С.А. Гунасекера, В.А. Данилов, Е.Р. Маламед
(S.A. Gunasekera. V.A. Danilov, E.R. Malamed)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОДОВЫХ ДАТЧИКОВ НА БАЗЕ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ЛИНЕЙНОГО ТИПА

(PRICIPLES OF THE CODE SENSORS, INCLUDING LINEAR PHOTOSENSITIVE DEVICES)

Санкт-Петербург, ОАО «ЛОМО»
(Saint-Petersburg, «LOMO» PLC)

ОАО «ЛОМО» приступило к разработке новых кодовых датчиков линейных (ДЛП) и угловых перемещений (ДУП), имеющих возможность работать при больших скоростях (для ДЛП – скорость до 15 – 20 м/с, для ДУП – до десятков оборотов в секунду). Принцип работы тех и других датчиков основан на применении шкал и лимбов с нанесенными на них двумя дорожками штрихов: на одной дорожке наносятся штрихи с постоянным шагом, на другой с переменным. При этом все линейные (угловые) расстояния между соседними штрихами и расстояния $S_{0,\ n}$ от нулевого штриха до n-го на дорожке с переменным шагом заранее аттестованы и находятся в памяти устройства. Дорожка с постоянным шагом обеспечивает получение кодовой информации о перемещении в пределах одного шага (младшие разряды), а дорожка с переменным шагом – в пределах всего диапазона измерений. Штрихи дорожки с переменным шагом проецируются на фоточувствительную поверхность приемника линейного типа, при этом должно быть спроецировано не менее двух штрихов. В настоящее время изготовлены экспериментальные образцы датчиков, на которых проводятся исследования.

The «LOMO» PLC is developing code sensors, which may be used to measure said displacements. The linear displacement measuring sensors (LDMS) are able to function at the speed of displacement, equal to 15-20 m/sec, and the angular displacement measuring sensors (ADMS) are able to function at the speed of rotation, equal to some tens of turns per second. Scales and limbs, which are the most important elements of the sensors, mentioned above, are marked with two sets of lines: the 1-st set includes equally spaced lines, and the 2-nd set includes lines, distances between which are different. All linear (angular) distances between adjacent lines of the 2-nd set of lines, as well as distances $S_{o,\ n}$ from zero line to n-th line of the same set have been measured and entered into the memory of the device. The 1-st set, which includes equally spaced lines, is used to provide code information, relating to displacement within the distance, separating adjacent lines (the least significant digits are used for this purpose), whereas the 2-nd set of lines is used to provide information, relating to displacement within the entire range of measurement. Those lines, which belong to the 2-nd set, are imaged on photosensitive surface of a linear photo sensor; the minimum number of imaged lines is two. The «LOMO» PLC has produced some test specimens of said photo sensors, which are being subject to tests at present.

ОАО «ЛОМО» многие годы занималось разработкой высокоточных устройств для измерения линейных и угловых перемещений [1]. Это были датчики накопительного типа, информация в которых о положении объекта при выключении питания не сохранялась. Для ряда задач это просто недопустимо. В связи с этим мы приступили к разработке принципиально новых кодовых ДЛП и ДУП, имеющих возможность работы при больших скоростях. При этом единица младшего разряда в ДЛП – 1 мкм (может быть меньше), в ДУП – 1″ (может быть меньше). Принцип работы тех и других датчиков основан на применении шкал и лимбов с нанесенными на них двумя дорожками штрихов: на одной дорожке наносятся штрихи с постоянным шагом, на другой с переменным. Именно эта дорожка позволяет кодировать информацию о перемещении во всем рабочем диапазоне датчиков [2]. Рассмотрим работу ДУП (рисунок 1). Устройство работает следующим образом:

Источник излучения 1 (рисунок 1,а) с помощью конденсора 2 освещает штрихи 12 (рисунок 1,б), нанесенные на поверхности кодового лимба 3 (дорожка диаметром D_1). Их теневое изображение образуется на фоточувствительных элементах 16 многоэлементного приемника изображения 4 (рисунок 1,а), один из элементов которого, например, 17 (рисунок 1,б) приняли за репер. В фотоприемном устройстве 4 (рисунок 1,а) осуществляется преобразованием пространственного расположения изображений штрихов во временную последовательность амплитудно-модулированных видеоимпульсов, взаимное временное положение которых однозначно соответствует расстоянию между спроецированными на фоточувствительные элементы 16 (рисунок 1,б) штрихами. В электронном блоке (ЭБ) осуществляется расчёт угловых расстояний между штрихами. Пусть, например, на лимбе 3 угловые расстояния между соседними штрихами определяются зависимостью $S_{(n-1).\ n} = S_{0,\ 1} + \gamma\cdot(n-1)$,

@2002, электронная версия подготовлена ЗАО АВТЭКС Санкт-Петербург, http://www.autex.spb.ru

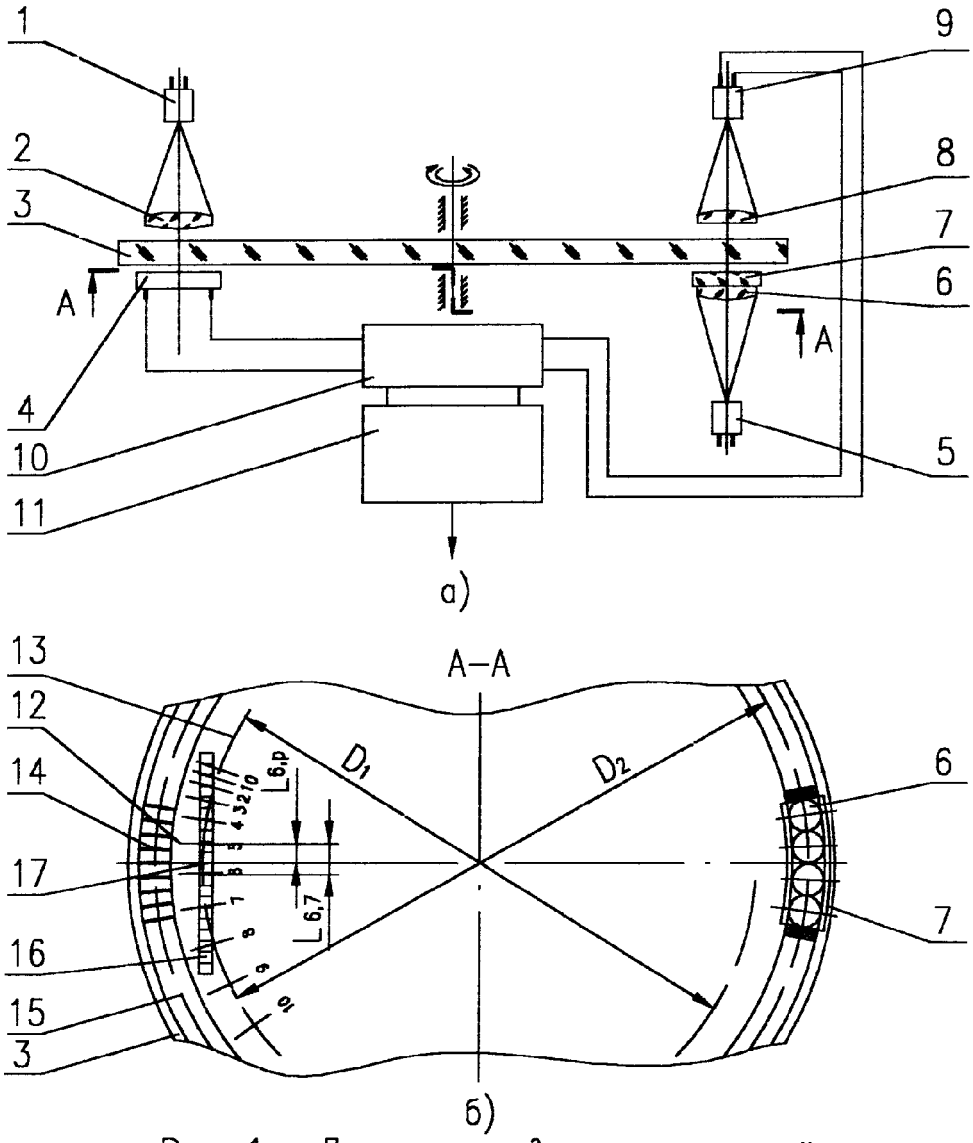

Рис. 1. Датчик угловых перемещений
(Fig. 1 The angular displacement measuring sensor)

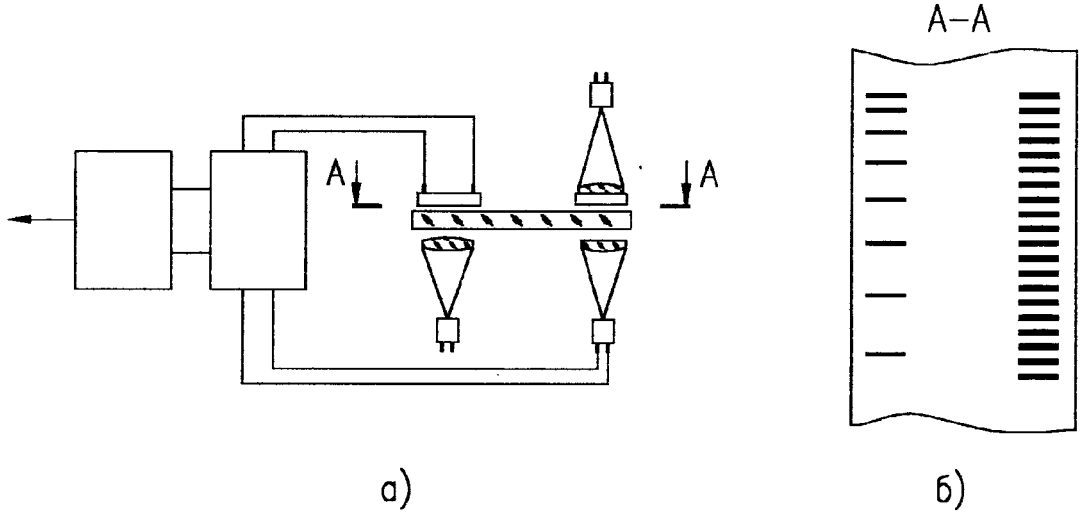

Рис. 2. Датчик линейных перемещений
(Fig. 2 The linear displacement measuring sensor)

при этом угловое расстояние между нулевым и первым штрихами $S_{0,\,1}$ = 12′, постоянная величина γ = 0,75′ (45″), а n = 225 (нулевой и 225-й штрихи совпадают). Радиус, на котором нанесены штрихи, равен $D_1/2$. Тогда в соответствии с выше указанной зависимостью можно составить нижеследующую таблицу.

Таблица

Интервал	Угловое расстояние $S_{(n-1),\,n}$, угл. мин.	Интервал	Угловое расстояние $S_{0,\,n}$, угл. мин.
0 – 1	12,00′	0 – 1	12,00′
1 – 2	12,75′	0 – 2	24,75′
2 – 3	13,50′	0 – 3	38,25′
3 – 4	14,25′	0 – 4	52,50′
4 – 5	15,00′	0 – 5	76,50′
5 – 6	15,75′	0 – 6	83,25′
6 – 7	16,50′	0 – 7	99,75′
7 – 8	17,25′	0 – 8	117,00′
8 – 9	18,00′	0 – 9	135,00′
9 – 10	18,75′	0 – 10	153,75′
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
223 –224	179,25′	0 – 224	21420,75′
224 –225 (0)	180,00′	0 – 225 (0)	21600,00′ (360°)

Пусть фоточувствительный элемент 17, принятый за репер, находится между штрихами № 6 и № 7. Вся таблица находится в запоминающем устройстве электронного блока 10 (рисунок 1,а). Так как временная последовательность амплитудно-модулированных видеоимпульсов, формируемых в фотоприёмном устройстве 4 линейного типа, однозначно соответствует линейному расстоянию между штрихами лимба, то легко вычисляются расстояние $L_{6,\,p}$ между центром штриха 6 (рисунок 1,б) и центром реперного фоточувствительного элемента 17 (р) и расстояние $L_{6,\,7}$ между центрами штрихов 6 и 7. По линейному расстоянию $L_{6,\,7}$ определяется угловое расстояние $S_{6,\,7}$ между штрихами: $S_{6,\,7} = \mathrm{arctg}\,(2\cdot L_{6,\,7}/D_1)$. По угловому расстоянию $S_{6,7}$ из памяти берется угловое расстояние $S_{0,\,6}$ между нулевым и шестым штрихами (см. таблицу) и определяется угловое положение С объекта (см. рисунок 1,б):

$$C = S_{0,\,6} + \mathrm{arctg}\,(2\cdot L_{6,\,p}/D_1).$$

Пусть, например, D_1 = 110 м, а $L_{6,\,p}$ = 0,135 мм.
Тогда C = 83,25′ + arctg (2·0,135/110) = 83,25′ + 8,45′ = 91,7′ = 1°31′42″.

Одновременно с вышеописанным каналом получения информации об угловом положении объекта работает и другой канал, а именно: источники излучения 5 (рисунок 1,а), каждый из которых находится в фокусе своей линзы 6, облучают их модулированным с определенной частотой ω светом. При этом каждое облучение сдвинуто друг относительно друга на четверть периода. Из линз 6 выходят параллельные пучки света, облучающие растр 7, на котором против каждой линзы нанесены группы штрихов, имеющие тот же шаг, что и штрихи, нанесенные на дорожке 15 (рисунок 1,б). Эти группы сдвинуты друг относительно друга на четверть углового шага. Приемная линза 8 собирает все параллельные пучки, прошедшие растр 7 и лимб 3 и фокусирует их на фоточувствительной поверхности приемника излучения 9. В результате сигнал, снимаемый с приемника излучения 9, будет иметь вид [3]: $J = J_0 \cos(\omega t - \theta)$, где: J_0 – амплитуда переменного сигнала, величина которой зависит от ряда параметров конкретных оптической и электрической схем преобразователя; θ – фаза сигнала, зависящая от взаимного положения подвижного лимба 3 относительно растра 7.

При повороте лимба 3 на один угловой шаг фаза θ изменяется на 2π. Например, если на дорожке 15 нанесено 21600 штрихов, то один шаг равен одной угловой минуте (60″). Таким образом, фаза сигнала будет изменяться на 2π при повороте лимба 3 на угол, равный 60″. При повороте лимба на одну угловую секунду (1″) фаза сигнала измениться на шесть электрических градусов (6°). В результате по данному каналу легко может быть снята информация о повороте лимба 3 с дискретностью 1″. При снятии и повторном включении питания информация о положении лимба в пределах одного шага будет сохраняться.

Итак, предположим, что мы сняли информацию о положении лимба с двух каналов. По первому из описанных каналов мы, например, получили 1°31′42″, а по второму 48″. Блок сравнения (БС) сравнит эти данные и выдаст окончательный результат: угол поворота лимба 3 равен 1°31′48″.

Дело в том, что второй из описанных каналов, работает по большому количеству штрихов и является более точным. Если, например, по первому каналу мы получим результат 37°15′3″, а по второму 52″, то окончательно блок сравнения выдаст результат 37°14′52″. Т.е. блок сравнения с учетом погрешности работы более грубого и более точного каналов будет к показаниям либо прибавлять 1′, либо убавлять 1′, либо сохранять значение минут, выданных по первому каналу. Значение секунд будет браться по точному каналу.

Совершенно аналогично построен и ДЛП, изображенный на рисунке 2.

В настоящее время изготовлены макеты ДУП и ДЛП, на которых выполнена одна дорожка с переменным шагом. Получены первые результаты, а именно:

- изготовленные экспериментальные образцы ДЛП и ДУП обеспечивают измерение координат в статическом режиме работы с высокой точностью (погрешность определения энергетического центра тяжести штриха не превышает 0,5 мкм);
- в динамическом режиме ошибка резко возрастает, поэтому необходимо использование двух дорожек (одна из которых с постоянным шагом);
- после отключения и повторного включения питания информация о положении лимба (шкалы) восстанавливается через 10 мс.

Полученные результаты позволили нам сделать вывод о необходимости продолжения работ в этом направлении.

Источники информации

1. Е.Р. Маламед: «Преобразователь линейных перемещений». ОМП, 1983, № 7, с. 35 – 37.
2. Патент № 2120105, приоритет от 11.06.96 г., опубликован 10.10.98.
3. Л.И. Преснухин и др.: «Фотоэлектрические преобразователи информации». М.: Машиностроение, 1974 г., с. 298 – 299 (аналог).