

А.Р.Силков

СИСТЕМА ПРЕЦИЗИОННОГО НАВЕДЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТЮАТОРОВ

Рассматриваются проблемы стабилизации линии визирования в условиях сильных вибрационных воздействий. Для повышения качества стабилизации разработана технология быстрого пьезозеркала, что позволило отработать высокочастотную составляющую помех и расширить рабочую полосу частот. В результате удалось значительно увеличить точностные характеристики системы в целом, в частности уменьшить остаточную ошибку обработки более чем в 4 раза.

Ключевые слова: пьезозеркало, пьезоактюатор, оптико-локационная станция, система регулирования

Введение. Интерес к военным применениям лазеров возник сразу после демонстрации первых квантовых генераторов. Уникальные свойства лазерного излучения, а именно: направленность, монохроматичность, когерентность, генерация ультракоротких импульсов, высокая концентрация энергии оказались весьма привлекательными для различных систем вооружений. Выделим два основных класса задач, решаемых с помощью лазеров. Первый — непосредственное воздействие лазерного луча на цель, приводящее к уничтожению, нанесению непоправимого ущерба или препятствующего выполнению боевой задачи. Второй — вспомогательные функции для поддержки обычных систем вооружения: дальнометрия, целеуказание и подсветка целей. Данные функции в современной военной технике выполняются оптико-локационными станциями (ОЛС) [1]. В этой области основной проблемой является точность наведения лазерного излучения на объект, которая ограничена физическими и конструктивными особенностями системы.

Изначально ОЛС были введены в основной контур управления вооружением на советских самолетах, где они и появилась впервые в мире. На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что без этого устройства не обходится ни один современный истребитель, вертолет, танк или корабль. Если говорить об авиации, то основным средством обнаружения и целеуказания во второй половине двадцатого века стали радары (РЛС), но радиолокационный диапазон электромагнитных волн далеко не единственный. Началось всё совершенно с двух различных приспособлений: тепловизоров и лазерных дальномеров. Первоначально устройства работали независимо друг от друга. В последующем эти приборы были объединены в одну систему, при этом тепловизор определял общее направление на цель, а далее к измерениям приступал лазерный дальномер. Стремительное совершенствование электронных фоточувствительных матриц привело к возможности создания ещё одного канала поступления информации: телевизионного. Наконец, бортовые ЭВМ достигли достаточной мощности, чтобы микшировать информацию от различных каналов и формировать для летчиков объединенную картину окружающей обстановки, при этом информация выводилась в удобном для оценки виде: на прозрачном дисплее, отображавшем положения целей на фоне лобового стекла, а наведение оружия осуществлялось с помощью системы нацеленного целеуказания, связанного непосредственно с головкой самонаведения ракеты.

Принцип работы ОЛС

Обозначим основные задачи, решаемые ОЛС:

- обнаружение, захват и сопровождение воздушных, наземных и надводных целей;
- определение угловых координат, дальности, угловых и линейных скоростей целей;
- формирование ТВ, ИК, ТВ+ИК-видеоизображений, сообщений на многофункциональных индикаторах;
- подсветка цели лазерным излучением.

ОЛС в режиме обзора сканирует пространство в секторе $\pm 30^\circ$ по азимуту и $\pm 5^\circ$ по углу места. Система работает в видимой и ИК областях спектра. Устройство имеет интегральное исполнение: телевизионная и тепловизионная системы, а также лазерный дальномер объединены в одном конструктиве. Преимущества ОЛС над РЛС — это отсутствие излучения и обнаружения себя. В системе используется лазер с полупроводниковой накачкой, обладающий высоким коэффициентом полезного действия. Для защиты ОЛС от окружающей среды во время полета в качестве материала иллюминатора используется лейкосапфир — второй по прочности промышленный материал после алмаза, что крайне важно для оптических систем.

Постановка проблемы. В данной работе рассматриваются основные проблемы, присущие оптическим системам, подверженным сильным вибрационным воздействиям.

Одной из важнейших задач оптико-локационных систем является задача стабилизации линии визирования. Решается она применения электроприводов, которые обрабатывают поданные целеуказания и призваны компенсировать возникающие от внутренних и внешних вибраций ошибки. В ходе исследования и анализа проблематики было обнаружено, что полоса частот возникающих вибраций в системе превышает возможности обработки электроприводами. Для решения задачи повышения качества стабилизации за счет расширения рабочей полосы было решено использовать быстрое пьезозеркало.

Ниже, на рис. 1 приведен пример спектрального анализа широкополосного сигнала управления, приведенного и подаваемого на привод угла места оси сканера. Как видно из рисунка, в системе присутствуют

наиболее значительные колебания на частотах 5, 15, 30, 45, 60 Гц, которые необходимо компенсировать.

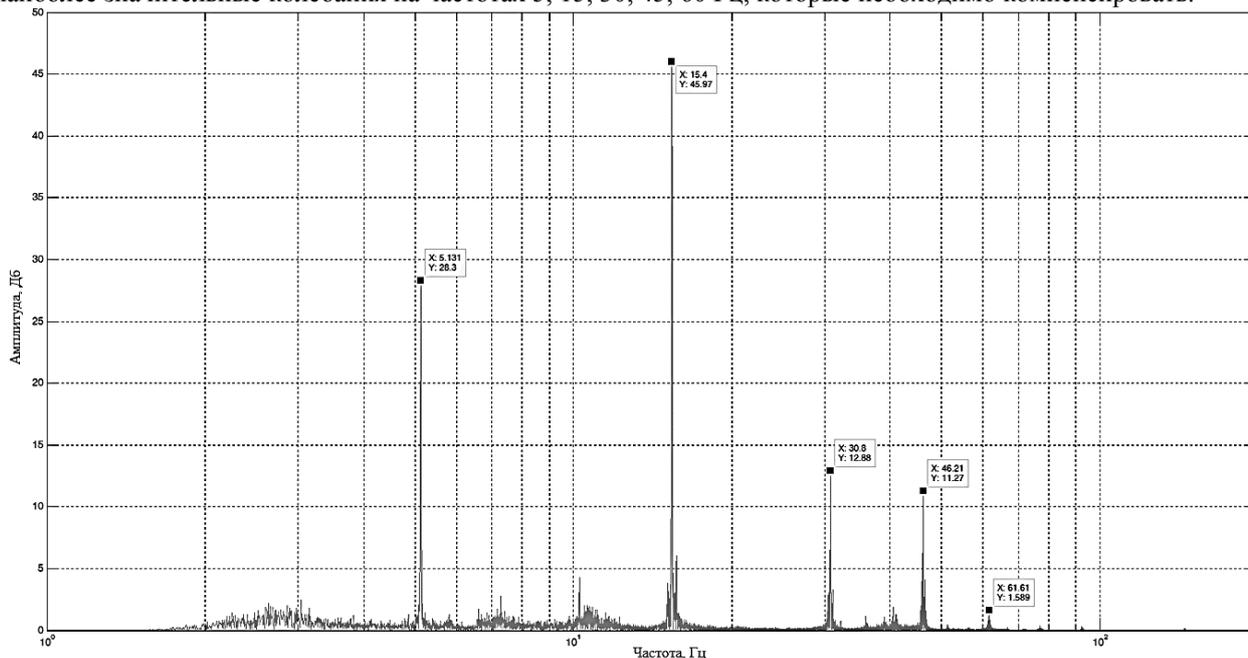


Рис. 1. Гармонический состав входного воздействия системы стабилизации

На рис. 2 представлен график отработки данного входного воздействия. Низкочастотные колебания (примерно до 15 Гц) могут быть отработаны системой электроприводов достаточно точно. Однако, высокочастотные составляющие вызывают ошибку отработки. Остаточная ошибка отработки составляет порядка 70 угловых секунд в размахе, что вызывает тряску изображения примерно на 7—8 пикселей пикселя.

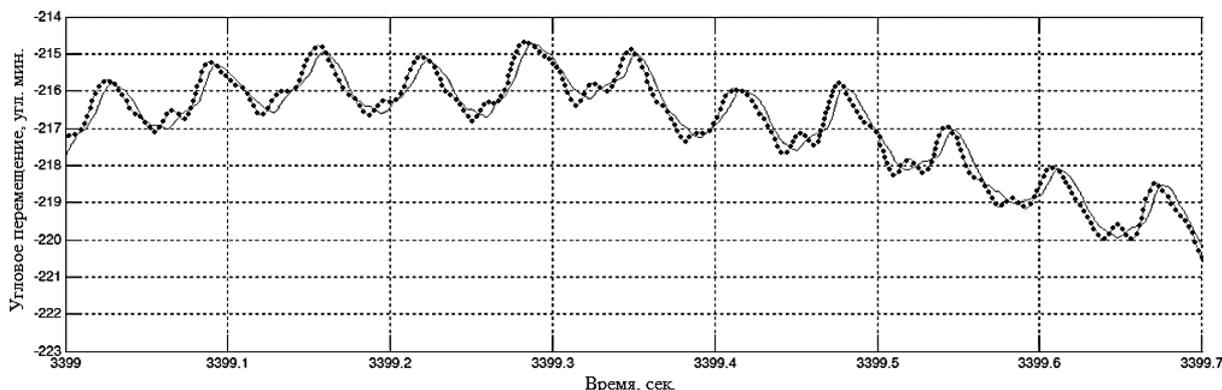


Рис. 2. Сигнал управления, подаваемый на УМ привод оптической системы в режиме гиросtabilизации и сигнал его отработки (линия с точками — сигнал задания; сплошная — сигнал отработки)

Разработка дополнительного механического узла для оптической системы. Для отработки остаточной ошибки до нескольких угловых минут в более широкой полосе частот было решено разработать дополнительный механический узел с подвижным зеркалом.

На рис. 3 представлена габаритная модель подвижного зеркала. Максимально облегченное бериллиевое зеркало устанавливается на переходную пластину, которая в свою очередь устанавливается на две пары актуаторов через штоки, выполненные из инвара (коэффициент температурного линейного расширения более чем в 10 раз меньше, чем у алюминия) и имеет 2 степени свободы. Ее неподвижная часть является опорой и обеспечивает возможность работы подвижной части (подвеса), расположенной перпендикулярно к поверхности установки изделия.

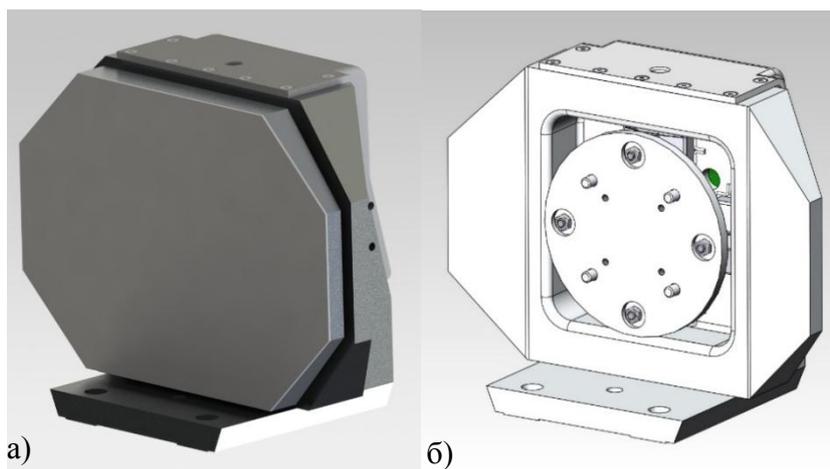


Рис. 3. Пьезоплатформа (а — общий вид; б — неподвижная часть пьезоплатформы)

В качестве основного функционального элемента такой системы было решено использовать пьезоактюаторы — устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в механическую за счёт явления обратного пьезоэффекта. При подаче напряжения пьезокерамика способна изменять свои геометрические размеры и с высокой точностью оставаться в заданном положении. Целесообразность использования именно пьезоактюаторов в роли исполнительного устройства пьезоплатформы также обусловлена их преимуществами по сравнению со стандартными электроприводами:

- не лимитированные возможности по разрешению — пьезоэлектрические актюаторы преобразуют электрическую энергию непосредственно в механическую. Они способны осуществлять перемещение в субнанометрическом диапазоне;

- повторяющиеся шаги нанометровых и субнанометровых размеров при высоких частотах;

- скорость срабатывания — в диапазоне микросекунд;

- развитие больших сил;

- отсутствие магнитного поля — действие актюаторов связано с электрическими полями, они не генерируют магнитные поля, а также не подвержены влиянию таковых;

- в статическом состоянии, даже под воздействием больших нагрузок, актюаторы не потребляют энергию, также при этом не выделяется тепловая энергия;

- не требуют технического обслуживания, поскольку они являются твердыми телами, не имеют шестерен или подшипников, и их деформация основана на молекулярных эффектах в пьезоэлектрических кристаллах;

- возможность работы в экстремальных условиях — пьезоактюаторы не требуют смазки, а пьезоэлектрический эффект присутствует даже при низких температурах [2];

- миниатюризация и адаптивность к компьютерным системам.

По совокупности рабочих характеристик (рабочий ход, диапазон управляемых напряжений, резонансные частоты, высокая повторяемость и показатели наработки на отказ) были выбраны пьезоактюаторы фирмы CedratTechnologies серии APA60SM (рис. 4).

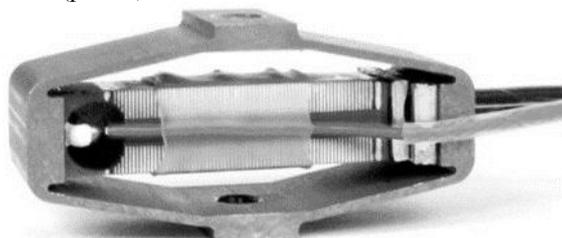


Рис. 4. Пьезоактюатор APA60SM (Cedrat Technologies, Франция) [3]

Для прецизионного позиционирования на каждом актюаторе расположен тензорезистор, позволяющий отслеживать текущее положение и корректировать сигнал управления для уменьшения остаточной ошибки. Основные характеристики пьезоактюатора APA60SM приведены в табл.

Характеристики пьезоактюатора АРА60SM [3]

Характеристики	Единицы измерений	АРА60SM
Макс. ход без нагрузки	мкм	72
Блокирующая сила	Н	105
Жесткость	Н/мкм	1.45
Резонансная частота (free-free)	Гц	9252
Время отклика (free-free)	мс	0.05
Резонансная частота (blocked-free)	Гц	2802
Время отклика (blocked-free)	мс	0.18
Диапазон напряжений	В	-20 ... 150
Емкость	мкФ	1.55
Высота (в напр. хода)	мм	13.0
Длина	мм	26.9
Ширина	мм	11.5
Масса	г	10.0

Синтез математической модели пьезоплатформы. На начальном этапе разработки для предварительной оценки динамических свойств устройства была синтезирована математическая модель будущей пьезоплатформы (уравнения 1—5), в основе которой лежат основные параметры её составных частей (пьезоактюаторы, подвижная и неподвижная части, и т.д.). Упрощённая схема для расчета математической модели пьезоплатформы представлена на рис. 5.

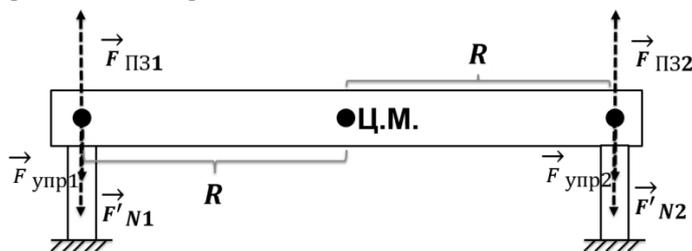


Рис. 5. Упрощенная схема для расчета математической модели пьезоплатформы

$$m_{\text{эф}} \frac{d^2 \Delta l_1(t)}{dt^2} = k_0 u_1(t) - c \Delta l_1(t) - F_{N1}(t); \quad (1)$$

$$m_{\text{эф}} \frac{d^2 \Delta l_2(t)}{dt^2} = k_0 u_2(t) - c \Delta l_2(t) - F_{N2}(t); \quad (2)$$

$$0,5 m_0 \cdot \frac{d^2 (\Delta l_1(t) + \Delta l_2(t))}{dt^2} = F_{N1}(t) + F_{N2}(t); \quad (3)$$

$$J_y \frac{d^2 \varphi_y(t)}{dt^2} = (F_{N1}(t) - F_{N2}(t)) \cdot R - k_{\text{демп}} \frac{d \varphi_y(t)}{dt}; \quad (4)$$

$$\varphi_y(t) = \frac{\Delta l_1(t) - \Delta l_2(t)}{2R}. \quad (5)$$

Где $m_{\text{эф}}$ — эффективная масса актюаторов;

c — жёсткость;

k_0 — коэффициент обратного пьезоэффекта;

$k_{\text{демп}}$ — коэффициент демпфирования;

R — расстояние от точек крепления штоков до центра переходной пластины;

J_y — момент инерции нагрузки вокруг соответствующей оси;

u_1, u_2 — управляющие напряжения;
 $\Delta l_1(t), \Delta l_2(t)$ — удлинения актюаторов;
 $\varphi_y(t)$ — угол поворота зеркала;
 $F_{N1}(t), F_{N2}(t)$ — силы реакции со стороны актюаторов [2].

В основе математической модели лежит уравнение движения пьезоактюатора, связывающее текущее удлинение, управляющее напряжение и развиваемое полезное усилие (формулы 1 и 2), уравнение движения центра масс (3) и вращательного движения (4) зеркала, которое вместе с переходной пластиной и штоками рассматривается на данном этапе как абсолютно твёрдое тело. Уравнение (5) выражает кинематическую связь угла поворота зеркала и удлинений первого и второго актюаторов [2]. Ниже (рис. 6) представлена схема модели в программном комплексе Matlab-Simulink и рассчитанная в нём логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЛАФЧХ), которая позволила предварительно оценить резонансную частоту платформы.

Здесь система дифференциальных уравнений представлена набором стандартных элементов из библиотеки Simulink. Simulink позволяет моделировать реакцию системы на входные воздействия, а так же оценить ЛАФЧХ системы (рис. 7).

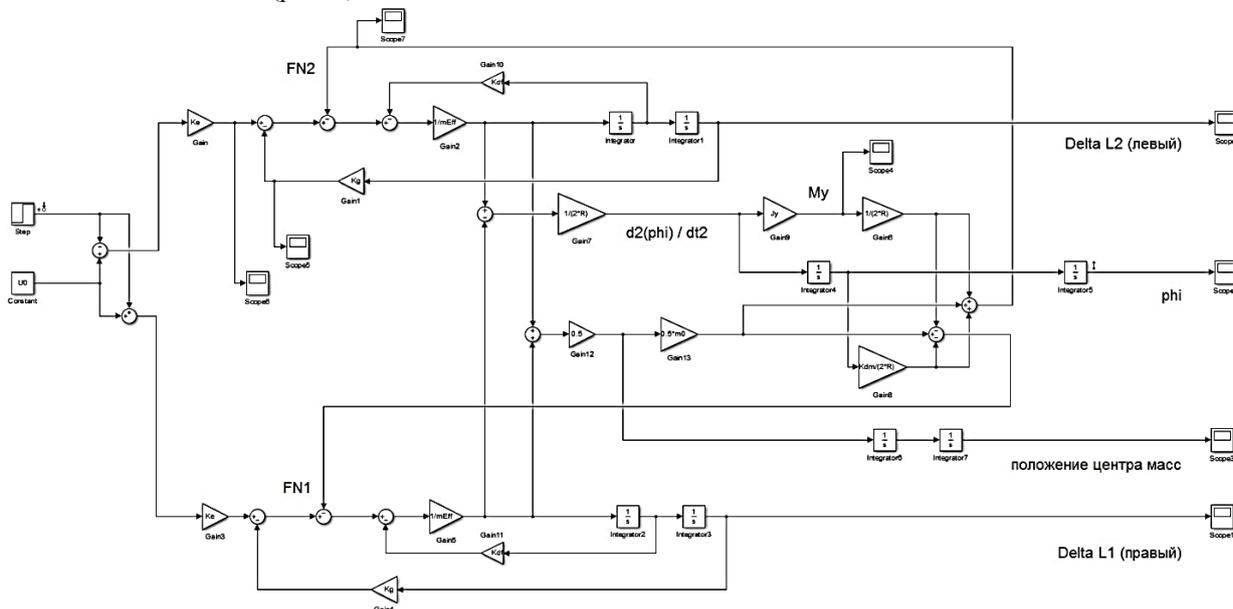


Рис. 6. Структурная схема математической модели пьезоплатформы в программе MatLab (Simulink)

Из графика видно, что в первом приближении наша система представляет собой колебательное звено, и ее резонансная частота составляет примерно 412 Гц.

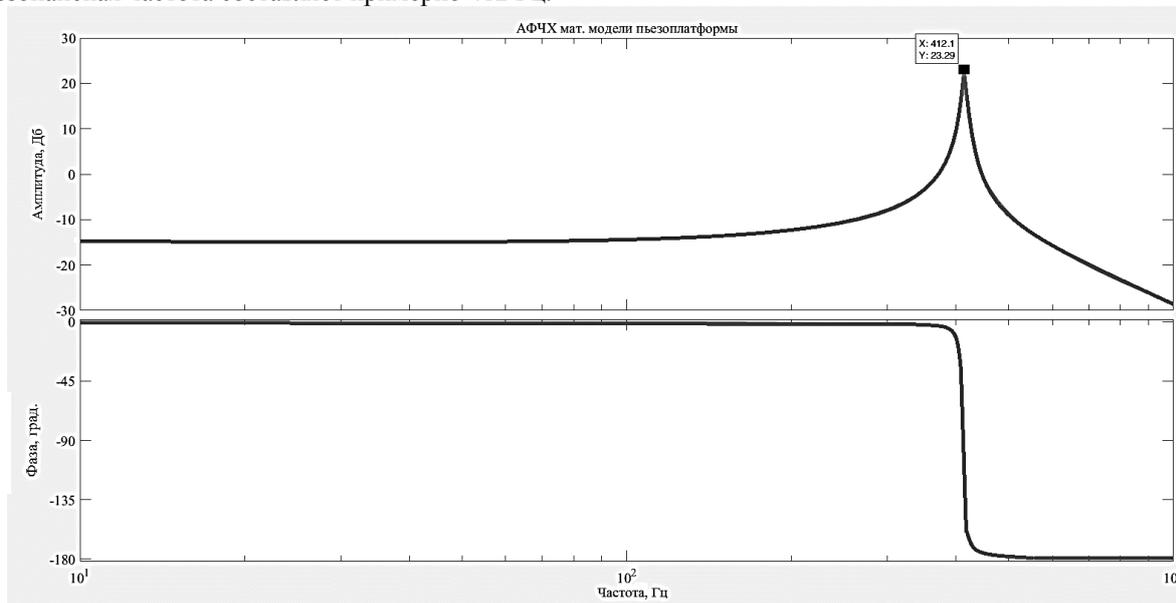


Рис. 7. ЛАФЧХ упрощенной математической модели пьезоплатформы

Синтез системы регулирования. Следующим этапом разработки изделия является синтез системы регулирования, которая необходима для обеспечения высокой точности позиционирования пьезоплатформы в условиях сильных вибрационных воздействий. Система построена так, что точность выполнения алгоритма функционирования пьезоплатформы обеспечивается без изменения возмущения, то есть коррективы в алгоритм управления вносятся по фактическому значению регулируемой величины.

На рис. 8 представлена упрощенная структурная схема системы регулирования пьезоплатформы с обратной связью.

Схема имеет вид замкнутой цепи, так как направление передачи воздействия в дополнительной связи обратно направлению передачи основного воздействия на пьезоплатформу, что и дает основание назвать представленный способ регулирования замкнутым.

В данной системе контролируется непосредственно управляющий сигнал и тем самым при выработке управляющего сигнала учитывается действие всех возмущений, влияющих на управляемую пьезоплатформу.

В соответствии с этими принципами воздействие на регулирующий орган пьезоплатформы вырабатывается как функция отклонения управляемого сигнала от сигнала, поступающего на вход сумматора.

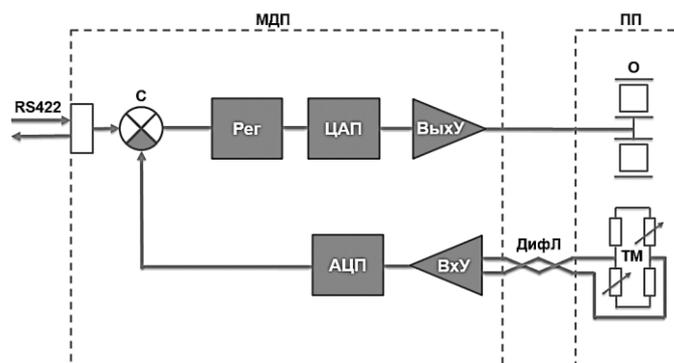


Рис. 8. Структурная схема замкнутой системы регулирования

Принцип работы составных частей представленной системы регулирования описан ниже.

МДП — модуль драйвера пьезопривода. Обеспечивает формирование сигнала управления ППП, а также анализирует данные, приходящие с тензодатчика. Обеспечивает управление исполнительным устройством, в том числе содержит цифровую реализацию системы регулирования.

ПП — пьезоплатформа, представляет собой двухкоординатную платформу точного позиционирования на базе пьезоэлектрических преобразователей (пьезозеркало).

RS422 — интерфейс, по которому осуществляется передача цифрового сигнала управления ППП.

С — сумматор — сравнивающее устройство, предназначено для сравнения заданного и действительного значения регулируемой величины. При этом вход сигнала помечен знаком «минус», то есть на устройство управления (регулятор) поступает разность двух сигналов — задающего и реального, поступающего с тензодатчика (ТД). Именно эта разность и представляет сигнал ошибки, на который должен реагировать регулятор.

Reg — регулятор — управляющее устройство, реализующее закон регулирования. В данном устройстве используется пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД регулятор). Каждый из элементов регулятора (пропорциональное, интегральное и дифференциальное звенья) выполняют свою задачу и оказывают свое специфическое воздействие на функционирование системы: пропорциональная составляющая регулирует текущую ошибку, дифференциальная — на тенденцию изменения ошибки, а интегральная — накапливает предыдущие ошибки и сглаживает высокочастотные шумы. Все эти компоненты складываются между собой и формируют управляющий сигнал, поступающий на вход цифро-аналогового преобразователя.

ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь преобразует сигнал управления из цифровой в аналоговую форму.

ВыхУ — выходной усилитель. Усиливает аналоговый сигнал, поступающий от ЦАПа, до нужного рабочего диапазона напряжения ППП.

О — ось, на которой находится два пьезоактюатора. Непосредственно в ППП располагается четыре пьезоактюатора, по два на каждой оси, что обеспечивает прецизионное позиционирование ППП по двум координатам.

ТМ — тензомост или мост Уитстона. Тензомост выступает в качестве датчика смещения пьезоактюаторов, при изменении сопротивления моста датчик преобразует результирующее напряжение в сигнал, пропорциональный смещению.

ДифЛ — дифференциальная линия. Данный способ передачи аналогового сигнала целесообразен тем, что он обеспечивает хорошую устойчивость к помехам. Основным видом шумов в данном устройстве является синфазная помеха — составляющая аналогового сигнала, присутствующая с одним знаком, амплитудой и фазой на всех рассматриваемых выводах.

ВхУ — входной усилитель. Представляет собой инструментальный усилитель (схема, состоящая из нескольких дифференциальных усилителей), с коэффициентом усиления порядка одной тысячи, на вход которого по дифференциальной линии поступает аналоговый сигнал с ТД.

АЦП — аналого-цифровой преобразователь. Преобразует усиленный сигнал с ТД в цифровую форму, необходимую для работы сумматора.

На основе данных, полученных путем математического моделирования (резонансная частота, запас системы по амплитуде и по фазе), был синтезирован регулятор. В качестве регулятора такой системы используется ПИД-регулятор. Пропорциональная составляющая (коэффициент усиления) повышает точность обработки сигнала, но ухудшает свойства устойчивости системы, интегральная составляющая позволяет подавить статическую ошибку, а дифференциальная — улучшает фазовый сдвиг и запас по фазе. Необходимо учесть и то, что при разработке ПП рабочая полоса пропускания входного усилителя делается на порядок выше, чем рабочая полоса пропускания системы, такое же условие должно выполнять и для выходного усилителя, при этом рабочая частота пропускания пьезоплатформы в основном определяется полосой пропускания системы актуаторов.

Схема управления пьезоплатформой реализована следующим образом: на базе ПЛИС фирмы Altera семейства Cyclone V разработана плата модуля драйвера пьезопривода (МДП). Данный модуль участвует в информационном обмене по интерфейсу RS-422. Минимальный шаг хода ограничен показаниями датчика обратной связи и составляет 0,001 угловой минуты. Максимальный ход разработанной платформы составляет примерно ± 3 угловых минуты.

На рис. 9 представлена ЛАФЧХ реальной системы с ПИД регулятором, с помощью которой оценивается устойчивость системы. Регулятор позволяет сместить характеристику объекта в рабочую область, где присутствует коэффициент усиления (ниже нуля коэффициент усиления отсутствует). Основной проблемой при замыкании системы с регулятором являются сильные провалы фазы в точках резонанса. В замкнутой системе необходимо обеспечить запас по фазе около 40° (разница между любой точкой ФЧХ и минус 180°). Если не обеспечивать необходимый запас по фазе в такой системе, сильно теряется точность обработки динамических сигналов задания положения пьезозеркала.

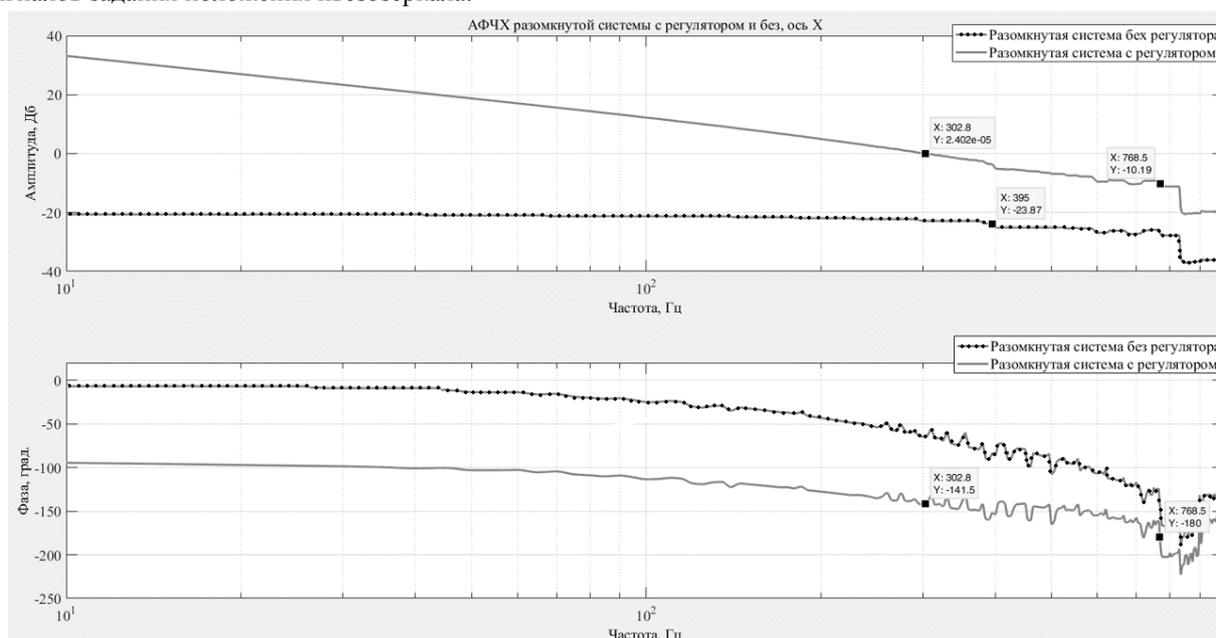


Рис. 9. ЛАФЧХ разомкнутой системы с регулятором и без, ось X

В разработанной платформе полоса рабочих частот косвенно ограничена частотой резонанса. При построении замкнутых систем регулирования есть негласное требование к объекту управления: его частота резонанса должна быть на 2 порядка выше рабочей полосы частот. Однако при построении реальных систем, такое требование зачастую является невыполнимым. Таким образом, чем дальше резонансная частота, тем проще, надежнее и точнее будет построена замкнутая система регулирования.

Выводы. В заключение хочется отметить, что пьезозеркало, а также разработанная система управления, основой для которой послужила представленная в данной работе математическая модель, успешно прошли испытания на первых опытных образцах, а изготовленные пьезоплатформы с САР уже применяются в составе серийных изделий. Одним из критериев настройки системы является ее устойчивость в широком диапазоне частот. В качестве основного инструмента, использованного для проведения анализа разомкнутой и замкнутой систем, а также для синтеза регулятора с требуемыми запасами устойчивости были использованы амплитудно-фазовые частотные и характеристики объекта регулирования.

Дополнительный механический узел (пьезозеркало) в ОЛС позволил значительно уменьшить тряску линии визирования. До применения пьезозеркала остаточная ошибка обработки составляла: среднее квадратичное отклонение (СКО) 18 угл. сек.; размах до 70 угл. сек. В усовершенствованной системе: СКО 2.7 угл. сек., размах до 16 угл. сек.

1. Военные применения лазеров: учебное пособие / В.А.Борейшо [и др.]; под ред. А.С.Борейшо. СПб., 2015. 103 с.
2. Панич А.Е. Пьезокерамические актюаторы: учебное пособие. Ростов-на-Дону: РГУ, 2008. 153 с.
3. Cedrat Technologies [Электр. ресурс]. URL: www.cedrat-technologies.com (дата обращения: 01.06.2018).

References

1. Boreysho V.A. et al. Voennie primeneniya laserov: uchebnoe posobie [Military applications of lasers]. Saint Petersburg, 2015. 103 p.
2. Panich A.E. Pezokeramicheskie aktyuatory: uchebnoe posobie [Piezoceramic actuators]. Rostov-on-Don, 2008. 153 p.
3. Cedrat Technologies. Available at: www.cedrat-technologies.com (accessed: 01.06.2018).

Silkov A.R. The system of precise guidance of laser radiation based on piezoelectric actuators. The article deals with the problems of stabilizing the line of sight under conditions of strong vibration effects. To improve the quality of stabilization, the fast piezo-mirror technology was developed, which enabled to work out the high-frequency component of the interference and to expand the operating frequency band. As a result, it was possible to significantly increase the accuracy characteristics of the system as a whole, in particular to reduce the residual error of working out more than 4 times.

Keywords: piezo-mirror, piezoactuator, optical-location station, control system.

Сведения об авторе. А.Р.Силков — магистрант группы 7032, направление 11.04.04 электроника и наноэлектроника, кафедра физики твердого тела и микроэлектроники, ИЭИС НовГУ; alsilkov@gmail.com.

Статья публикуется впервые. Поступила в редакцию 30.08.2018.