

ОПТИКО-ЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА С КРУГОВОЙ ЗОНОЙ ПОИСКА: АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ

© 2009 г. М. Ф. Борисов; М. Ф. Данилов; А. А. Максимов; Н. Г. Мотылев, канд. техн. наук; Н. И. Павлов, доктор техн. наук; А. Я. Прилипко; С. В. Телятников; А. Л. Чилипенко

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: contact@niiki.ru

Рассматривается оптико-локационная система с круговой зоной поиска, способная осуществлять обнаружение объектов по радиационному контрасту и их допоиск по отраженному лазерному излучению, циклическое сопровождение выделенных объектов с построением оптимальной траектории сканирования, захват приоритетного объекта и его точное сопровождение. Подвижные оптико-механические узлы снабжены блоками управления, имеют датчики текущего состояния и цифровые электроприводы, что позволяет программно перестраивать функции системы. Предложен и реализован метод управления исполнительными устройствами, основанный на использовании генератора траекторных заданий. Представлены результаты, характеризующие точность выполнения траекторных заданий электроприводами исполнительных устройств.

Ключевые слова: оптико-локационная система поиска, лазерный локатор, теплопеленгатор.

Коды OCIS: 220.4830, 280.3400, 120.1880

Поступила в редакцию 06.03.2009

Лазерные локационные системы поиска, обнаружения и сопровождения объектов с определением их пространственных координат и скорости относятся к важнейшим средствам получения информации об окружающей обстановке. Это обуславливается их разнообразными практическими применениями, включая контроль воздушного пространства в ближней зоне, навигацию и управление движением, предупреждение столкновений и др. [1, 2]. Часто лазерные локационные средства используются вместе с другими средствами поиска, в частности, теплопеленгаторами, которые осуществляют выдачу азимутальных и угломестных координат для наведения луча оптического локатора на объекты. Объединение пассивных и активных каналов получения информации в одной оптико-локационной системе способствует более успешному комплексному решению задачи. В работе [3] предложен вариант построения многофункциональной оптико-локационной системы с круговой зоной поиска. Предложенная схема позволяет совместить функции каналов кругового поиска, захвата и пассивного сопровождения объекта в едином устройстве; совмещены

также в едином блоке приемные каналы теплопеленгатора и лазерного локатора. Подвижные оптико-механические узлы снабжены блоками управления, имеют высокоточные угловые датчики текущего состояния и программируемые электроприводы, что позволяет перестраивать функции системы в соответствии с решаемыми ею задачами. Совокупность задач, решаемых оптико-локационной системой, включает:

- круговой поиск и обнаружение объектов в пассивном режиме по радиационному контрасту,
- допоиск выделенных объектов путем моноимпульсной лазерной локации непосредственно в процессе их пассивного поиска,
- циклическое сопровождение выделенных объектов с построением оптимальной траектории сканирования,
- определение местоположения и скоростей движущихся объектов,
- захват и точное сопровождение движущегося объекта, при котором оптическая ось системы совмещается с направлением на объект. Исполнение функций кругового поиска, обнаружения, сопровождения (циклического и точного с захватом

выделенного объекта), определения координат и скорости объектов обеспечивается аппаратно-программным комплексом оптико-локационной системы. Последний представляет собой распределенную командно-информационную систему (рис. 1), предназначенную для обработки получаемых оптико-локационных данных и управления локальными исполнительными устройствами.

Настоящая работа посвящена решению проблемы управления многофункциональной оптико-локационной системой, один из вариантов которой описан в работе [3]. В статье рассматривается алгоритм формирования команд управления, который обеспечивает в каждый момент времени позиционирование подвижных оптико-механических элементов с ошибками

не выше допустимых. Приводится описание структуры аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего реализацию предложенного алгоритма управления. Представлены результаты, характеризующие точность выполнения траекторных заданий исполнительными устройствами оптико-локационной системы.

Блок-схема и алгоритм функционирования оптико-локационной системы

На рис. 1 представлена блок-схема оптико-локационной системы, в которой в отличие от системы, описанной в работе [3], теплопеленгатор и лазерный локатор работают в разных

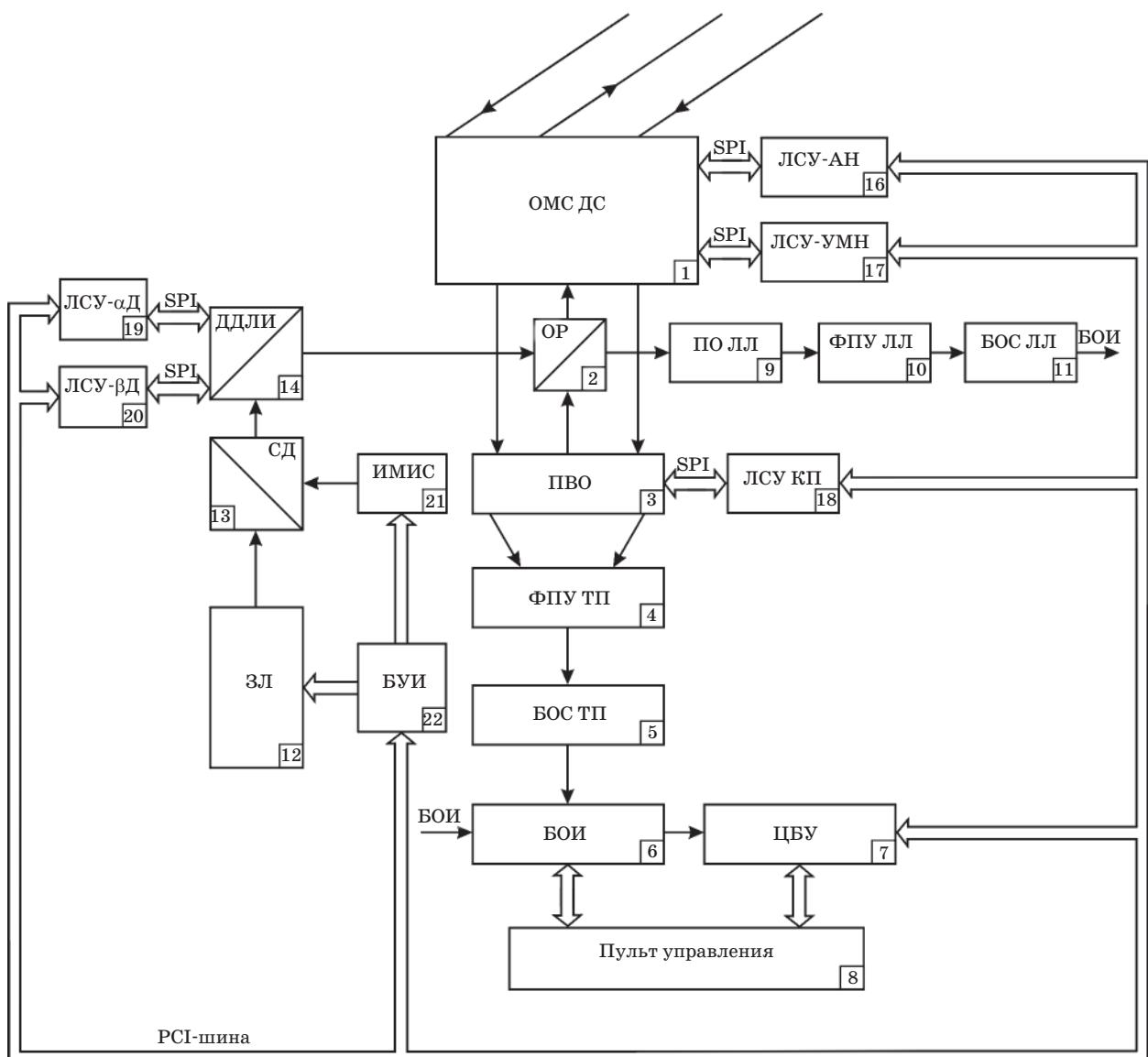


Рис. 1. Блок-схема оптико-локационной системы.

спектральных диапазонах. Соответственно приемные блоки теплопеленгатора (ТП) и лазерного локатора (ЛЛ) имеют раздельное исполнение. В схему введен оптический разветвитель (ОР), осуществляющий осевое совмещение апертур излучающего лазерного и приемных лазерного и теплопеленгационного каналов. Используется приемный вращающийся объектив (ПВО) оригинальной конструкции со спектрорделительным зеркалом на задней поверхности входной линзы. Он в связке с оптическим разветвителем позволяет пространственно разделить принимаемые пучки лазерного и теплового излучений.

На рис. 1 используются следующие обозначения: ОМС-ДС – оптико-механическая схема двухкоординатного сканирования, ЛСУ-АН – локальная система управления азимутальным наведением, ЛСУ-УМН – локальная система управления угломестным наведением, ЛСУ-КП – локальная система управления компенсатором поворота изображения, ЛСУ-αД и ЛСУ-βД – локальные системы управления по α -координате и β -координате дефлектора лазерного излучения (ДДЛИ), ЗЛ – зондирующий лазер, ИМИС – импульсный многоспектральный источник света, СД – светоделитель, ПО – приемный объектив, ФПУ – фотоприемное устройство, БОС – блок первичной обработки сигналов, БОИ – блок вторичной обработки информации, БУИ – блок управления излучателями, ЦБУ – центральный блок управления.

Функционирование оптико-локационной аппаратуры происходит следующим образом [3]. Теплопеленгатор, имеющий многоэлементную “ножевую” диаграмму направленности, осуществляет сканирование заданной зоны верхней полусферы по разворачивающейся спирали, регистрируя радиационные характеристики точек контролируемого пространства. Получаемый массив информации сравнивается в реальном времени с записанными данными предыдущего цикла поиска. При выявлении радиационной флюктуации шаг спиральной развертки корректируется таким образом, чтобы выявленная точка пространства попала в диаграмму направленности лазерного локатора. Приход отраженного импульса лазерного излучения от выделенной точки пространства является сигналом подтверждения наличия в ней объекта, а времененная задержка сигнала дает дальность до него.

Управляющая программа может перевести оптико-локационную систему из режима поиска объекта в режим его циклического сопровождения (слежения). В этом случае сигнал отметки

объекта обновляется с частотой азимутального сканирования. В общем случае для циклического слежения за несколькими объектами может быть выбрана более сложная траектория с быстрыми вариациями положения оптической оси по углу места в процессе азимутального сканирования.

Для перехода в режим захвата и точного сопровождения (оптическая ось системы в этом случае совмещается с направлением на выбранный объект) осуществляется быстрое торможение азимутального привода с коррекцией по углу места и раскруткой компенсатора поворота изображения приемного канала. К моменту завершения торможения в окрестности выбранной точки пространства теплопеленгатор из режима кругового поиска переходит в режим секторного обзора с радиальной разверткой контролируемого поля. По сигналам теплопеленгатора осуществляется совмещение местоположения объекта с диаграммой направленности лазерного локатора, который при захвате цели переходит в режим автосопровождения объекта.

Метод управления с использованием генератора траекторных заданий

Решение проблемы синхронного динамического управления исполнительными устройствами предполагает разработку и реализацию алгоритма формирования команд управления, который должен обеспечить в каждый момент времени позиционирование подвижных оптико-механических элементов оптико-локационной системы с ошибками не выше допустимых. Ниже предлагается метод управления, основанный на использовании уравнения Кирхгофа для напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя постоянного тока [4]

$$U_d(t) = C_e [\dot{\phi}(t) + T_m (\ddot{\phi}(t) + \ddot{\phi}_{tr}) + T_e T_m \ddot{\phi}(t)]. \quad (1)$$

В уравнении (1) использованы следующие обозначения: C_e и T_e – коэффициент ЭДС и электромагнитная постоянная электродвигателя, T_m – электромеханическая постоянная электропривода с нагрузкой, ϕ , $\dot{\phi}$, $\ddot{\phi}$ – соответственно угловая скорость вращения электродвигателя и ее производные по времени t , $\ddot{\phi}_{tr}$ – эквивалентное угловое ускорение, обусловленное моментом трения привода. Параметры C_e , T_e и T_m известным образом выражаются через противо-ЭДС электродвигателя, сопротивление, индуктивность и ток в якорной цепи. Предполагаем, что момент инерции ротора электродвигателя много меньше совокупного момента инерции привода.

Колебательными процессами, обусловленными конечным значением жесткости механической связи ротора с нагрузкой, пренебрегаем. Основная идея управления сводится к тому, чтобы с помощью уравнения (1) сформировать управляющий сигнал $U_d(t)$, который обеспечивает требуемую траекторию движения электропривода $\varphi(t)$ с минимизацией ошибок, возникающих из-за непрогнозируемых внешних возмущений и ограниченной точности измерения учитываемых параметров.

Для реализации цифрового устройства управления приводом часто используют трехконтурную систему подчиненного регулирования (например, [5–7]). При этом внешний, средний и внутренний контуры являются контурами регулирования углового положения, угловой скорости и тока в обмотках двигателя с соответствующими датчиками обратной связи. Авторами предлагается другой подход к синтезу управляющего напряжения U_d , позволяющий упростить вычислительные процедуры и увеличить частоту сервовычислений с нескольких килогерц до нескольких десятков килогерц. Предлагаемый подход имеет следующие особенности. При синтезе управляющего напряжения используются не спектральные образы исполняемой траектории φ_d и напряжения U_d , а их оригиналы. В состав управляющей системы включается генератор траекторных заданий, который формирует дискретную по времени координатную последовательность $\varphi_r^{(n)} = \varphi_r(nt_1)$ (n – целые числа, t_1 – значение дискрета времени), и соответствующие последовательности производных $\dot{\varphi}_r^{(n)}, \ddot{\varphi}_r^{(n)}, \dddot{\varphi}_r^{(n)}$. При этом задаваемая траектория $\varphi_r(t)$ формируется с требуемой точностью в виде кусочно-непрерывной функции. Применяется алгоритм асимптотического приближения исполняемой траектории $\varphi_d(t)$ к заданной $\varphi_r(t)$.

В момент начала движения состояние привода и генератора траектории одинаковы: $\varphi_d(0) = \varphi_r(0)$, $\dot{\varphi}_d(0) = \dot{\varphi}_r(0)$, $\ddot{\varphi}_d(0) = \ddot{\varphi}_r(0)$. При запуске генератора траекторных заданий управляющее напряжение формируется в следующем виде:

$$U_d^{(n)} = U_0 + U_1^{(n)} + U_2^{(n)} + U_3^{(n)}, \quad (2)$$

$$U_0 = C_e T_m \ddot{\varphi}_{mp}, \quad U_1^{(n)} = C_e \dot{\varphi}_r^{(n)}, \quad (3)$$

$$U_2^{(n)} = C_e T_m \ddot{\varphi}_r^{(n)}, \quad U_3^{(n)} = C_e T_e T_m \ddot{\varphi}_r^{(n)}.$$

Фактически формулы (2) и (3) описывают регулятор с разомкнутой обратной связью. Для синтеза обратной связи используется алгоритм асимптотического приближения исполняемой

траектории $\varphi_d(t)$ к задаваемой $\varphi_r(t)$. Указанный алгоритм реализуется в следующей последовательности. По меткам времени, совпадающим с началом дискрета времени t_1 , датчики углового положения, скорости и ускорения формируют отсчеты $\varphi_d^{(n)}, \dot{\varphi}_d^{(n)}, \ddot{\varphi}_d^{(n)}$. С использованием измеренных данных вычисляются сигналы ошибок, определяющие рассогласование между заданным и действительным состоянием привода,

$$\Delta\varphi^{(n)} = \varphi_r^{(n)} - \varphi_d^{(n)}, \quad \Delta\dot{\varphi}^{(n)} = \dot{\varphi}_r^{(n)} - \dot{\varphi}_d^{(n)},$$

$$\Delta\ddot{\varphi}^{(n)} = \ddot{\varphi}_r^{(n)} - \ddot{\varphi}_d^{(n)}.$$

Для некоторого интервала времени $t_k = kt_1$ ($k \gg 1$) вычисляются прогноз ошибки $\Delta\varphi^{(n+k)}$ в отсутствие сигнала коррекции и параметр коррекции привода $\ddot{\varphi}_k^{(n)}$ такой, при котором прогнозируемая ошибка $\Delta\varphi^{(n+k)} = 0$,

$$\Delta\ddot{\varphi}_k^{(n)} = \frac{6}{t_k^3} \Delta\varphi^{(n)} + \frac{6}{t_k^2} \Delta\dot{\varphi}^{(n)} + \frac{3}{t_k} \Delta\ddot{\varphi}^{(n)}. \quad (4)$$

Можно считать, что на протяжении дискрета времени t_1 (будем полагать, что $t_1 \ll T_e \ll T_m$) скорость нарастания тока (первая производная по времени) является постоянной величиной. Соответственно напряжение коррекции будет определяться величиной

$$\Delta U_k^{(n)} = C_e T_e T_m \Delta\ddot{\varphi}_k^{(n)}, \quad (5)$$

где параметр коррекции $\ddot{\varphi}_k^{(n)}$ задается формулой (4). В следующем, $(n+1)$, временном дискрете описанные процедуры повторяются, и точка “прицеливания” к заданной траектории сдвигается на интервал t_1 , реализуя тем самым асимптотическое сближение траекторий $\varphi_d(t)$ и $\varphi_r(t)$. Аналогичное выражение для напряжения коррекции может быть получено для случая $t_1 \gg T_e$.

Вычислительные процедуры (2)–(5) определяют три контура регулирования с обратной связью по угловому положению, скорости и ускорению. Оценка параметра t_k , которая необходима для синтеза напряжения коррекции, может быть получена численными методами.

Таким образом, для реализации предложенного алгоритма структура исполнительной системы оптико-локационной аппаратуры должна содержать в своем составе центральный блок управления, осуществляющий синхронное вычисление траекторных параметров $\varphi_i^{(n)}, \dot{\varphi}_i^{(n)}, \ddot{\varphi}_i^{(n)}, \dddot{\varphi}_i^{(n)}$ для всех исполнительных устройств, и локальные системы управления, формирующие в моменты времени $t^{(n)} = nt_1$ сигналы управления $U_d^{(n)}$ электродвигателем. В состав ЛСУ должны также

входить измерители рассогласований привода по углу, скорости и ускорению (поскольку точных измерителей $\Delta\phi^{(n)}$ как правило не существует, на практике приходится ограничиваться первыми двумя).

На практике сигнал управления электродвигателем удобнее представлять следующей суммой из 6 компонент $U_{di}^{(n)}$ ($i = 1, \dots, 6$):

$$U_{di}^{(n)} = \sum_{i=1}^6 U_{di}^{(n)} = A_1 \ddot{\phi}_{mp} + A_2 \dot{\phi}_r^{(n)} + A_3 \ddot{\phi}_r^{(n)} + A_4 \Delta\phi^{(n)} + A_5 \Delta\dot{\phi}^{(n)} + A_6 \sum_n \Delta\phi^{(n)}. \quad (6)$$

Назначение компонент $U_{di}^{(n)}$ следующее: $U_{d1}^{(n)}$ – компенсирует момент трения при начале движения привода, $U_{d2}^{(n)}$ – компенсирует противо-ЭДС двигателя при заданной скорости вращения $\dot{\phi}_r^{(n)}$, $U_{d3}^{(n)}$ – обеспечивает вращение вала двигателя с текущим заданием по ускорению $\ddot{\phi}_r^{(n)}$, $U_{d4}^{(n)}$ – компенсирует угловое рассогласование текущих координат с траекторным заданием, $U_{d5}^{(n)}$ – компенсирует рассогласование скорости привода и ее задания от генератора траекторий, $U_{d6}^{(n)}$ – исправляет систематические ошибки системы управления. Коэффициенты A_1, A_2 и A_3 вычисляются по результатам тестирования реального привода при ступенчатом воздействии по графикам тока и скорости $\dot{\phi}_d^{(n)}$. Коэффициенты A_4, A_5 и A_6 определяются методом математического моделирования с учетом результатов тестирования при ступенчатом воздействии. Более точная настройка осуществляется путем вариации полученных значений коэффициентов A_4, A_5 и A_6 с минимизацией графиков ошибок $\dot{\phi}_d^{(n)}$.

Реализация метода управления

Структура аппаратно-программного комплекса оптико-локационной аппаратуры включает две полуавтономные системы, выполненные на базе промышленного компьютера (RACK-305G) с двумя процессорными платами и обменом данными между платами по интерфейсу "Ethernet". Система 1 предназначена для цифрового преобразования, ввода и обработки информации теплопеленгационного и лазерного локационного каналов. Из блоков, приведенных на рис. 1, в ее состав входят: БОС ТП, БОС ЛЛ, БОИ. Система 2 обеспечивает управление оптико-механическими и оптико-электронными исполнительными устройствами. В ее состав входят: ЦБУ, ЛСУ-АН, ЛСУ-УМН, ЛСУ-КП, ЛСУ-αД, ЛСУ-βД, БУИ.

Блок первичной обработки сигналов теплопеленгатора преобразует аналоговые сигналы в цифровые, нормирует их, выделяет сигналы объектов и вводит полученные данные в блок вторичной обработки информации. Блок вторичной обработки информации формирует отображение теплопеленгационных и локационных данных в единой системе координат, завязывает трассы (траектории) движения выделенных объектов и транслирует в ЦБУ их координатные последовательности. Наведение зондирующего лазерного пучка в точку местоположения объекта, выделенного теплопеленгатором, осуществляется по командам ЦБУ в БУИ и блок управления вращением зеркал ДДЛИ (рис. 1).

В ЦБУ синхронно с данными о координатах объектов, поступающими из блока вторичной обработки информации, транслируются данные датчиков о текущем состоянии оптико-механических узлов оптико-локационной системы. ЦБУ с учетом текущего рабочего режима и координат объектов формирует функционально связанные траекторные задания и транслирует их в ЛСУ. Обмен данными между ЦБУ и ЛСУ осуществляется по шине PCI через платы сопряжения (контроллеры) типа ЛИР905. Частота обмена задается генератором тактовых импульсов и установлена равной 200 Гц (значение дискрета времени $t_2 = 5$ мс). На каждой из плат сопряжения монтируется по два модуля управления, выполненных на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) "Cyclone-III" фирмы Altera. В ПЛИС осуществляется вычисление сигналов ШИМ – управления цифровыми электроприводами исполнительных устройств. ПЛИС работает в дискретах времени $t_1 = 40$ мкс. ПЛИС с дискретностью t_1 вычисляет угловые положения и скорости вращения валов исполнительных устройств, экстраполирует на текущий момент t траекторные параметры, полученные от ЦБУ в дискретах времени $t_2 = 5$ мс, вычисляет угловые рассогласования между заданными и реальными угловыми положениями и скоростями, формирует коды с результатами вычисления сигналов управления и транслирует их (в протоколе SPI) в адреса цифровых драйверов управления электродвигателей, интегрированных с управляемыми источниками питания. На рис. 2 представлен вариант исполнения унифицированного цифрового привода, включающего в себя цифровой драйвер и программируемый источник питания. Обмен данными между модулем управления и цифровым драйвером двухсторонний, ответный сигнал несет информацию о текущем значении тока

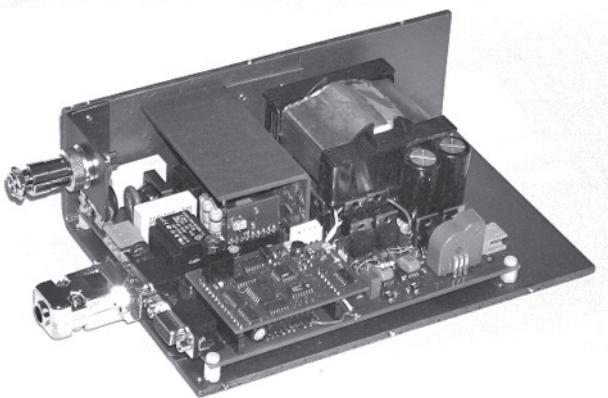


Рис. 2. Цифровой привод.

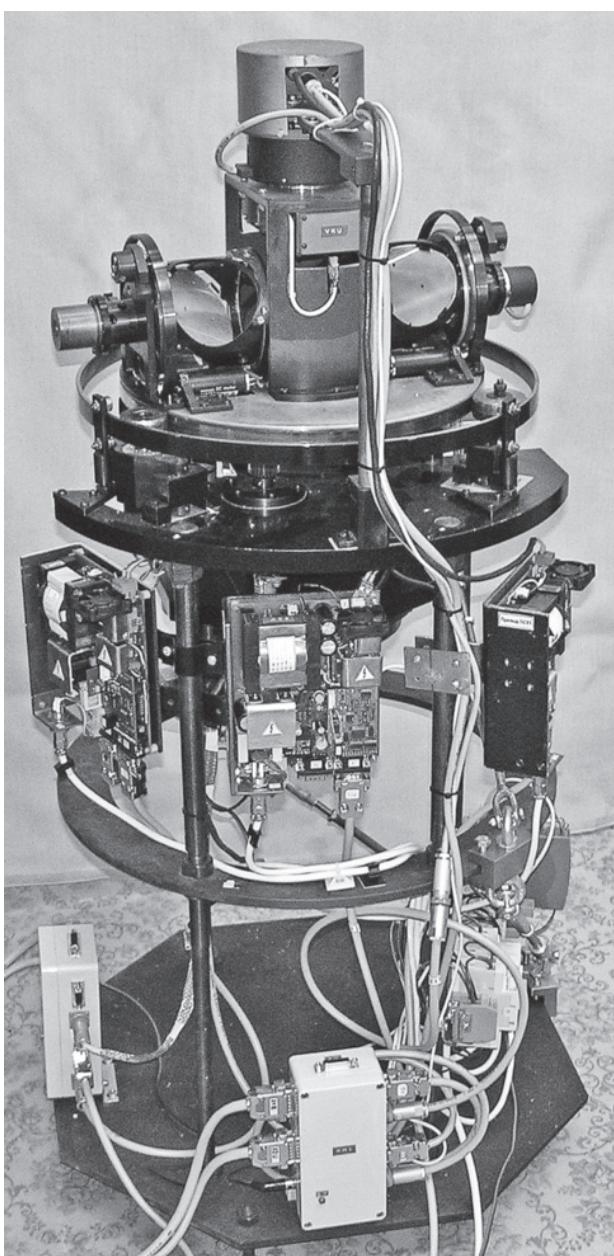


Рис. 3. Отладочный комплект оптико-локационной системы.

якорной обмотки и состояниях электропривода. Измерение указанных параметров обеспечивается датчиками тока разрядностью 9 и датчиками угловых перемещений разрядностью до 19.

Для получения данных, характеризующих точность выполнения траекторных заданий электроприводами исполнительных устройств, изготовлен отладочный комплект оптико-локационной системы (рис. 3), блок-схема которой представлена на рис. 1. Исследования, проведенные на базе отладочного комплекта, подтвердили работоспособность метода управления с использованием генератора траекторных заданий. В качестве примера на рис. 4 представлено траекторное задание привода азимутального наведения в пространстве угловых координат, а на рис. 5 приведен график ошибок при его исполнении. Траекторное задание включает в себя три участка: начальный участок – разгон с постоянным ускорением, средний участок – движение с постоянной скоростью и конечный участок – торможение с постоянным ускорением.

Как видно из приведенных рисунков, ошибка исполнения траекторного задания на участке равномерного движения составляла не более двух-трех отсчетов углового датчика. Угловое разреше-

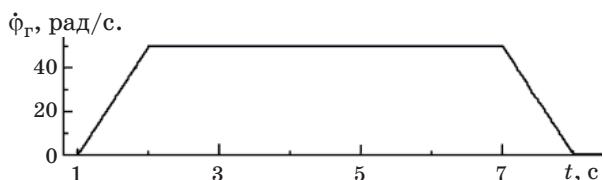


Рис. 4. Траекторное задание привода азимутального наведения.

$\Delta\phi$, отсч. дат.

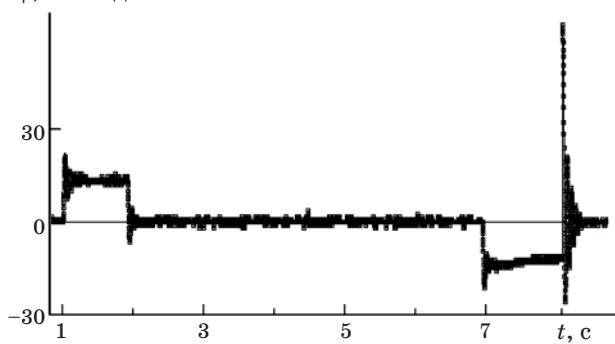


Рис. 5. График ошибок при исполнении приводом траекторного задания.

ние датчика составляло $2\pi/125\,000 = 5 \times 10^{-5}$ рад. На участках разгона и торможения ошибка возрастила до 13–14 отсчетов, что было связано с отсутствием резерва мощности у использованных источников питания электродвигателей (пиковое значение напряжения коррекции при больших ускорениях ограничивается допустимыми для источника питания значениями тока и напряжения). Наблюдаемый резкий рост ошибки в момент останова привода при его торможении скорее всего обусловлен помехой из-за скачкообразного изменения момента трения в окрестности точки покоя (при $\dot{\varphi}_r^{(n)} \approx 0$) и возникающими при этом автоколебаниями в системе привода. На участках разгона и торможения, а также при переводе оптико-локационной системы в режим секторного обзора имели место случаи срыва синхронизма привода компенсатора поворота изображения с азимутальным и угломестным приводами при последующем восстановлении синхронизма.

Заключение

Можно сформулировать следующие основные результаты работы. Предложена схема построения многофункциональной оптико-локационной системы с круговой зоной поиска и теплопеленгатором и лазерным локатором, работающими в разных спектральных диапазонах. Разработан алгоритм управления исполнительными устройствами, основанный на использовании генератора траекторных заданий. Для его реализации создан отладочный комплект аппаратно-программного комплекса, содержащий центральный блок управления и локальные системы управления на базе унифицированных цифровых приводов и высокоточных угловых датчиков текущего состояния. Экспериментально подтверждена

работоспособность предложенного метода управления и получены данные, характеризующие достаточную точность выполнения траекторных заданий исполнительными устройствами. Предложенный метод синтеза цифрового привода с использованием генератора траекторных заданий может найти применение при решении других практических задач, в частности, при разработке роботизированных электромеханических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Троицкий И.Н., Устинов Н.Д. Лазерная локация / Под ред. Устинова Н.Д. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
2. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М. и др. Основы импульсной лазерной локации / Под ред. Рождествина В.Н. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 512 с.
3. Прилипко А.Я., Павлов Н.И. Вариант построения многофункциональной оптико-локационной системы с круговой зоной обзора // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 4. С. 51–56.
4. Смирнова В.И., Петров Ю.А., Разинцев В.И. Основы проектирования и расчета следящих систем. М.: Машиностроение, 1983. 296 с.
5. Башарин А.В., Новиков Б.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоатомиздат, 1982. 392 с.
6. Кротенко В.В., Толмачев В.А., Томасов В.С., Синицын В.А. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 11. С. 23–30.
7. Васильев В.Н., Томасов В.С., Шаргородский В.Д., Садовников М.А. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 6. С. 5–12.