

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.Р.Силков, М.Н.Петров

STABILIZING THE SIGHT LINE UNDER CONDITIONS OF STRONG VIBRATION EFFECTS

A.R.Silkov, M.N.Petrov

Институт электронных и информационных систем НовГУ, alsilkov@gmail.com

Рассматриваются проблемы стабилизации линии визирования в условиях сильных вибрационных воздействий. Произведен анализ проблематики, в ходе которого была выявлена основная задача, которую необходимо решить: отработка высокочастотных помех, которые вызывают значительную тряску линии визирования. Для решения задачи повышения качества стабилизации за счет расширения рабочей полосы было решено разработать быстрое пьезо зеркало, которое позволит отработать высокочастотную составляющую помех. В данной работе представлены основные этапы разработки устройства. Важно отметить, что большой интерес вызывает синтез системы автоматического регулирования (САР) пьезоплатформы, в основе которого лежит принцип работы замкнутой системы управления. Основные этапы разработки САР изложены в данной статье. По итогам работы было разработано новое устройство, входящее в оптический тракт оптической системы, подверженной сильным вибрационным воздействиям. Дополнительный механический узел (пьезо зеркало) позволил значительно увеличить точностные характеристики системы в целом: удалось уменьшить остаточную ошибку обработки более чем в 4 раза.

Ключевые слова: пьезо зеркало, пьезоактюатор, оптическая система, система регулирования

This article deals with the problems of stabilizing the sight line under conditions of strong vibration effects. We analyzed the problems and revealed the main task to solve: the development of high-frequency interference which causes a significant shaking of the sight line. To improve the quality of stabilization due to expansion of the working band, we decided to develop a fast piezo mirror that will allow us to work out the high-frequency component of the interference. The main stages of the device development are presented in this paper. It is important to note that the synthesis of the automatic control system for the piezo platform, which is based on the principle of the closed-loop control system, is of great interest. This paper also presents the main stages of development of the automatic control system. As a result of the work, a new device was designed that is part of the optical path of an optical system subjected to strong vibration effects. The additional mechanical unit (piezo mirror) allowed us to significantly increase the accuracy characteristics of the system as a whole: it was possible to reduce the residual error of working out more than four-fold.

Keywords: piezo mirror, piezo actuator, optical system, control system

Постановка задачи

Одной из важнейших задач оптико-локационных систем является задача стабилизации линии визирования. Традиционно для ее решения используются электроприводы, которые обрабатывают поданные целеуказания с целью компенсации ошибок, возникающих от внутренних и внешних ви-

раций. Однако по мере развития аппаратных средств авионики выяснилось, что полоса частот возникающих вибраций в системе превышает возможности обработки электроприводами. Подтверждением сказанного может служить результат спектрального анализа широкополосного сигнала управления (рис.1), подаваемого на привод угла места оси сканера. Можно видеть, что в системе присутствует широкий

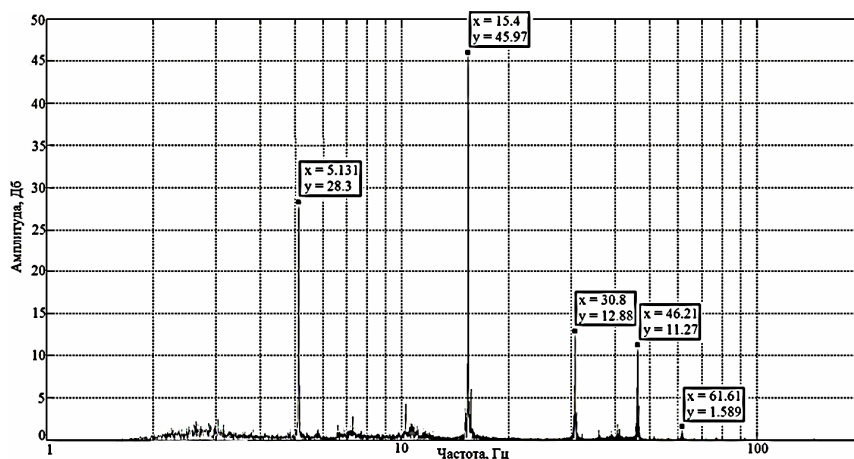


Рис.1. Гармонический состав входного воздействия системы стабилизации

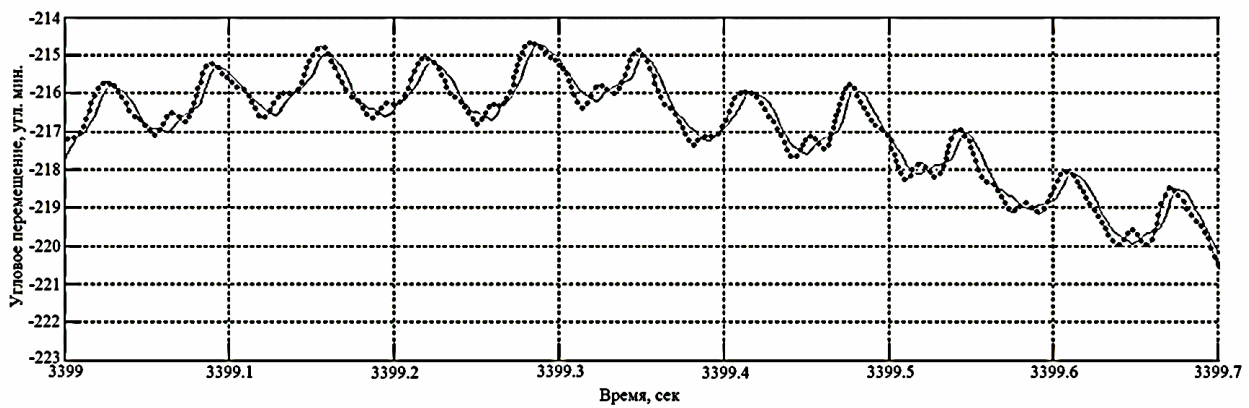


Рис.2. Сигнал управления (линия с точками), подаваемый на УМ привод оптической системы в режиме гиросtabilизации и сигнал его отработки (сплошная линия)

спектр колебаний, наиболее значительные из которых наблюдаются на частотах 5, 15, 30, 45, 60 Гц. Для стабилизации линии визирования необходима их компенсация.

На рис.2 представлен график отработки данного входного воздействия. Видно, что низкочастотные колебания (примерно до 15 Гц) могут быть отработаны системой электроприводов достаточно точно. Однако высокочастотные составляющие вызывают ошибку отработки, остаточная величина которой — порядка 70 угловых секунд в размахе, что вызывает смещение изображения на величину порядка 7-8 пикселей.

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что для повышения качества стабилизации изображения необходимо изыскать дополнительные средства, которые позволили бы снизить остаточную ошибку отработки входного воздействия до нескольких угловых секунд, а также расширить рабочую полосу частот. В данной работе для решения этой задачи было решено разработать дополнительный механический узел с подвижным зеркалом.

Алгоритм разработки

На начальном этапе разработки осуществлен синтез математической модели дополнительного механического узла с подвижным зеркалом (пьезоплатформы), в основе которого лежат основные параметры разрабатываемого устройства. Это необходимо для предварительной оценки динамических свойств системы.

Вторым этапом разработки является синтез регулятора, производимого на основе разработанной обобщенной математической модели.

Заключительный этап посвящен реализации опытного образца смоделированной ранее системы.

Формирование математической модели пьезоплатформы

Для оптимизации процедуры проектирования будущей пьезоплатформы была синтезирована ее математическая модель на базе приведенной на рисунке 3 упрощенной схемы разрабатываемого устройства.

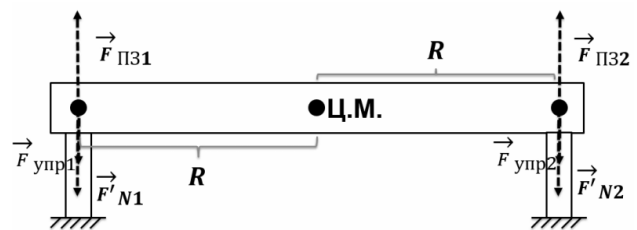


Рис.3. Упрощенная схема, используемая для синтеза математической модели пьезоплатформы

В основе математической модели лежит система из пяти дифференциальных уравнений (1-5), каждое из которых предназначено для моделирования одной из ее составных частей [1].

Выражения (1) и (2) предназначены для моделирования работы пьезоактюаторов. Они позволяют связать текущее удлинение, управляющее напряжение и развиваемое полезное усилие. Уравнения (3) и (4) использованы для моделирования движения центра масс и вращательного движения зеркала соответственно. Для их вывода использовано допущение о том, что зеркало, переходная пластина и штоки, которые служат для преобразования линейных перемещений пьезоактюаторов в угловое перемещение зеркала, рассматриваются на данном этапе как абсолютно твердое тело. Уравнение (5) отражает кинематическую связь угла поворота зеркала и удлинений первого и второго актюаторов [2].

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

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

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

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

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

где $m_{\text{эф}}$ — эффективная масса актюаторов; c — жёсткость; k_0 — коэффициент обратного пьезоэффекта; $k_{\text{дем}}$ — коэффициент демпфирования; R — расстоя-

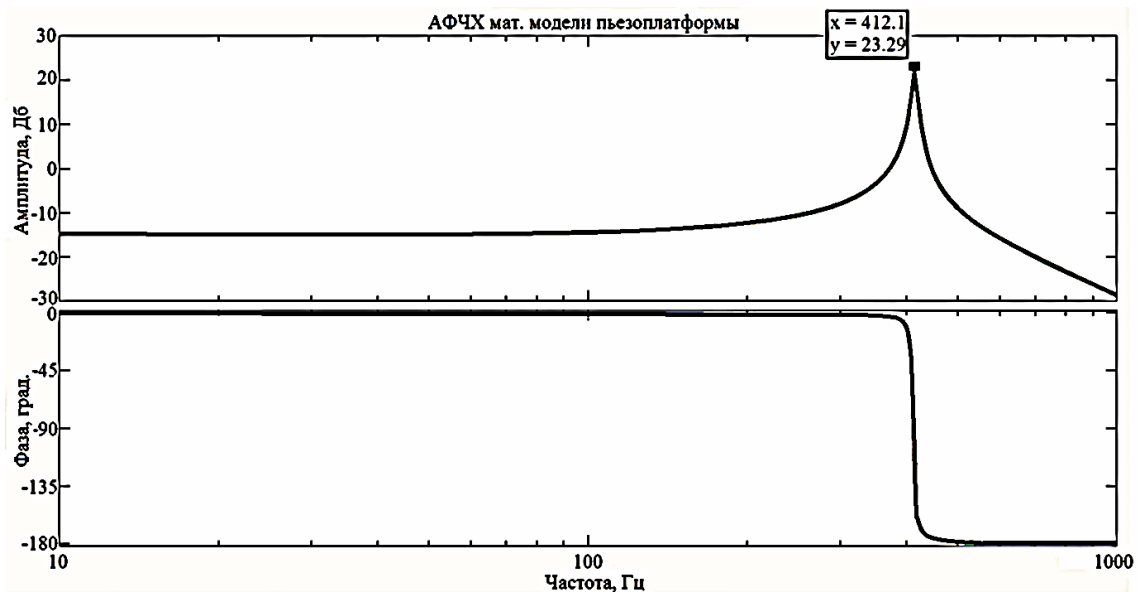


Рис.4. ЛАФЧХ упрощенной математической модели пьезоплатформы

ние 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.

Моделирование работы пьезоплатформы осуществлялось в среде программного комплекса Matlab-Simulink. Приведенные на рис.4 результаты расчета логарифмической амплитудной и фазовой частотных характеристик (ЛАФЧХ) позволили рассчитать резонансную частоту платформы, равную 412 Гц, значение которой позволило оценить рабочую полосу частот разрабатываемой конструкции.

Можно сделать вывод, что практическая реализация пьезоплатформы позволит значительно увеличить точностные характеристики оптической системы.

Синтез системы регулирования

Следующим этапом разработки изделия является синтез системы регулирования, которая необходима для обеспечения высокой точности позиционирования пьезоплатформы в условиях сильных вибрационных воздействий.

На рис.5 представлена упрощенная структурная схема разработанной системы регулирования пьезоплатформы с обратной связью.

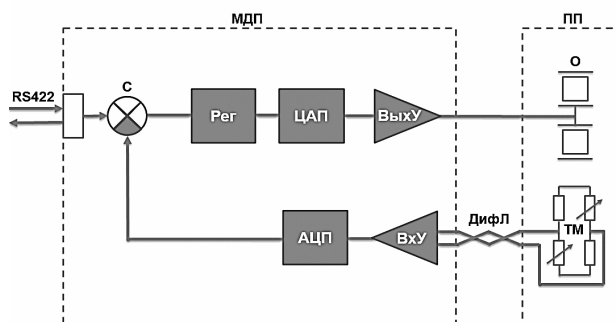


Рис.5. Структурная схема замкнутой системы регулирования

Схема имеет вид замкнутой цепи, в которой направление передачи воздействия в дополнительном звене (АЦП, ВхУ) обратно направлению передачи основного воздействия на пьезоплатформу (Рег, ЦАП, ВыхУ), что и дает основание назвать представленный способ регулирования замкнутым.

В данной системе контролируется непосредственно управляющий сигнал и тем самым при его выработке 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 (С).

Модуль драйвера пьезопривода (МДП) обеспечивает формирование сигнала управления пьезоплатформой, который формируется с помощью управляющей команды, поступающей по последовательному дифференциальному интерфейсу RS422. В нем также выполняется анализ данных, поступающих с датчиков обратной связи (тензорезисторов), на базе которого обеспечивается управление исполнительным устройством (в виде цифровой реализации системы регулирования).

Регулятор (Рег) представляет собой управляющее устройство, реализующее закон регулирования. В данном случае используется ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) регулятор. Каждый из его элементов выполняет свою задачу, оказывая специфическое воздействие на функционирование системы: пропорциональная составляющая регулирует текущую ошибку, дифференциальная реагирует на тенденцию изменения ошибки, улучшая фазовый сдвиг и запас по фазе, а интегральная — накапливает предыдущие ошибки и сглаживает высокочастотные шумы. Все эти компоненты складываются между собой (С) и формируют управляющий сигнал, поступающий на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Аналоговый сигнал, поступающий от ЦАП, необходимо усилить до нужного рабочего диапазона напряжения пьезоплатформы (ПП). Для этой цели используется выходной усилитель (ВыхУ).

Пьезоплатформа представляет собой двухкоординатную платформу, на каждой из осей (О) которой находится два пьезоактюатора (четыре на всю ПП), что обеспечивает прецизионное позиционирование ПП по двум координатам.

Точность позиционирования обеспечивается наличием обратной связи. В качестве датчиков обратной связи используется тензомост (ТМ) или мост Уитстона. ТМ выступает в качестве датчика смещения пьезоактюаторов. При изменении сопротивления моста датчик преобразует результирующее напряжение в сигнал, пропорциональный смещению.

Полученный с ТМ сигнал обратной связи передается по дифференциальной линии (ДифЛ) в МЦП, где в свою очередь усиливается входным инструментальным усилителем (ВхУ) с коэффициентом усиления порядка одной тысячи.

Чтобы замкнуть обратную связь усиленный аналоговый сигнал с ТМ необходимо преобразовать в цифровой вид, для чего использован аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Практическая реализация

Для отработки остаточной ошибки до нескольких угловых минут в более широкой полосе частот было решено разработать дополнительный механический узел с подвижным зеркалом.

На рис.6 представлена габаритная модель подвижного зеркала. Максимально облегченное бериллиевое зеркало устанавливается на переходную пластину, которая в свою очередь устанавливается на две пары актюаторов 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.

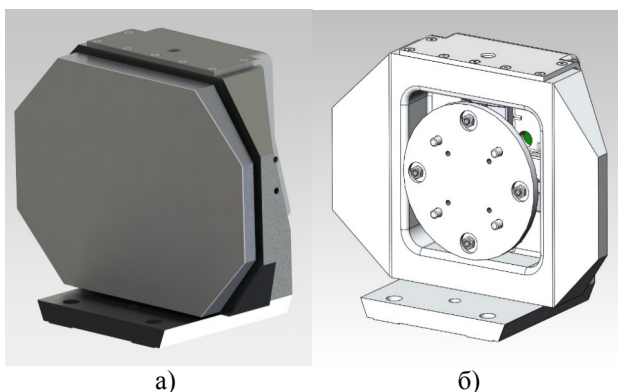


Рис.6. Пьезоплатформа: а — общий вид; б — неподвижная часть пьезоплатформы

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 широким спектром преимуществ по сравнению со стандартными электроприводами:

- нелимитированные 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 [1];

- 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.7).

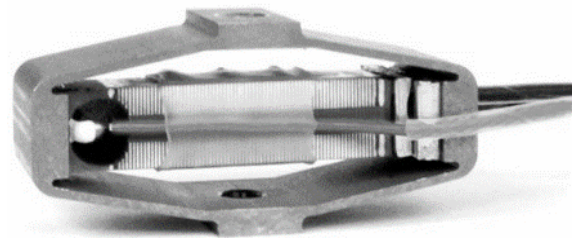


Рис.7. Пьезоактюатор APA60SM (CedratTechnologies, Франция) [2]

Для реализации 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 таблице.

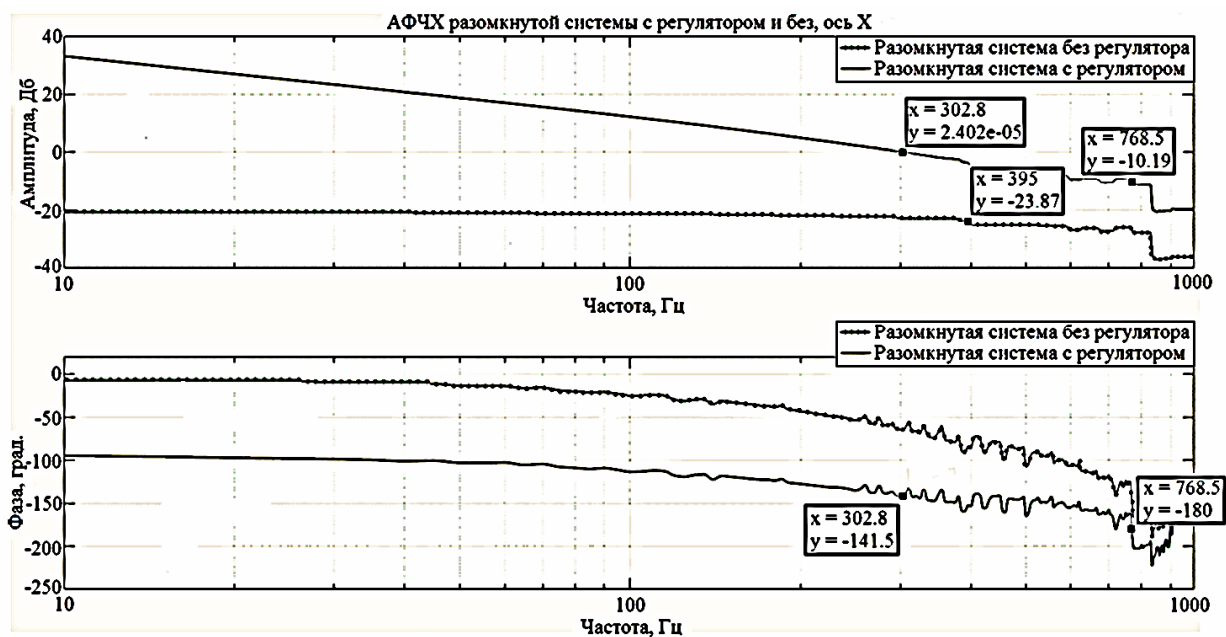


Рис.8. ЛАФЧХ разомкнутой системы с регулятором и без, ось X

Характеристики пьезоактюатора АРА60SM [2]

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

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.8 представлена ЛАФЧХ реальной системы с ПИД регулятором, с помощью которой оценивается устойчивость системы. Регулятор позволяет сместить характеристику объекта в рабочую область, где система обладает высоким коэффициентом усиления (вне рабочей области 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°). В противном случае происходит значительная потеря точности отработки динамических сигналов, управляющих положением пьезозеркала.

Из графика видно, что разработанная ПИД удовлетворяет всем условиям корректной работы, а имен-

но: имеет необходимый запас по фазе (около 40°) и амплитуде (10 Дб), рабочая полоса частот (порядка 100 Гц) лежит вне частоты резонанса.

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 оптической системе позволил значительно уменьшить тряску линии визирования. До применения пьезозеркала остаточная ошибка отработки 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. Панич А.Е. Пьезокерамические актюаторы: учебное пособие. Ростов-на-Дону: РГУ, 2008. 153 с.
2. Cedrat Technolodjis [Эл. ресурс]. URL: www.cedrat-technologies.com

References

1. Panich A.E. P'ezokeramicheskie aktiatory [Piezoceramic actuators]. Rostov-on-Don, RSU Publ., 2008. 153 p.
2. Cedrat Technologies. Available at: www.cedrat-technologies.com