оси в достаточной степени перпендикулярны к установленной поверхности и у них отсутствует эффект поперечной чувствительности.

Функциональная блок-схема СНВ показана на рис. 3.

Перед началом работы СНВ, пока механические контакты К1, К2 не коснулись к инерционным массам ПЭА А1, А2, на входы ЛСД поступают нулевые сигналы и поэтому выходной нулевой сигнал через блок СП2 запрещает пуск к работе ППС и инверсированный, через ЛСИ единичный сигнал разрешает пуск к работе ЭП ПП. ПЭА А1 и А2 имеющие между собой жесткую механическую связь (оба закреплены на поворотный стол) вместе с ППС, в свою очередь, закреплены на ПП. Таким образом, после пуска к работе ЭП ПП, ПЭА А1, А2 движутся к стенке корпуса N (см, рис.2). При первом же контакте с К1, К2 с одним из ПЭА, сигналы управления, поступающие на ПС1, ПС2 инвертируются и впоследствии этого переключения прекращает работу ЭП ПП и запускается к работе ППС, тем самым в СНС стартует второй этап – этап точной выставки.

На втором этапе, после того как СП2 включает ППС, логика выбора направления (ЛВН) определяет направление движения поворотного стола, то есть направление вращения двигателя ППС. Так как, после первого этапа один из ПЭА А1, А2 первым коснется одного из контактов К1 или К2 соответственно, то выходные сигналы акселерометров, поступающие на СС1, окажутся разными и разность их, полученная на выходе СС2, поступает на СС2, где сравнивается с выходным сигналом ЗНЧ.

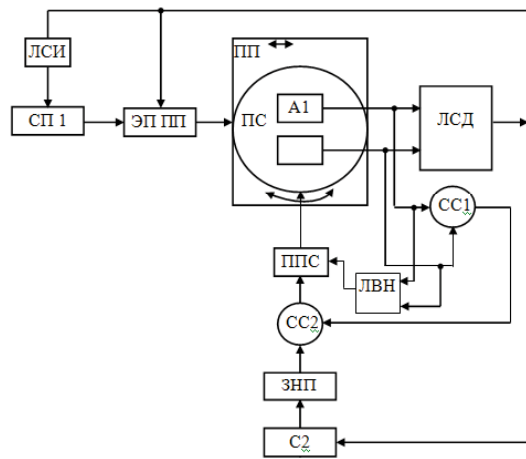


Рис. 3. Функциональная блок-схема СНВ
 ПЭА А1 А2- пьезоэлектрические акселерометры; ПП- подвижная платформа; ПС- поворотный стол; ЭП- электропривод линейных перемещений платформы, ППС- привод поворотного стола; ЛСД -логическая схема дизъюнкция, ЛСИ - логическая схема инверсия; СС1 и СС2-схемы сравнения; СП1, СП2 – схемы пуска и отключения ЭП и ППС; ЗНП- датчик нулевого положения

Одновременно, после определения ЛВН направления поворота стола, ПЭП поворачивает стол до тех пор, пока не выровняются положения акселерометров относительно контактов К1, К2. Например, если А1 первым коснется контакта К1, то ЛВН определит поворот стола против часовой стрелки. При выравнивании положений акселерометров их выходные сигналы, поступающие на СС1, станут равными друг другу и таким образом на СС2 поступит нулевой сигнал и поворот стола прекратится. Следует отметить, что хотя функциональной схеме ЗНП представлен отдельным блоком, но это лишь, только для удобства разъяснения принципа работы. А по сути, в качестве ЗНП должен подключиться один из акселерометров А1, А2, первым коснувшийся механических контактов К1, К2. Аналогичное нужно отметить и о СС1, СС2. Эти устройства являются одними и теми же сравнивающими устройствами. Иными словами, функциональная схема содержит логическую схему управления взаимовключением акселерометров и СС, которая не показана на рис. 3.

Такой принцип построения схемы СНВ позволяет, без применения дополнительных датчиков, осуществить точную начальную выставку одноосных акселерометров и предотвращает появление поперечной чувствительности.

4. Алгоритмы управления

Функциональная схема системы управления СНВ представлена на рис. 4. На схему запрета акселерометров (СЗА1, СЗА2) посту-

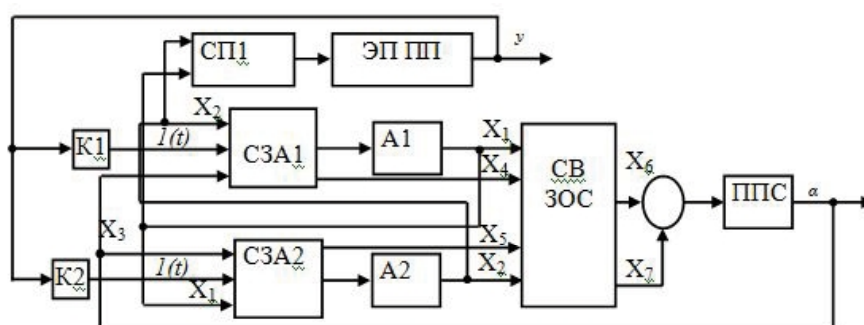


Рис. 4. Функциональная схема системы управления СНВ.

СЗА1, СЗА2- схема запрета акселерометров; А1 А2- пьезоэлектрические акселерометры; ЭП ПП - электропривод подвижной платформы; ППС- привод поворотного стола; СП1, СП2 – схемы пуска и отключения ЭП и ППС; СВЗОС- схема выбора задающего устройства и обратной связи

паяют сигналы: X_1, X_2 – выходные сигналы акселерометров А1, А2 соответственно, и X_3 -сигнал обратной связи следящей системы привода точной выставки (ППС), которая выполняет точную выставку акселерометров.

На схему запрета акселерометров (СЗА1, СЗА2) поступают сигналы: X_1, X_2 – выходные сигналы акселерометров А1, А2 соответственно, и X_3 -сигнал обратной связи следящей системы привода точной выставки (ППС), которая выполняет точную выставку акселерометров.

Работа СНВ начинается с пуском ЭП ПП – режим грубой выставки (РГВ). Отключение РГВ происходит после касания одного из акселерометров А1, А2 на контакты К1, К2. Допустим, что после грубой выставки акселерометр А1 первым коснулся контакта К1.

(см: рис 2). Его выходной сигнал X_1 поступает на схему СП1 и происходит отключение ЭП ПП и этим завершается РГВ. Далее, этот сигнал поступает на СЗА2, запрещает подключение А2 на вход ППС и подготавливает его подключение в цепь обратной связи ППС: вход X_3 соединяется с выходом X_5 . Аналогичное произойдет, если после грубой выставки первым коснется механического контакта К2 акселерометр А2: вход X_3 соединится с выходом X_4 и СЗА1 подготовит включение А1 в цепь обратной связи ППС.

Таким образом, на схему выбора задающего устройства и обратной связи СВЗОСпоступают четыре сигнала: X_1, X_2 – выхода акселерометров А1, А2 соответственно, и X_4, X_5 – подготовительные сигналы для включения акселерометров в цепь обратной связи следящей системы. Очевидно, что СВЗОС должен работать таким образом, что если А1подключит как задающее

устройство, то А2 должен подключить в цепь обратной связи и наоборот.

На рис. 5 показаны компьютерные модели СНВ и подсистем СЗА1 (SZA1), СВЗОС (SVZOS).

Уравнения, описывающие алгоритмы работы этих подсистем, являются следующие:

для подсистемы СЗА1:

для подсистемы СВЗОС:

$$X_{a1} = 1(t) \left(1 - \frac{1}{K_a} X_2 \right) + X_3, \quad (1)$$

$$X_{a2} = 1(t) \left(1 - \frac{1}{K_a} X_1 \right) + X_3, \quad (2)$$

$$X_4 = 1(t) \left(1 - \frac{1}{K_a} X_2 \right), \quad (3)$$

$$X_5 = 1(t) \left(1 - \frac{1}{K_a} X_1 \right), \quad (4)$$

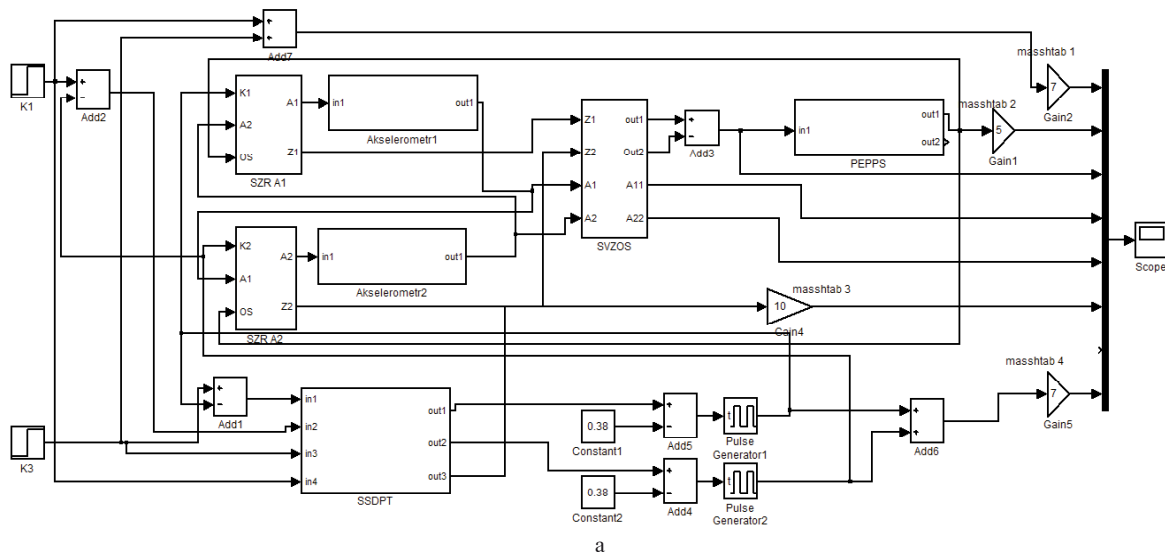
$$X_6 = X_1 X_4 + X_2 X_5, \quad (5)$$

$$X_7 = (X_1 + X_2) X_4 X_5, \quad (6)$$

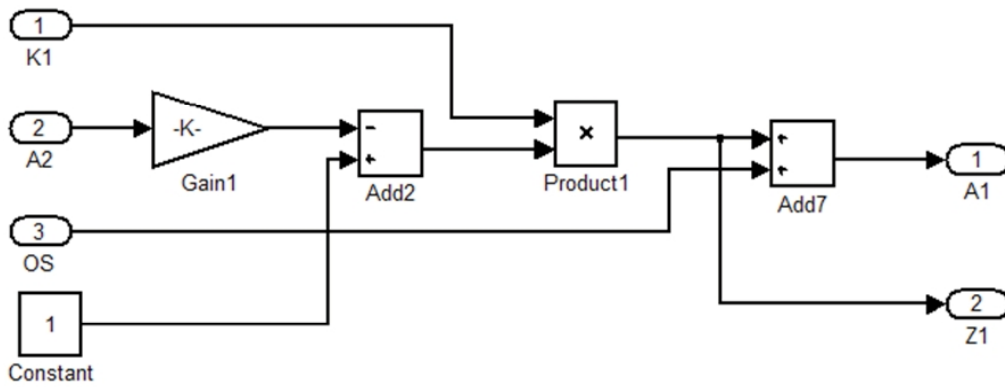
где K_a - коэффициент передачи пьезоэлектрических акселерометров;

X_6 - выход СВЗОСдля подключения задающего устройства;

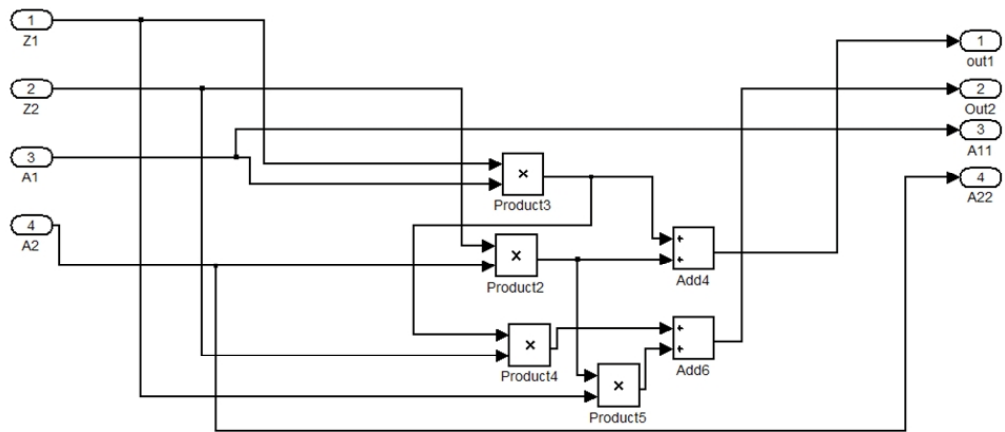
X_7 - выход СВЗОСдля подключения обратной связи датчика.



a



б



с

Рис. 5 Компьютерная модель ЧНВ. а) общая модель; и) подсистема С3А1 (SZA1); в) подсистема СВ3ОС (SVZOS)

В качестве ЭП ПП можно применять следующие приводы малой мощности постоянного или переменного тока с регуляторами скорости и положения, настроенные на технический оптимум переходного процесса [6,7]. Что ка-

сается привода поворотного стола, здесь имеет место задача точного позиционирования. В подобных случаях широко применяются тихоходные двигатели разного типа, а также пьезоэлектрические [8,9].

На основе данных вышеуказанных источников, выбрана передаточная функция для ЭП ПС с двигателем постоянного тока:

$$W_{pd1}(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{1,05}{0,6191 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,011477s + 1}, \quad (7)$$

а также для ППС, в качестве которой выбран привод с реверсивным пьезоэлектрическим двигателем:

$$W_{pd}(s) = \frac{\varphi(s)}{U(s)} = \frac{1,05}{2,98 \cdot 10^{-8} s^3 + 0,6191 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,011477s + 1}. \quad (8)$$

Согласно работам [10-12], рассчитаны передаточные функции акселерометров:

$$W_{a1}(s) = W_{a2}(s) = \frac{12}{1 \cdot 10^{-12} s^2 + 3,5 \cdot 10^{-7} s + 1}, \quad (9)$$

и фазовых дискриминаторов:

$$W_{fu1}(s) = W_{fu2}(s) = \frac{1,27}{5 \cdot 10^{-6} s + 1}, \quad (10)$$

которые, соединяясь последовательно, образуют подсистемы A1, A2.

Как видно из рис.6, где показаны кривые, полученные от симуляции разработанной модели, в момент касания A1 формируется импульс, который отключает ЭП ПП и A1 подключается как задатчик, а A2 – в цепь обратной связи.

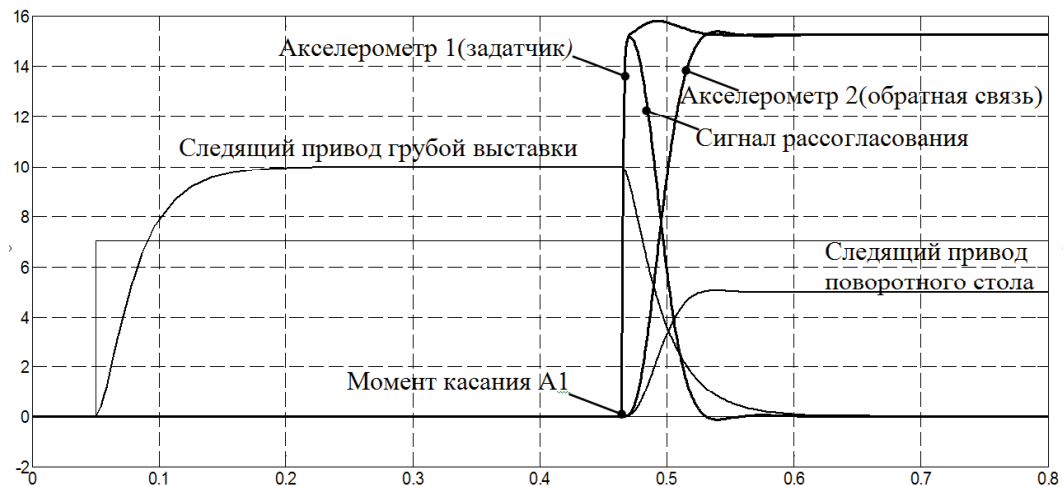


Рис. 6. Кривые, полученные от симуляции компьютерной модели СНВ

Одновременно с подачи этого импульса стартует режим точной выставки. Если первым коснется A2, то все произойдет аналогично, но на этот раз A2 подключится к входу, а A1 в цепь обратной связи. То есть, в этом случае акселерометры меняются местами, согласно алгоритмам управления.

Отметим, целью исследований являлась моделирование и симуляция системы управления СНВ. Поэтому для моделирования ПФ приводов и акселерометров были использованы результаты научных работ и учебных пособий, ссылка на которые имеется в данной статье.

Заключение

Таким образом, разработанная СНВ устраняет возникновение эффекта поперечной чувствительности по одной координатной оси измерения, за счет применения двух идентич-

ных акселерометров, продольные оси которых направлены по этой же координатной оси. А также, за счет применения системы позиционирования, состоящей из привода линейного движения вдоль координатной оси измерения, обеспечивается высокоскоростной режим грубой вставки, а за счет привода углового перемещения вокруг оси, перпендикулярной оси симметрии установки акселерометров, осуществляется режим точной вставки.

Так как рассмотренная система предназначена для устранения возникновения эффекта поперечной чувствительности только по одной координатной оси измерения, для устранения возникновения поперечной чувствительности по всем трем координатным осям, необходимо установить подобную СНВ для каждой пары акселерометров.

Литература

1. Рекомендации по выбору акселерометров в зависимости от применения. [Электронный ресурс]. Режим доступа : http://www.radiant.sufiles/images/endeveco/Endevco_accelerometers.pdf.
2. Характеристики акселерометров. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://metrologu.ru/info/izmerenia/vibroizmerenia/6-harakteristiki-akselerometrov.html>.
3. Янчич В. В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения [Текст]: учеб. пособие / В. В. Янчич. – Ростов-на-Дону, 2008.
4. Кулик А. С. Эффективность избыточных систем стабилизации и ориентации космических аппаратов с двигателями-маховиками [Текст] / А. С. Кулик, А. М. Суббота, О. В. Резникова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 3. – С. 18-24.
5. Бабакин И. В. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] : в 2-х ч. / И. В. Бабакин. – Уфа, УГНТУ, 2007.
6. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. [Текст] : учебник / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М. : Энергоатомиздат, 1981.
7. Квасников В. П. Математическая модель пьезоэлектрической виброопоры для координатно-измерительной машины. [Электронный ресурс] / В. П. Квасников, А. Л. Передерко, С. В. Уваров. Режим доступа : <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv /AKTT/2007/AKTT807/Kvasniko.pdf>.
8. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. [Текст] / О. П. Михайлов. – М.: Машиностроение. – 1990. – 304 с.
9. Солодовникова В. В. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. [Текст] К. 1. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства / В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение. – 1973. – 671 с.
10. Шипунов А. Н. Определение передаточной функции датчика угловых ускорений. [Электронный ресурс] / А. Н. Шипунов, А. А. Гаврилов. Режим доступа : <http://www.nntu.ru/trudy/2011/04/311-317.pdf>.
11. Радиоавтоматика [Текст] : учеб. пособие / А. А. Елисеев, А. В. Небылов [и др.]. – М.: Высш. школа. – 1985. – 271 с.

Поступила в редакцию 29.05.2016

T. I. Karimli, V. A. Neymatov. Initial alignment system of piezoelectric accelerometers

A system of initial alignment of piezoelectric accelerometers, prevents the formation of parasitic transverse sensitivity. They discussed the principles of such systems without additional position sensors and clarified modes initial alignment of the system. And logic circuit composed for connection conditions accelerometers as both a master unit and as a feedback sensor. It justifies the use of two identical accelerometers with the purpose to maximize the sensitivity of the longitudinal axis of one. These oscilloscopes from the simulation model developed system composed confirm the accuracy of management made up of algorithmic equations.

Keywords: *accelerometer, longitudinal sensitivity, coarse and fine exhibition.*

Т. И. Каримли, В. А. Нейматов. Моделювання системи початкової виставки п'єзоелектричних акселерометрів

Побудована система початкової виставки п'єзоелектричних акселерометрів, що виключає утворення паразитної поперечної чутливості. Обговорено питання, принципи побудови подібних систем без залучення додаткових датчиків положення і з'ясовані режими роботи системи початкової виставки. Складено схеми і логічні умови для підключення акселерометрів, як в якості задаючого пристрою, так і в якості датчика зворотного зв'язку. Обґрунтовано використання двох ідентичних акселерометрів з ціллю забезпечення максимальної поздовжньої чутливості по одній осі. Отримані осцилографи від симуляції складеної моделі розробленої системи підтверджують достовірність складених алгоритмічних рівнянь управління.

Ключові слова: *акселерометр, поздовжня чутливість, груба і точна виставка.*