



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Робототехника и мехатроника»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к лабораторной работе  
**«Моделирование процесса  
позиционирования  
рабочего органа мехатронной  
системы с помощью лазерного  
целеуказателя»**

Авторы  
Мартынов В.В.,  
Карнаухов Н.Ф.

Ростов-на-Дону, 2015



## Аннотация

Для студентов дневной формы, обучающихся по направлению 221000 «Мехатроника и робототехника» подготовки бакалавров, профили «Мехатроника» и «Роботы и робототехнические системы».

## Авторы

к.т.н., доцент В.В. Мартынов

к.т.н., профессор Н.Ф. Карнаухов





## Оглавление

Цель работы.....	4
1. Элементы теории.....	5
2. Описание лабораторного стенда .....	8
3. Требования техники безопасности при работе с лазерным излучением .....	16
4. Программа работы.....	17
5. Содержание отчета .....	19
6. Контрольные вопросы .....	20
Список литературы.....	21



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Построение компьютерной модели процесса «захвата» световой полосы, используемой для целеуказания точки назначения при позиционировании рабочего органа.

Исследование влияния параметров оптического датчика системы целеуказания на характеристики процесса позиционирования.



## 1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Наиболее важный качественный параметр функционирования многих мехатронных систем, в частности, сборочных промышленных роботов - точность позиционирования конечного звена - рабочего органа (РО) /1/. С ростом требований к точности изготовления изделий в машиностроении этот параметр приобретает приоритетное значение.

Когда система управления обеспечивает перемещение РО в точку с заданными координатами, то из-за погрешностей работы исполнительных механизмов, наличия люфтов в отдельных звеньях манипулятора, недостаточной жесткости звеньев и неточности изготовления кинематических пар, координаты конечной точки позиционирования могут существенно отличаться от заданных.

Для увеличения точности позиционирования стремятся повысить качество изготовления подвижных узлов и исполнительных механизмов. Чтобы скоординировать движение РО используются обратные связи с введением в контур управляющих сигналов от датчиков положения рабочих звеньев. Информация от этих датчиков позволяет косвенно определить положение схвата в пространстве. При таком способе обеспечения требуемой точности возникает необходимость устанавливать на РО датчики, которые утяжеляют его (ухудшая динамические свойства), затрудняют и ограничивают его перемещения.

При этом в большинстве случаев точность позиционирования лучше 0,1 мм не обеспечивается, к тому же, она в процессе эксплуатации постоянно ухудшается. Это происходит за счет износа кинематических пар, исполнительных механизмов и изменения условий их работы (текущих значений нагрузок, температуры, загрязнений трущихся поверхностей и т.п.), что требует периодического контроля и настроек системы управления, т.е. дополнительных затрат рабочего времени. Кроме того, с увеличением количества звеньев исполнительного органа и их длины соответственно накапливается суммарная погрешность позиционирования РО.

Поэтому необходим поиск более простых и эффективных решений, например, создание мехатронных систем, механическая часть которых более проста в изготовлении, а требуемые качественные показатели обеспечиваются за счет



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

интеллектуализации управляющей системы.

Расширение возможностей вычислительной техники позволяет не только учитывать параметры текущего состояния подвижных соединений мехатронной системы (величины люфтов, значения сил трения), но и, в некоторой мере, прогнозировать их изменение. При этом каждый раз, когда РО направляется в точку назначения, сигналы системы управления, поступающие на приводы звеньев, корректируются по результатам предыдущих перемещений. Такой подход позволяет учитывать влияние износа узлов сопряжения, а также изменение температуры, влажности, запыленности окружающей среды и т.п.

Для организации такой системы управления необходимо снабжать ее высокоточной информацией от датчиков текущего положения РО. Эти датчики не должны ограничивать свободу перемещения инструментов или собираемых деталей в рабочей зоне и должны использовать не косвенное, а прямое измерение текущих координат РО.

Одним из наиболее перспективных решений этой задачи является использование оптических датчиков. Они являются бесконтактными, не увеличивают массу и момент инерции схвата, не загромождают зону сборки, обладают достаточной универсальностью и высокой точностью. К их недостаткам можно отнести влияние посторонней засветки и загрязнения оптических элементов, сложность выделения полезной информации при обработке оптического сигнала.

В то же время, в такой смежной области как оптическая запись информации задача высокоточного позиционирования с помощью лазерного луча при работе в реальных условиях эксплуатации успешно решена, поэтому изучение используемых там технических решений представляет практический интерес при создании мехатронных систем с позиционированием РО.

Например, в накопителях информации на оптических дисках слежение считывающего лазерного луча за информационной дорожкой осуществляется с погрешностью  $\pm 0,1$  мкм при линейной скорости развертывания дорожки 1,3 м/с и достаточно сложных условиях эксплуатации (наличие эксцентриситета диска, изменение расстояния между диском и объективом считывающей головки из-за коробления диска, наличие вибраций, ударов, царапин и загрязнений диска) /2/.

Однако простое перенесение используемого в оптических запоминающих устройствах принципа слежения за объектом



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

для точного определения координат РО невозможно, главным образом, из-за того, что в промышленных мехатронных системах оптическая система может быть удалена от рабочей зоны на расстояние в десятки сантиметров и более (в оптических накопителях информации это расстояние измеряется миллиметрами). Это требует разработки новых конструкций оптических схем со специальными параметрами. Кроме того, при больших расстояниях возникают трудности, связанные с фокусировкой лазерного луча в пятно малого диаметра.



## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Для выполнения лабораторно-исследовательской работы используется экспериментальный стенд (рис. 1), в котором частично использованы элементы и методы, применяемые в устройствах оптической записи информации.

Задатчик 1 координаты точки назначения РО формирует из лазерного луча узкую вертикальную световую полосу, которая по команде системы управления верхнего уровня 2 может перемещаться в горизонтальном направлении (по координате  $X_1$ ). Значение координаты  $X_1$  центра световой полосы и является заданной координатой точки назначения РО 3 мехатронной системы. Фактическое положение РО определяется координатой  $X_2$  центра миниатюрного фотоприемника 4, закрепленного РО.

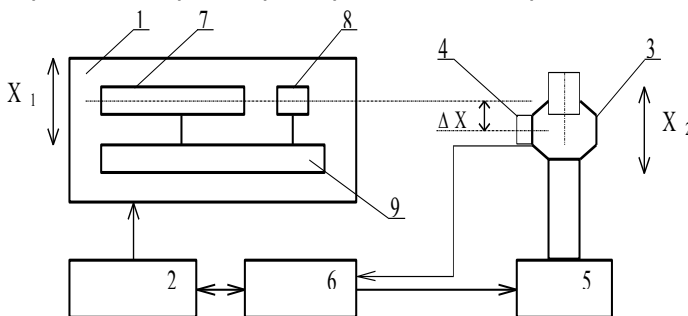


Рис. 1. Схема задания точки назначения при перемещении РО. 1 - прецизионный задатчик координаты точки назначения; 2 - система управления верхнего уровня; 3 – рабочий орган; 4 - дифференциальный фотоприемник с предварительным усилителем фототока рассогласования; 5 - электропривод исполнительного устройства; 6 - локальная система управления перемещением РО; 7 - гелий-неоновый лазер; 8 - оптическая схема, формирующая узкую вертикальную световую полосу; 9 - устройство механического перемещения;  $X_1$  - заданная координата точки назначения РО (положение центра световой полосы);  $X_2$  - фактическая координата отсчетной точки РО.

Привод 5 исполнительного устройства по командам локальной системы управления 6 перемещает рабочий орган 3 таким образом, чтобы минимизировать разность координат  $\Delta X = X_1 - X_2$  (координаты  $X_1$  и  $X_2$  имеют одинаковое направление и





## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

отсчитываются от одной и той же неподвижной точки).

Задатчик координаты 1 состоит из источника излучения (лазера) 7 и формирующей луч оптической схемы 8, жестко связанных с устройством механического перемещения 9.

Рассмотрим конструкцию оптической части системы задания точки назначения и измерения разности  $\Delta X$ . Луч малогабаритного гелий-неонового лазера с длиной волны 0,62 мкм (красный цвет) с помощью оптической схемы из двух сферических и одной цилиндрической линз формируется в узкую вертикальную полосу /3/. Лазер вместе с формирующей оптической системой может поступательно перемещаться в горизонтальной плоскости. Координата  $X_1$  центра луча лазера отсчитывается по цифровому дисплею с дискретностью 1 мкм. Световая полоса  $\Phi$  (рис. 2) проектируется на миниатюрный 6-площадочный фотоприемник (предназначенный для использования в считывающей оптической головке CD-ROM).

Для получения электрического сигнала рассогласования между заданным

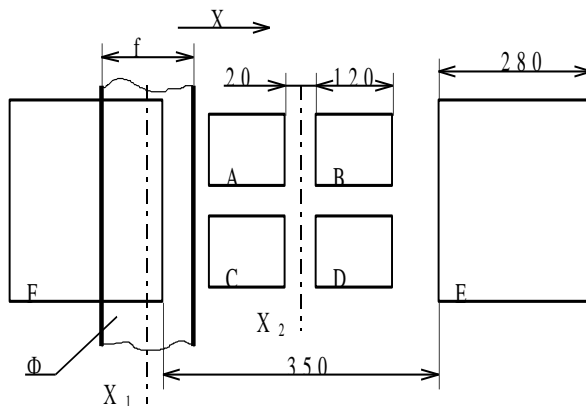


Рис. 2. Схема миниатюрного фотоприемника, расположенного на РО. А...F - фотоплощадки (размеры даны в мкм);  $\Phi$  - вертикальная световая полоса;  $f$  - ширина полосы;  $X_1$  - координата центра полосы;  $X_2$  - координата центра фотоприемника;  $X$  - направление перемещения световой полосы.

и действительным значениями координат рабочего органа в описываемом стенде используются две пары фотоплощадок: внешние площадки F и E предназначены для грубого



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

захвата световой полосы, а внутренние А и В - для точного захвата.

Фотоплощадки в каждой паре подключены встречно, поэтому на выходе предварительного усилителя фотоприемника формируются сигналы  $U=uF-uE$  (при грубом захвате световой полосы) и  $V=uA-uB$  (при точном захвате).

В реальной световой полосе яркость луча по ширине световой полосы  $f$  распределена неравномерно: в центральной части она примерно постоянна, а при приближении к краям плавно падает. Поэтому края световой полосы не имеют четкой границы света и тени. Такое распределение яркости  $\Phi(x)$  можно аппроксимировать выражением

$$\Phi(x) = \Phi_{\max} \left[ \left( 2 \frac{x}{f} \right)^p + 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\max}$  - значение яркости в центре световой полосы (в относительных единицах - о.е.);

$x$  - в системе координат, связанной со световой полосой, координата, направленная поперек световой полосы (в мкм, см. рис. 2);

$f$  - ширина световой полосы (в мкм);

$p$  - (четное число) параметр, характеризующий интенсивность спада яркости луча на краях полосы (увеличение  $p$  соответствует более резкой границе света и тени).

Значение параметра  $p$  находится в пределах 4...8 и определяется конкретными параметрами оптической системы (его значение можно регулировать путем легкой расфокусировки луча). Ширина световой полосы изменяется в пределах 50...300 мкм. Пример кривой (1), описывающей распределения яркости луча по ширине световой полосы, приведен на рис. 3.

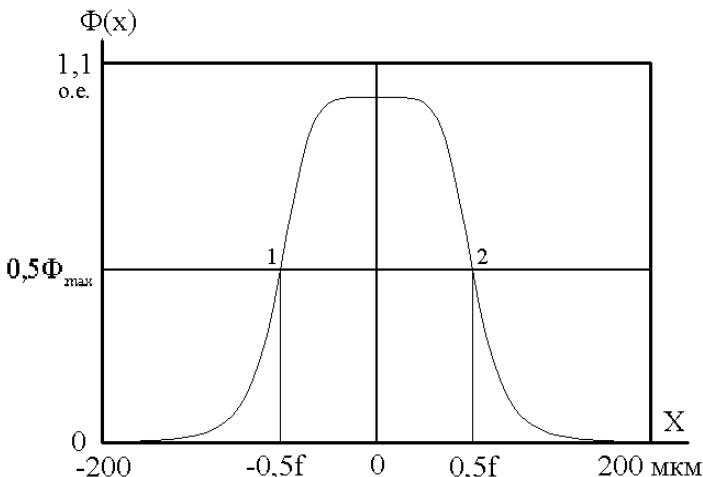


Рис. 3. Распределение яркости луча по ширине световой полосы.

Поскольку края световой полосы не имеют четко выраженных границ, ее ширину  $f$  принято определять по уровню  $0,5\Phi_{\max}$ . Приравняв левую часть уравнения (1)  $0,5\Phi_{\max}$ , найдем значения его корней  $x_{\Phi}$ . Физический смысл имеют только два из них:  $x_{\Phi 1,2} = \pm 0,5f$ . Расстояние между точками 1 и 2 кривой (1) с найденными значениями абсциссы (см. рис. 3) и будет искомым значением ширины световой полосы  $f$ .

При перемещении световой полосы слева направо (см. рис. 2) последовательно освещаются сначала левая, затем обе, а затем только правая площадка из каждой пары фотоплощадок (F и E или A и B). Выходной электрический сигнал каждой фотоплощадки определяется величиной площади, засвеченной световой полосой. Поскольку в каждой паре площадки соединены встречно, выходные сигналы  $U$  (для площадок F и E при грубом захвате луча) и  $V$  (для площадок A и B при точном захвате) будут пропорциональны разности интегральных засветок левой и правой фотоплощадок соответствующей пары. Для простоты рассуждений будем считать нулевым значением координаты интегрирования  $x$  центр фотоприемника (т.е. текущее значение координаты  $X_2$ ). Верхний и нижний пределы интегрирования - это абсциссы левой и правой границ фотоплощадок (F и E или A и B).



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

$$U(x) = k_1 \left[ \int_{x-455}^{x-175} \Phi(x) dx - \int_{x+175}^{x+455} \Phi(x) dx \right], \quad (2a)$$

$$V(x) = k_2 \left[ \int_{x-130}^{x-10} \Phi(x) dx - \int_{x+10}^{x+130} \Phi(x) dx \right], \quad (2b)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$  - масштабные коэффициенты (учитывают высоту фотоплощадки, ее чувствительность, коэффициент усиления предварительного усилителя);

$x$  - текущая координата интегрирования.

Рассчитанные по формулам (1) и (2) функция  $\Phi(x)$  распределения яркости по ширине световой полосы и дискриминационные характеристики фотоприемника  $U(x)$  и  $V(x)$  для режимов грубого и точного захвата луча представлены на рис. 4 (по оси абсцисс здесь отложены относительные единицы – о.е.). Здесь же для сравнения дана снятая по точкам соответствующая экспериментальная дискриминационная характеристика для режима грубого захвата луча. Некоторые расхождения объясняются несимметрией чувствительности фотоплощадок, естественными погрешностями эксперимента и допущениями математического описания.



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

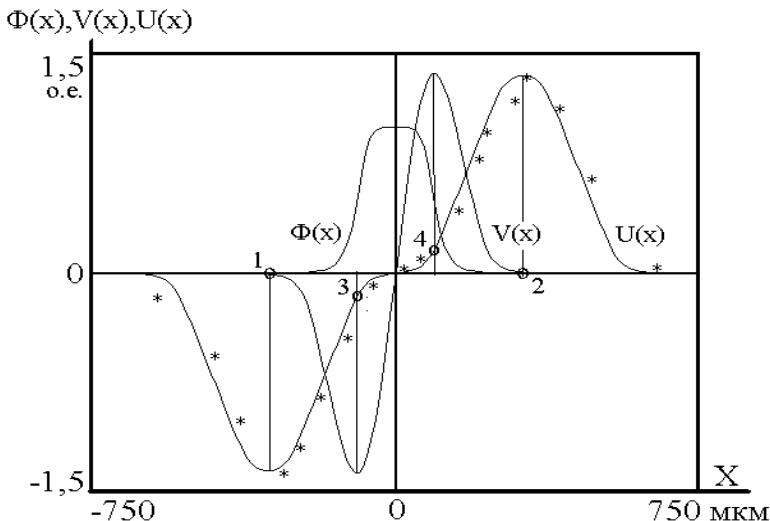


Рис. 4. Дискриминационные характеристики системы позиционирования, соответствующие режимам грубого ( $U(x)$ ) и точного ( $V(x)$ ) захвата световой полосы (звездочками обозначены экспериментальные точки).  $\Phi(x)$  - распределение яркости луча по ширине используемой световой полосы с расчетными значениями параметров  $p=6$ ,  $f=190$  мкм.

Процесс позиционирования осуществляется следующим образом. Точка назначения схвата задается системой управления верхнего уровня 2 (см. рис. 1) путем соответствующего перемещения световой полосы с помощью задатчика координаты 1. По сигналу локальной микропроцессорной системы управления 6 привод 5 стремится направить РО в заданную точку. Из-за погрешностей работы исполнительного устройства, недостаточной жесткости его звеньев, влияния изменяющихся условий внешней среды и т.п. РО выводится в точку, отстоящую от заданной на расстояние  $\Delta X$ . Это значение погрешности первой стадии позиционирования (без включения обратных связей) должно быть таково, чтобы РО попал в зону грубого захвата луча (интервал между экстремумами дискриминационной характеристики  $U(x)$ , см. рис. 4). Ширина этой зоны зависит от параметров световой полосы и конфигурации фотоприемника. Для совокупности параметров, соответствующей рис. 4, ширина



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

этой зоны составляет около 650 мкм.

При попадании рабочего органа в зону захвата луча включается контур обратной связи, и система управления 6 стремится минимизировать  $\Delta X$ , перемещая РО в направлении, зависящем от знака  $U(x)$ . При этом рабочий орган попадает в зону точного захвата (интервал между экстремумами дискриминационной характеристики  $V(x)$  - около 190 мкм для случая, изображенного на рис. 4). Если требуется более высокая точность позиционирования, система управления 6 переключается на использование точной характеристики  $V(x)$  и продолжает минимизировать  $\Delta X$ , используя сигнал рассогласования, полученный от фотоплощадок А и В (см. рис. 2). При использовании точной дискриминационной характеристики  $V(x)$  резко возрастает абсолютное значение сигнала рассогласования, поступающего в систему управления 6, что увеличивает ее чувствительность (на рис. 4 видно, что участок характеристики  $V(x)$  в районе начала координат является линейным и имеет высокую крутизну).

При каждом цикле работы локальная система управления использует записанную в память информацию о совокупности управляющих сигналов, которые вывели РО в заданную точку на предыдущем цикле. При этом оказывается достаточным использование только режима точного захвата, что позволяет сократить время цикла. Таким образом, при плавном изменении параметров внешней среды (температуры, влажности, запыленности), отрицательно влияющих на точность позиционирования, происходит постоянная корректировка управляющих сигналов. Однако при резком изменении этих параметров, после длительного перерыва в работе или при сбое система должна сначала включаться в режим грубого захвата.

Запоминание и учет ошибок предыдущего цикла для корректировки каждого последующего позволяет сократить время достижения схватом заданной точки при сохранении высокой точности позиционирования.

Построение системы позиционирования по компенсационному принципу и использование вертикальной световой полосы существенно уменьшают влияние внешней засветки, загрязнений оптических элементов и исключают влияние вертикальных вибраций. Поэтому погрешность позиционирования в основном определяется погрешностью датчика координаты точки назначения ( $\pm 1$  мкм),



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

стабильностью и наклоном рабочего участка используемой дискриминационной характеристики.



### **3. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Несмотря на очень малую мощность, излучение используемого лазера может представлять опасность при попадании в глаз. В связи с этим необходимо соблюдать следующие требования: 1) во время работы лазер должен быть закреплен, а ось луча должна располагаться ниже уровня глаз; 2) не заглядывать в выходное отверстие лазера; 3) при размещении на пути луча предметов с зеркальной поверхностью следить, чтобы отраженный луч не попадал в глаза никому из находящихся в помещении людей.





## 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Используя базовые значения параметров системы позиционирования, построить с помощью пакета MathCAD кривые  $U(x)$ ,  $V(x)$ ,  $\Phi(x)$ .

Базовые значения параметров системы позиционирования:  $f=100$  мкм,  $p=6$ ,  $\Phi_{\max}=1$ , геометрические размеры фотоприемника в соответствии с рис. 2, диапазон изменения  $X$  от  $-750$  мкм до  $750$  мкм, нулевое значение координаты интегрирования  $x$  соответствует штрихпунктирной линии между площадками  $A$  и  $B$  на рис. 2.

2. Для заданных значений параметров определить ширину зоны захвата в грубом и точном режимах, чувствительность системы позиционирования (она определяется наклоном соответствующей дискриминационной характеристики и имеет размерность о.е./мкм) в точке начала координат ( $x=0$ ).

3. Изменяя параметры  $f$  и  $p$ , исследовать их влияние на ширину зон захвата и характер изменения (крутизну, т. е. чувствительность системы позиционирования и линейность) характеристик  $U(x)$  и  $V(x)$  в точке  $x=0$ .

Диапазоны изменения параметров:  $f$  – от  $50$  мкм до  $300$  мкм,  $p$  – от  $4$  до  $8$  (задавать только четные значения).

4. Поскольку при работе реальных мехатронных систем изменять ширину полосы при переходе от грубого к точному захвату затруднительно, необходимо для заданного значения параметра  $p$  путем математического эксперимента определить значение  $f$ , в наибольшей степени удовлетворяющее обоим режимам захвата. Критерием служит степень линейности участков дискриминационных характеристик, расположенных между экстремумами, и чувствительность точной дискриминационной характеристики.

5. Варьируя параметры моделируемой системы получить заданное значение ширины зоны захвата для одной из дискриминационных характеристик.

6. Варьируя параметры моделируемой системы получить заданное значение чувствительности для точной дискриминационной характеристики.

7. Для заданного минимального значения сигнала рассогласования на выходе фотоприемника определить значения



## Моделирование процесса позиционирования рабочего органа мехатронной системы с помощью лазерного целеуказателя

параметров  $f$  и  $p$ , соответствующие погрешности  
позиционирования 3 мкм.

8. Сделать выводы по полученным данным.



## **5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Название работы, номер группы, Ф.И.О. и подпись студента, Ф.И.О. преподавателя, цель работы, используемая вычислительная техника и программное обеспечение, заданные преподавателем значения параметров моделируемой системы позиционирования, необходимые элементы теории, результаты проведенных исследований в виде таблиц, графиков и т. п., краткие выводы по работе, дата выполнения работы.



## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы причины появления погрешности позиционирования РО?
2. Что такое дискриминационная характеристика?
3. Как работает система лазерного целеуказания?
4. Поясните физический смысл параметров  $f$  и  $p$ .
5. Почему в формулах (2) стоит разность двух интегралов?
6. Чем определяются значения пределов интегрирования в формулах (2)?
7. Каким образом из лазерного луча формируется световая полоса?
8. Как определяется ширина световой полосы?
9. На что влияет ширина зоны захвата?
10. Как чувствительность системы управления связана с формой дискриминационной характеристики?
11. Для чего используются две пары фотоплощадок и две дискриминационные характеристики?
12. Когда система управления переключается с грубого на точный режим?
13. Какой участок дискриминационной характеристики определяет конечную погрешность позиционирования РО?
14. Как погрешность позиционирования связана с наклоном дискриминационной характеристики?
15. Каковы требования техники безопасности при работе с лазерным излучением?



## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Раннев, Г.Г. Измерительные информационные системы: учеб. для вузов / Г. Г. Раннев. - М. : ACADEMIA, 2010.
2. Накадзима Х., Огава Х. Цифровые грампластинки: Пер. с япон. - М.: Радио и связь, 1998.