

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского**

**«Харьковский авиационный институт»**

**Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев, Е. М. Костенко**

**ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ  
ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

Харьков «ХАИ» 2019

УДК 004.94; 681.586.5

К44

Проведено аналіз, обґрунтовано вибір методів і пристроїв вимірювання кутових переміщень. Удосконалено методи та пристрої фотоелектричного вимірювання кутових переміщень для комп'ютерних систем контролю й керування. Здійснено експериментальне дослідження розроблених пристроїв. Наведено приклади застосування запропонованих фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень в комп'ютерних системах.

Для студентів вищих навчальних закладів, аспірантів і науковців.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. С. И. Кондрашов,  
д-р техн. наук, проф. А. В. Полярус

Утверждено на заседании ученого совета университета в качестве монографии  
(протокол № 8 от 21.03.2018)

**Кошевой, Н. Д.**

К44 Технологии измерения угловых перемещений для компьютерных систем контроля и управления [Текст] : монография / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев, Е. М. Костенко. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2019. – 104 с.

ISBN 978-966-662-656-4

Проведен анализ, обоснован выбор методов и устройств измерения угловых перемещений. Усовершенствованы методы и устройства фотоэлектрического измерения угловых перемещений для компьютерных систем контроля и управления. Осуществлено экспериментальное исследование разработанных устройств. Приведены примеры применения предложенных фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений в компьютерных системах.

Для студентов высших учебных заведений, аспирантов и научных работников.

Ил. 46. Табл. 18. Библиогр.: 138 назв.

**УДК 004.94; 681.586.5**

© Кошевой Н. Д., Бурлеев О. Л.,  
Костенко Е. М., 2019

© Национальный аэрокосмический  
университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», 2019

ISBN 978-966-662-656-4

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. АНАЛИЗ, ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ.....	6
1.1. Методы измерения угловых перемещений.....	6
1.1.1. Потенциометрический метод.....	6
1.1.2. Тензометрический метод.....	7
1.1.3. Гравитационный метод.....	8
1.1.4. Емкостный метод.....	9
1.1.5. Пьезоэлектрический метод.....	11
1.1.6. Магнитный метод на основе эффекта Холла.....	12
1.1.7. Магниторезистивный метод.....	14
1.1.8. Индуктивный метод.....	16
1.1.9. Трансформаторный метод.....	17
1.1.10. Магнитострикционный метод.....	19
1.1.11. Оптический метод.....	20
1.1.12. Сравнительный анализ и выбор метода для измерения угловых перемещений.....	22
1.2. Оптические устройства измерения угловых перемещений.....	24
1.2.1. Анализ фотоэлектрических устройств преобразования угловых перемещений.....	24
1.2.2. Анализ волоконно-оптических устройств преобразования угловых перемещений.....	27
1.3. Выводы по анализу технологий измерения угловых перемещений.....	29
2. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ.....	30
2.1. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с применением кодирующей дуги и устройство для его реализации.....	30

2.2. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с применением зеркала и устройство для его реализации.....	32
2.3. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с использованием блока поддержки уровня и устройство для его реализации.....	34
2.4. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с использованием кодового диска и устройство для его реализации.....	36
2.5. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с применением держателей оптических элементов и устройство для его реализации.....	39
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ.....	41
3.1. Программные средства для оптимизации планов экспериментальных исследований фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений.....	41
3.2. Экспериментальное исследование фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением зеркала.....	46
3.3. Экспериментальное исследование фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением держателей оптических элементов.....	52
4. ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ.....	71
4.1. Принципы сопряжения предложенных устройств с компьютерными системами.....	71
4.2. Компьютеризированная система измерения углового отклонения рулевых поверхностей летательного аппарата.....	75

4.3. Разработка архитектуры компьютерной системы контроля угловых перемещений.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	86

## ВВЕДЕНИЕ

В современных исследовательских проектах одним из важнейших объектов изучения является угловое перемещение, поскольку от его измерения напрямую зависит качество управления элементами автоматики в различных системах автоматизации технологических процессов. Среди практических сфер, в которых необходимо получить адекватную информацию об угловых перемещениях, следует выделить такие:

- сельское хозяйство: управление культиваторами, высеивающими аппаратами, разбрасывателями удобрений, системами полива и др. [1];
- робототехника: управление промышленными роботами (дозирование, нарезка, измерение длины), управление автоматизированным складом, позиционирование угла заточки деталей и др. [2];
- авиационная промышленность: диагностика и контроль отработки углового перемещения рулевыми поверхностями самолета.

Эффективность фундаментальных и прикладных исследовательских проектов повышается путем применения информационных технологий (ИТ). Их использование позволяет автоматизировать и ускорить процесс получения, обработки, а также представления информации в целях принятия решения для выполнения дальнейших действий в исследуемой области [3]. Создание прикладных ИТ для реализации исследовательских проектов, связанных с угловым перемещением, требует также тщательного анализа методов измерения указанного выше параметра, поскольку это влияет на проектирование аппаратной части ИТ.

Таким образом, актуальной задачей является анализ и усовершенствование технологий измерения угловых перемещений, чему и посвящена данная монография.

# 1. АНАЛИЗ, ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

## 1.1. Методы измерения угловых перемещений

Для анализа взяты основные методы измерения углового перемещения, используемые при изготовлении преобразователей современными фирмами и производственными компаниями [4–10].

### 1.1.1. Потенциометрический метод

Потенциометрический метод измерения угловых перемещений основан на зависимости величины электрического сопротивления от длины материала, из которого оно изготовлено [11]. В методе используются измерители, которые включаются в активном режиме, поскольку для определения величины сопротивления через них должен протекать электрический ток.

Таким образом, возникает необходимость в дополнительном источнике возбуждения (например, в источнике постоянного тока). Существуют бесконтактные реостатные элементы, управляемые с помощью узкого светового луча (рис. 1.1) [12].

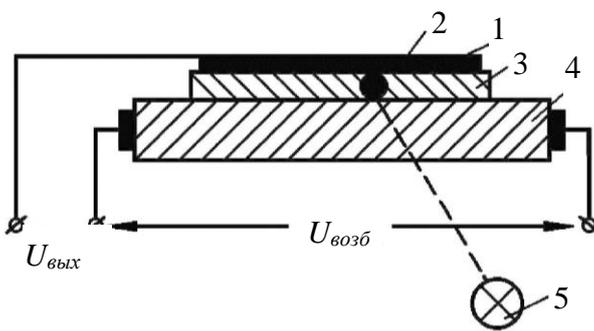


Рис. 1.1. Бесконтактный потенциометрический преобразователь углового перемещения: 1 – контактная шина; 2 – луч; 3 – фоточувствительный слой; 4 – слой металла высокого сопротивления; 5 – источник света;  $U_{возб}$  – напряжение возбуждения;  $U_{вых}$  – выходное напряжение

К преимуществам потенциометрического метода следует отнести: простоту построения измерительных схем; высокий уровень выходного сигнала и малые габаритные размеры; низкую стоимость.

Недостатками потенциометрического метода являются: наличие зоны нечувствительности; неравномерность статической характеристики при нагрузке; погрешность от люфта; необходимость обеспечения устойчивого контакта между движком (лучом) и обмоткой (фоточувствительной подложкой) реостатного преобразователя (влияние механических вибраций).

### 1.1.2. Тензометрический метод

Тензометрический метод основан на явлении тензоэффекта, который представляет собой свойство проводников и полупроводников изменять электрическое сопротивление при деформации. У полупроводников тензоэффект связан с изменением удельного электросопротивления, причем знак тензоэффекта зависит от типа проводимости материала, а значение – от кристаллографического направления. Чувствительным элементом устройств, в работе которых лежит тензометрический метод, является тензорезистор [13].

Классификация тензорезисторов представлена в работе [14]. На рис.1.2 показаны различные типы тензорезисторов.

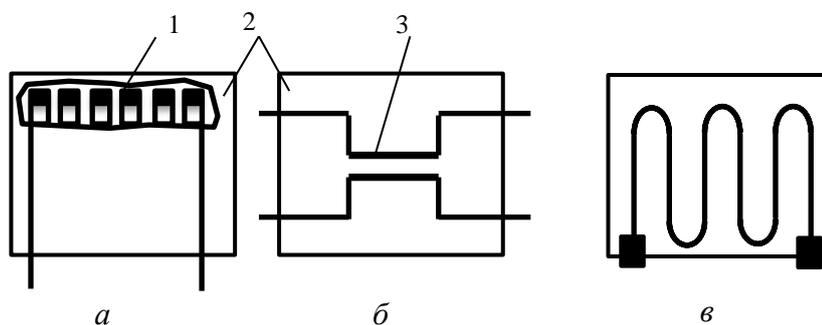


Рис. 1.2. Тензорезисторы:

*a* – фольговый; *б* – полупроводниковый; *в* – проволочный;

1 – фольговая решетка; 2 – непроводящая подложка; 3 – кремниевая пластинка

Действие проволочных, пленочных или фольговых тензорезисторов основано на изменении сопротивления проволоки, пленки или фольги при их сжатии или растяжении.

Как правило, преобразователь на основе тензорезистивного метода измерения применяется вместе с мостом Уитстона, когда одно, два или даже все четыре плеча представляют собой тензодатчики, а выходное напряжение изменяется вследствие вариации измеряемого усилия [15].

Преимущества метода: высокая технологичность изготовления чувствительного элемента; линейность выходной характеристики.

Недостатки метода: необходимость согласования температурного коэффициента тензорезистора с аналогичным параметром материала упругого элемента; температурная нестабильность; наличие механических передаточных звеньев.

### **1.1.3. Гравитационный метод**

Этот метод применяется в тех случаях, когда объект измерения изменяет свое угловое положение относительно линии горизонта, например, при контроле зенитных и азимутальных углов в процессе бурения скважин [16]. Датчики, работающие по этому принципу измерения, называются инклинометрами. При наклоне объекта на некоторый угол под действием силы тяжести чувствительный элемент (капля ртути, пузырек воздуха в жидкости и т. д.) перемещается, изменяя выходной параметр системы (механической, электролитической, фотоэлектрической и т. д.) съема сигнала. Таким образом, по статической характеристике определяют угол наклона объекта исследования.

На рис.1.3 показана конструкция электролитического инклинометра [17]. Для съема сигнала используются электроды, включенные в мостовую схему. В плечи мостовой схемы включаются два электролитических уровня [18] и фототранзисторы [19].

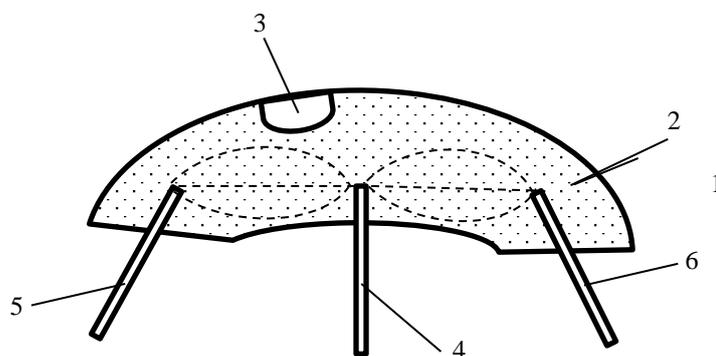


Рис. 1.3. Конструкция электролитического инклинометра:  
 1 – выгнутый герметичный корпус; 2 – жидкий электролит;  
 3 – воздушный пузырек; 4, 5, 6 – электроды

В гравитационном методе в качестве чувствительного элемента может использоваться MEMS-акселерометр [20].

Преимущества метода: высокая точность; линейность выходной характеристики; возможность создания малогабаритных устройств; простота реализации и установки датчиков на объектах.

Недостатки метода: низкая устойчивость к вибрациям; работа устройств только в плоскости действия вектора гравитационных сил; зависимость диапазона измерения от формы герметичного корпуса датчика; неработоспособность в условиях отсутствия гравитационных сил или в условиях переменной гравитации.

#### 1.1.4. Емкостный метод

Емкость конденсатора зависит от формы и геометрических размеров электродов, от диэлектрической проницаемости и расстояния между его обкладками [21]. Поэтому суть емкостного метода заключается в зависимости емкости конденсатора от изменения этих параметров.

Пренебрегая краевыми эффектами, если информативным параметром является расстояние  $d$  между обкладками или диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  контролируемой среды, емкость датчика с плоскопараллельными обкладками [22], работающего в диэлектрических средах, можно упрощенно записать в виде

$$C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}. \quad (1.1)$$

Если информативным параметром является площадь (уровень) перекрытия обкладок датчика контролируемой средой с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_c$ , то емкость датчика определяется как

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_r S_1 + \varepsilon_c S_2)}{d}. \quad (1.2)$$

В выражениях (1.1), (1.2)  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная ( $8,87 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\varepsilon_c$  – диэлектрическая проницаемость контролируемой среды;  $\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость газообразной среды;  $S$  – полная площадь перекрытия обкладок;  $S_1$  – площадь перекрытия – части обкладок, расположенных в газообразной среде;  $S_2$  – площадь перекрытия обкладок, расположенных в исследуемой среде.

В работе [23] представлены способы изменения емкости конденсаторов, используемые в емкостном методе измерения. Как правило, для преобразования угловых перемещений в величину емкости используется изменение площади пластин  $S$  емкостного датчика.

Классификация емкостных датчиков приведена в работе [24]. В работах [25, 26] рассмотрены методы повышения точности измерения емкости метода измерения.

Преимущества емкостного метода: отсутствие механического трения; длительность срока службы датчиков; высокая технологичность выполнения конструктивных элементов; возможность реализации любой зависимости изменения емкости от измеряемой величины.

Недостатки емкостного метода: подверженность влиянию электромагнитных полей; необходимость наличия у конструктивных материалов малого коэффициента линейных расширений; необходимость в источнике питания высокой частоты; зависимость выходной величины от параметров источника питания; тщательная изоляция деталей датчика.

### 1.1.5. Пьезоэлектрический метод

Пьезоэлектрический метод измерения основан на явлении пьезоэффекта [27] (рис. 1.4).

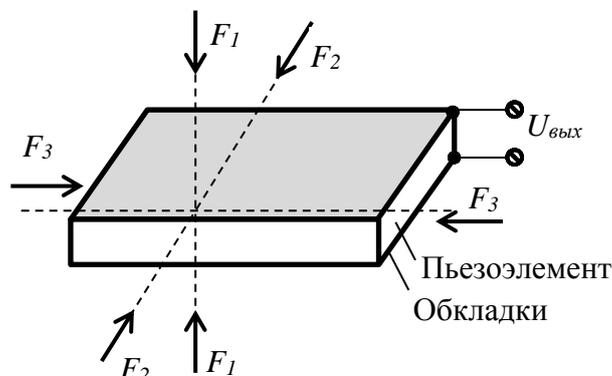


Рис. 1.4. Проявление пьезоэффекта:  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  – сила, приложенная вдоль продольной, поперечной и вертикальной осей пьезоэлемента соответственно;

$U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение

Количественно пьезоэффект оценивается пьезомодулем  $d$ , устанавливающим пропорциональность между величиной возникающего заряда  $Q$  и приложенной силой  $F$ :

$$Q = dF. \quad (1.3)$$

На практике обычно измеряют напряжение на конденсаторе  $C_d$ , образуемом гранями пластины:

$$U = \frac{dF}{C_d}. \quad (1.4)$$

В работах [28, 29] представлены пьезоэлектрические свойства кристаллов, волновые уравнения пьезоэлектрической среды, эквивалентные схемы и конструктивные элементы пьезоэлектрических преобразователей.

Схемы деформаций, определяющие принцип действия пьезоэлектрического метода измерений, описаны в работе [30].

Пьезоэлектрический метод измерения угловых перемещений имеет динамический характер, т. е. устройства, в которых используют этот принцип, не

могут работать на постоянном токе [31]. Поэтому широкое применение нашли пьезорезонансные датчики [32]. Среди них для измерения углового перемещения наиболее часто применяемыми являются резонансные контактные преобразователи [33]. В основе этих датчиков лежит изменение добротности автоколебательного контура при воздействии входной величины.

Преимущества метода: удобство применения в цифровых измерительных системах; малые массогабаритные параметры; высокая стабильность выходных параметров чувствительного элемента.

Недостатки метода: необходимость дополнительных звеньев для связи с резонатором; температурная зависимость; подверженность внешним шумам (тепловому шуму, флуктуациям питающего напряжения и других параметров компонентов схемы и т. д.); нелинейность, вызванная гистерезисом.

### 1.1.6. Магнитный метод на основе эффекта Холла

Развитие исследований по измерению неэлектрических величин, в том числе углового перемещения, с применением эффекта Холла тесно связано с работами Института автоматики Польской академии наук, в частности с публикациями Налэнча [34].

Эффект Холла возникает при воздействии магнитного поля на ток, протекающий в полупроводнике [35] (рис. 1.5).

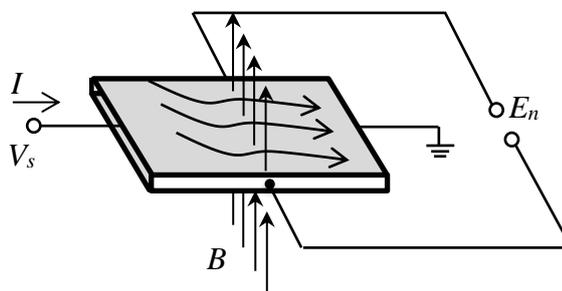


Рис. 1.5. Иллюстрация возникновения эффекта Холла:

$I$  – ток в полупроводнике;  $V_s$  – напряжение пьезоэффекта;  $E_n$  – питающее напряжение;  $B$  – индукция внешнего магнитного поля

Электродвижущая сила (ЭДС), возникающая в результате эффекта Холла, пропорциональна векторному произведению индукции  $B$  на плотность тока  $j$  и определяется выражением

$$E_H = \frac{d}{q_n} [B \times j], \quad (1.5)$$

где  $d$  – ширина пластины;  $q$  – заряд частицы-носителя;  $n$  – концентрация носителей.

Суть магнитного метода заключается в зависимости ЭДС Холла от углового перемещения в результате изменения одного из параметров, влияющих на ЭДС. В работе [36] таким параметром является индукция  $B$ . На рис. 1.6 показана конструкция преобразователя, реализующего указанный метод.

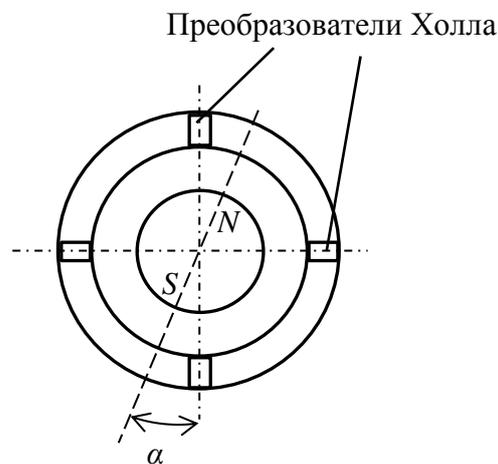


Рис. 1.6. Конструкция преобразователя углового перемещения на базе преобразователей Холла:  $N, S$  – полюсы магнита;  $\alpha$  – угловое перемещение

Преобразователи Холла являются неподвижными, а вращающаяся часть представляет собой намагниченный в радиальном направлении вал  $N-S$ , соединенный с вращающимся объектом. Остальные два зазора сделаны для устранения асимметрии магнитной цепи датчика. В них согласно работе [37] могут помещаться на одной оси еще два преобразователя Холла. При этом преобразователи, расположенные на одной оси, соединяются попарно параллельно относительно токовых зажимов и последовательно по холловским выводам. Такие преобразователи с наружным диаметром  $D = 1...3$  см могут обеспечить

точность  $0,1^\circ$  [38]. Одно из современных применений бесконтактного магнитного метода измерения углового перемещения на основе датчиков Холла показано в работе [34]. Еще один вариант применения магнитного метода представлен в работе [39], где вводится несоосность между осью вращения кругового или кольцевого магнита и осью относительного вращения между магнитом и преобразователем Холла.

Преимущества метода: малые габариты датчиков; бесконтактный способ измерения.

Недостатки метода: низкая устойчивость к электромагнитным полям; необходимость в присоединении подвижного элемента датчика к объекту исследования.

### 1.1.7. Магниторезистивный метод

Этот метод измерения основан на изменении электрического сопротивления при воздействии магнитного поля. Это происходит путем изменения подвижности носителей заряда, их средней концентрации и соотношения размеров проводящего канала [40]. Сопротивление проводящего канала при наличии носителей заряда двух знаков определяется выражением

$$R = \frac{l}{se(nu_n + pu_0)}, \quad (1.6)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n$  и  $u_n$  – средняя концентрация и подвижность электронов (анионов) соответственно;  $p$  и  $u_0$  – средняя концентрация и подвижность дырок (катионов);  $l$  и  $S$  – длина и сечение проводящего канала.

Таким образом, влияя на параметры магнитного поля в результате изменения углового перемещения объекта исследования, можно изменять электрическое сопротивление различных материалов.

Магниторезистивный эффект наблюдается в чистых металлах, полупроводниках и электролитах.

Наиболее распространенным чувствительным элементом, который входит в состав преобразователей, реализующих этот метод, является магниторезистор. Изменение его сопротивления обусловлено изменением подвижности носителей заряда [41]. В работе [42] представлены магниторезистивные кривые для устройств различной геометрии.

Влияние направления магнитного поля на магниторезистор показано на рис.1.7.

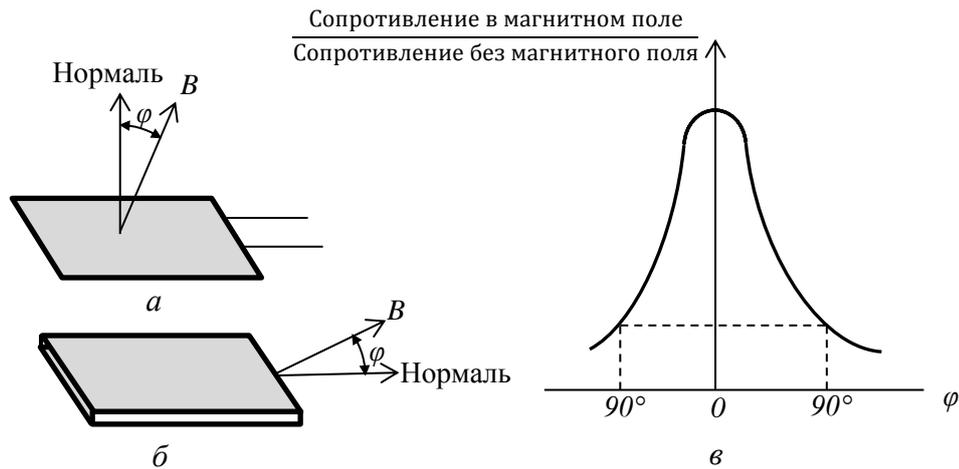


Рис. 1.7. Влияние направления магнитного поля на магниторезистор:  
*a, б* – направление поля; *в* – кривая сопротивления; *B* – индукция внешнего магнитного поля;  $\varphi$  – угол между нормалью к плоскости магниторезистора и индукцией внешнего магнитного поля

Важно также отметить, что магниторезисторы чувствительны к общему магнитному полю, а не к скорости его изменения. Примером устройства, построенного на базе магниторезистивного метода измерения, может быть преобразователь [43], который имеет цифровой выходной сигнал.

Преимущества метода: низкие шумы (если нет трещин в результате ошибки монтажа); помехозащищенность от поверхностных эффектов; устойчивость к старению; возможность бесконтактного измерения.

Недостатки метода: необходимость магнита; неустойчивость к электромагнитным полям; гистерезис; температурная зависимость магниторезистивного элемента.

### 1.1.8. Индуктивный метод

Этот метод измерения основан на преобразовании величины углового перемещения в соответствующее изменение индуктивности путем изменения параметров магнитной цепи [44].

Индуктивность расположенных на магнитопроводе витков при отсутствии рассеяния магнитного потока [45] определяется формулой

$$L = N^2 / Z_m. \quad (1.7)$$

Здесь  $N$  – количество витков;  $Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}$  – магнитное сопротивление,

где  $R_m = \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_0 \mu_k S_k} + \frac{\delta}{\mu_0 S}$  – активная составляющая магнитного

сопротивления;  $l_k$ ,  $S_k$ ,  $\mu_k$  – длина, площадь поперечного сечения и относительная магнитная проницаемость  $k$ -го участка магнитопровода соответственно;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость пустоты;  $\delta$  – длина воздушного зазора;  $S$  – площадь поперечного сечения воздушного участка магнитопровода;  $X_m = \frac{P}{\omega \Phi^2}$  – реактивная составляющая магнитного сопротивления;  $P$  – потери в магнитопроводе на частоте  $\omega$ , обусловленные вихревыми токами и гистерезисом;  $\Phi$  – магнитный поток в магнитопроводе.

Индуктивный принцип измерения классифицируют следующим образом [46]:

а) одинарный индуктивный метод, когда для измерения применяется один неподвижный магнитопровод с катушкой и подвижный якорь;

б) дифференциальный индуктивный метод, в котором применяются два магнитопровода с отдельными катушками и подвижный якорь.

На рис. 1.8 показаны устройства, работающие по одинарному индуктивному методу измерения углового перемещения. Изменяя профиль диска, можно получить любой вид зависимости индуктивности от угла поворота диска.

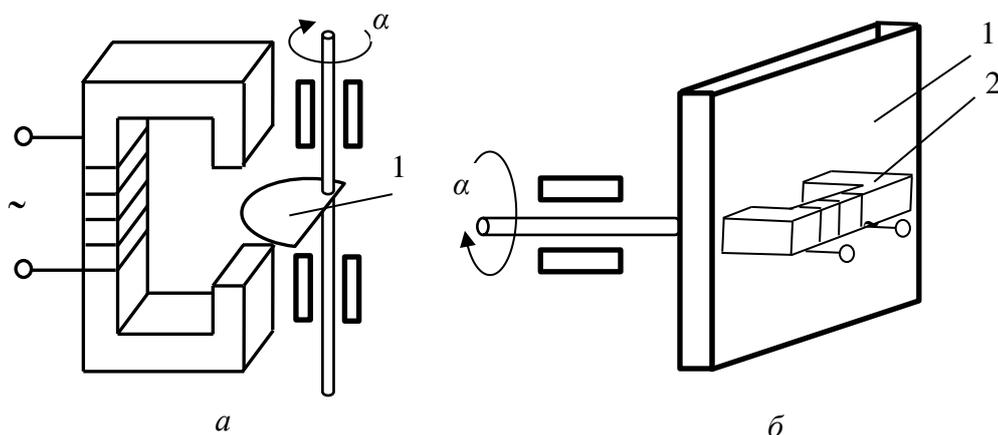


Рис. 1.8. Одинарный индуктивный метод измерения углового перемещения:

*а* – с изменяющимся профилем диска; *б* – с подвижным сердечником;

1 – подвижный сердечник, 2 – неподвижный сердечник;  $\alpha$  – угловое перемещение

Примерами цифровых преобразователей угол-код, основанных на индуктивном методе измерения, могут быть такие устройства, как индукционный редуктосин [47] и круговой индуктосин [48].

Преимущества метода: бесконтактный способ измерения; высокая чувствительность; значительная мощность выходного сигнала.

Недостатки метода: температурная погрешность, связанная с изменением активного сопротивления обмотки; значительная сила притяжения якоря; подверженность электромагнитным помехам; необходимость высокочастотного питающего напряжения.

### 1.1.9. Трансформаторный метод

Этот метод основан на зависимости взаимной индукции двух обмоток от входной величины (углового перемещения). В отличие от индуктивного метода изменение взаимоиндуктивности  $M_{ij}$  можно получить не только путем варьирования магнитного сопротивления, но и при перемещении самих обмоток друг относительно друга [49]. Взаимоиндуктивность описывается формулой

$$M_{ij} = \frac{\omega_i \omega_j}{Z_m}, \quad (1.8)$$

где  $\omega_j$  и  $\omega_i$  – количество витков  $i$ -й и  $j$ -й обмоток;  $Z_m$  – магнитное сопротивление.

На рис. 1.9 показан аналоговый трансформаторный преобразователь углового перемещения [50].

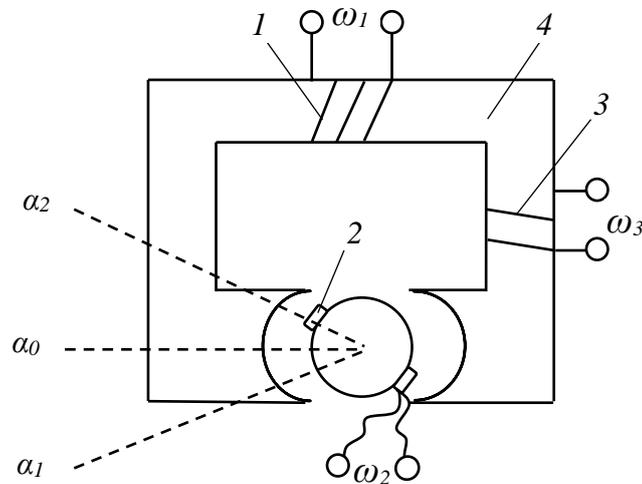


Рис. 1.9. Аналоговый трансформаторный преобразователь углового перемещения: 1, 2, 3 – обмотки;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  – количество витков 1, 2, 3 обмоток;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – крайние угловые положения поворотной рамки;  $\alpha_0$  – среднее угловое положение поворотной рамки

В нем обмотка 2 выполнена в виде рамки, имеющей возможность поворачиваться в кольцевом зазоре магнитной цепи 4. В тех случаях, когда хотят получить изменение ЭДС  $E$  преобразователя от нуля до максимального значения при повороте рамки от одного крайнего положения ( $\alpha_1$ ) в другое ( $\alpha_2$ ), последовательно с рамкой включают дополнительную обмотку 3.

В работе [51] представлен дифференциальный трансформаторный преобразователь углового перемещения, а в работе [52] – цифровые устройства в виде сельсинов и синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ), где используется трансформаторный метод измерения.

Преимущества метода: бесконтактный способ измерения; простота конструкции; высокая точность.

Недостатки метода: высокие массогабаритные показатели; чувствительность к электромагнитным полям.

### 1.1.10. Магнитострикционный метод

Этот метод основан на явлении магнитострикции, которое заключается в зависимости магнитной проницаемости материала от приложенных к нему усилий [53]. Для измерения углового перемещения применяется обратный магнитострикционный эффект, который называется магнитоупругостью [54].

Относительное изменение магнитной проницаемости  $\mu$  от механических напряжений  $\sigma$  [55] выражается зависимостью

$$\frac{d\mu}{\mu} = \frac{1}{\pi} \mu_n \lambda_0 \sigma, \quad (1.9)$$

где  $\mu_n$  – начальная магнитная проницаемость;  $\lambda_0$  – начальная магнитострикция;  $\sigma$  – механическое напряжение.

Из выражения (1.9) следует, что чувствительность ферромагнитного материала к упругим напряжениям тем больше, чем больше начальная магнитная проницаемость и начальная магнитострикция.

Однако в технике при измерении этим методом решающим, как правило, является не относительное изменение магнитной проницаемости, а ее абсолютное приращение [56].

Магнитострикционные устройства могут иметь самые различные конструктивные исполнения, но основным его компонентом является магнитопровод (или система магнитопроводов), включающий в себя звенья, которые изменяют свои характеристики благодаря магнитострикционному эффекту.

Вопросы моделирования и исследования магнитострикционного метода измерения угловых перемещений на базе изгибных деформаций активного элемента рассмотрены в работе [57]. Приведены уравнения, описывающие процессы изгибного деформирования магнитострикционных пластин. В работе [58] представлена классификация магнитострикционных преобразователей.

В качестве примера цифрового магнитострикционного измерителя углового перемещения может быть взято устройство, показанное в работе [59]. Его

выходным параметром является время между импульсами тока возбуждения в волноводе и регистрации ЭДС, возникающей в результате ее действия.

Преимущества метода: высокая надежность вследствие отсутствия подвижных элементов.

Недостатки метода: малый диапазон измерений; гистерезис; деформация чувствительного элемента; сложность конструкции; влияние намагниченности вала объекта исследования; необходимость жесткого заземления одного конца магнитопровода.

### 1.1.11. Оптический метод

Оптический метод измерения основан на зависимости физических параметров светового излучения от углового перемещения, которое воздействует на него непосредственно или косвенно [60].

В устройствах, работающих на оптическом принципе измерения, используются такие физические явления: внешний фотоэффект, внутренний фотоэффект, фотоэффект с запирающим слоем, внешний фотоэффект со вторичной электронной эмиссией [61]. В табл. 1.1 представлены параметры оптического излучения, изменяющиеся под воздействием измеряемой величины.

Таблица 1.1

Параметры оптического излучения, которые зависят от измеряемой величины

№ п/п	Параметр изменения	Характер изменения
1	Направление распространения	Отклонение
2	Поток, интенсивность	Модуляция прерыванием
3	Фаза	Разность фаз двух лучей из-за разности хода

В работах [62–64] представлена классификация фотоэлектрических схем измерения углового перемещения. Принцип действия фотоэлектрической схемы с

перекрытием светового потока описан в работе [65], а рефлективной схемы – в работе [66].

Отличительной особенностью фотоэлектрической растровой схемы оптического метода является модуляция светового потока по амплитуде при прохождении его через оптический модулятор, состоящий из двух решеток: подвижной (измерительной) и неподвижной (индикаторной) [67]. Повышение точности измерения возможно благодаря методике синтеза модели функции пропускания растрового сопряжения, представленного в работе [68].

Волоконно-оптические схемы измерения углового перемещения зависят от параметра модуляции светового потока и характера явлений, происходящих в оптоволокне [69]. Как правило, они содержат две группы волоконной оптики:

- а) передающие волокна, подключенные к источнику света;
- б) принимающие сигнал волокна, которые подсоединены к фотоприемнику и объединены в одном корпусе.

Простейшие принципиальные схемы, которые применяются для обработки сигналов, представлены в работах [70–73]. В таких схемах в качестве фотоприемников могут быть использованы фотодиоды, фототранзисторы, лавинные фотодиоды, фотодиоды Шотки, PIN-фотодиоды, приборы с зарядовой связью [74, 75]. В работах [76, 77] представлены основные элементы оптических схем, а также характеристики и особенности светоизлучающих диодов и лазерных источников излучения.

Преимущества метода: бесконтактный способ измерения; дистанционность; высокая точность измерения; высокая степень интеграции конструктивных элементов; малые массогабаритные показатели; простота интерфейсных схем; высокая чувствительность; высокое быстродействие; удобство сопряжения с современными компьютерными системами.

Недостатки метода: необходимость точной юстировки оптических элементов; необходимость периодической калибровки; временная и температурная нестабильность характеристик.

### 1.1.12. Сравнительный анализ и выбор метода для измерения угловых перемещений

В сводной табл. 1.2 представлены сравнительные характеристики анализируемых методов измерения угловых перемещений.

Таблица 1.2

#### Сводная таблица преимуществ и недостатков методов измерения угловых перемещений

Недостатки	Преимущества
Потенциометрический метод	
Наличие зоны нечувствительности; неравномерность статической характеристики при нагрузке; погрешность от люфта; влияние механических вибраций	Простота построения измерительных схем; высокий уровень выходного сигнала и малые габаритные размеры; низкая стоимость
Тензометрический метод	
Необходимость согласования температурных коэффициентов тензорезистора и упругого элемента; температурная нестабильность; наличие механических передаточных звеньев	Высокая технологичность изготовления чувствительного элемента; линейность выходной характеристики
Гравитационный метод	
Низкая устойчивость к вибрациям; работа устройств только в плоскости действия вектора гравитационных сил; зависимость диапазона измерения от формы корпуса датчика; неработоспособность в условиях отсутствия гравитационных сил или в условиях переменной гравитации	Высокая точность; линейность выходной характеристики; возможность создания малогабаритных устройств; простота реализации и установки датчиков на объектах
Емкостный метод	
Подверженность влиянию электромагнитных полей; конструктивные материалы должны иметь малый коэффициент линейных расширений; необходимость в источнике питания высокой частоты; зависимость выходной величины от параметров источника питания; тщательная изоляция деталей датчика	Отсутствие механического трения; длительность срока службы; высокая технологичность выполнения конструктивных элементов; возможность реализации любой зависимости изменения емкости от изменения измеряемой величины

Продолжение табл.1.2

Недостатки	Преимущества
<b>Пьезоэлектрический метод</b>	
Необходимость дополнительных звеньев для связи с резонатором; температурная зависимость; подверженность внешним шумам (тепловому шуму, флуктуациям питающего напряжения и других параметров компонентов схемы и т. д.); нелинейность, вызванная гистерезисом	Удобство применения в цифровых измерительных системах; малые массогабаритные параметры; высокая стабильность выходных параметров чувствительного элемента
<b>Магнитный метод на основе эффекта Холла</b>	
Низкая устойчивость к электромагнитным полям; необходимость в присоединении подвижного элемента датчика к объекту исследования	Малые габариты; бесконтактный способ измерения
<b>Магниторезистивный метод</b>	
Необходимость магнита; неустойчивость к электромагнитным полям; гистерезис; температурная зависимость магниторезистивного элемента	Низкие шумы; помехозащищенность от поверхностных эффектов; устойчивость к старению; возможность бесконтактного измерения
<b>Индуктивный метод</b>	
Температурная погрешность, связанная с изменением активного сопротивления обмотки; значительная сила притяжения якоря; подверженность электромагнитным помехам; необходимость высокочастотного питающего напряжения	Бесконтактный способ измерения, высокая чувствительность; значительная мощность выходного сигнала
<b>Трансформаторный метод</b>	
Высокие массогабаритные показатели; чувствительность к электромагнитным полям	Бесконтактный способ измерения; простота конструкции; высокая точность
<b>Магнитострикционный метод</b>	
Малый диапазон измерений; гистерезис; деформация чувствительного элемента; сложность конструкции; влияние намагниченности вала объекта исследования; необходимость жесткого заземления одного конца магнитопровода	Высокая надежность вследствие отсутствия подвижных элементов

Недостатки	Преимущества
Оптический метод	
Необходимость точной юстировки оптических элементов; необходимость периодической калибровки; временная и температурная нестабильность характеристик	Бесконтактный способ измерения; дистанционность; высокая точность измерения; малые массогабаритные показатели; простота интерфейсных схем; высокая чувствительность; высокое быстродействие; удобство сопряжения с современными компьютерными системами

В зависимости от прикладной сферы применения, основных требований и условий проведения исследовательских проектов можно использовать один из перечисленных выше методов измерения угловых перемещений. Однако для реализации высокотехнологичных проектов оптический метод имеет ряд преимуществ, соответствующих задачам, которые необходимо решить в этих проектах. Поэтому в дальнейшем будут проанализированы устройства, реализующие указанный метод измерения.

## **1.2. Оптические устройства измерения угловых перемещений**

### **1.2.1. Анализ фотоэлектрических устройств преобразования угловых перемещений**

Устройства оптоэлектроники имеют ряд преимуществ перед исключительно электронными устройствами [78]:

- гальваническая развязка между входными и выходными цепями;
- широкая полоса пропускания и преобразования сигналов;
- отсутствие обратного влияния приемника сигнала на источник;
- высокая информационная емкость оптических каналов связи.

В инкрементальных энкодерах (рис. 1.10) цифровой код образуется путем суммирования элементарных приращений угла.

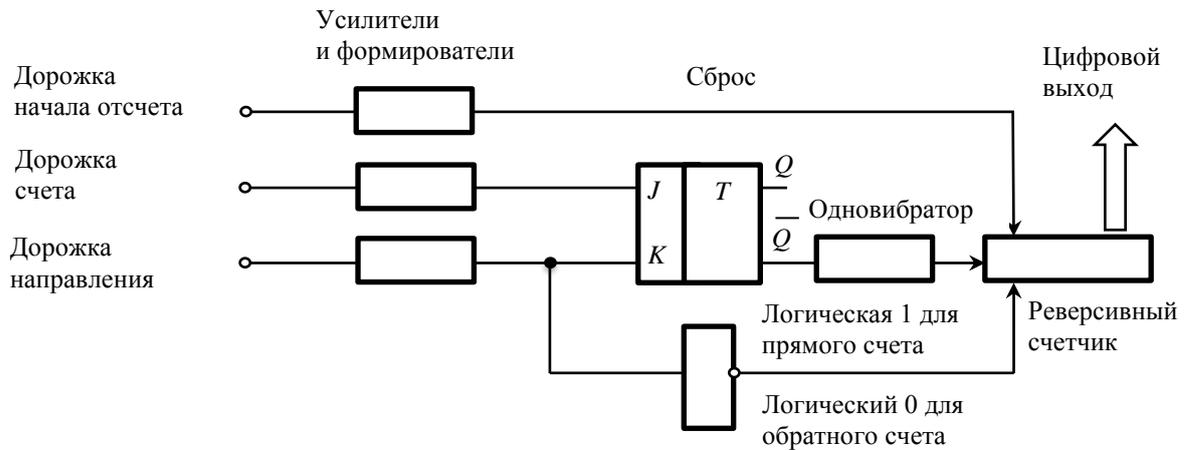


Рис. 1.10. Схема инкрементального энкодера

Для определения направления перемещения дорожки применяется второе считывающее устройство, которое сдвинуто относительно первого на  $\frac{1}{4}$  периода. В зависимости от направления перемещения дорожки суммирующий счетчик работает в режиме сложения или вычитания. На выходе сумматора получается цифровой код углового перемещения, привязанный к произвольному началу отсчета [79].

Гистерезис, присущий такой схеме, способствует предотвращению ложного счета, создаваемого шумом приемника при прохождении границы переключения.

В работе [80] представлен датчик угловых перемещений, который состоит из источника света и вращающейся растровой шайбы. Недостатком этого устройства является отсутствие возможности определить направление вращения объекта исследования.

Преобразователь [81] позволяет повысить точность измерения путем одновременного измерения угла поворота и текущих отклонений вала преобразователя в радиальном направлении. Область применения – повышение точностных параметров лазерных генераторов изображений с круговым сканированием для формирования прецизионных углоизмерительных структур [82].

Недостатком представленного устройства является трудоемкость и высокая стоимость изготовления дополнительных высокоточных элементов, а также применение дополнительных фотоприемников.

Принцип действия абсолютных энкодеров основан на преобразовании углового положения вала в код посредством пространственного кодирования [83]. Для кодировки углового перемещения применяют различные методы кодирования. В основном характеристики устройства определяются качеством выполнения диска [84]. Преимущества абсолютных энкодеров перед инкрементальными: независимость измерения от предыдущего положения диска, отсутствие накопления ошибок, простота электрической схемы, высокая надежность и устойчивость к дестабилизирующим внешним факторам. Общим недостатком устройств этого класса является сложность изготовления высокоточных конструктивных элементов [85].

В работе [86] представлен двухканальный датчик угла поворота вала, фоточувствительные элементы которого сформированы в сплошной полупроводниковой пластине, а контакты к ним, имеющие форму кодового поля, состоят из прозрачных окон, а в определенных местах контакта – из непрозрачного металла. Из того же металла формируют общий электрод полупроводниковых фоточувствительных элементов. Недостатком представленного устройства является наличие большого количества светодиодов, фоточувствительных элементов, а также наличие трения контактов съема сигнала.

Недостатками однокоординатного фотоэлектрического автоколлиматора [87] являются: сложность конструктивного исполнения устройства, необходимость преобразования измеряемой величины линейного перемещения в угловую величину. В работе [88] представлено устройство, с помощью которого определяют угловое перемещение охладителя микрокриогенной системы Стирлинга при охлаждении матричных фотоприемных устройств. Его главным недостатком является необходимость разработки специализированного автоколлиматора.

В научном труде [89] описано устройство, основанное на измерении углов падения при исследовании оптических параметров тонких слоев в полупроводниковых гетероструктурах. Оно имеет следующие недостатки: наличие сложной оптической системы, дороговизна изготовления составляющих компонентов функциональной схемы, необходимость юстировки оптической схемы с помощью гелий-неонового лазера.

Среди недостатков устройства, представленного в работе [90], можно выделить следующие: большое количество фотоприемников, технологическая сложность и трудоемкость в изготовлении кодового диска.

### **1.2.2. Анализ волоконно-оптических устройств преобразования угловых перемещений**

Работа волоконно-оптических преобразователей базируется на таких физических законах и понятиях: законы Френеля, закон Снеллиуса, угол Брюстера, критический угол падения [91, 92].

В трудах [93–96] описаны основные элементы волоконно-оптических преобразователей, способы их сопряжения и технического обслуживания, характеристики различного вида оптоволокна. Способы классификации волоконно-оптических датчиков рассмотрены в работах [97, 98]. Важными составляющими компонентами волоконно-оптических измерительных систем являются коммутаторы. В работе [99] рассмотрен принцип работы современного акустооптического коммутатора волоконно-оптических линий связи, приведены основы акустооптического взаимодействия, структура коммутатора, параметры основных элементов и принципы их функционирования.

В работе [100] приведены принципы построения, классификация, математические модели и методика расчета преобразователей на основе полых световодов. Одним из представителей этой группы является фотоэлектрический функциональный преобразователь угловых перемещений [101], изображенный на

рис.1.11. К недостаткам следует отнести технологическую сложность изготовления профилированного фоторезистора, наличие большого количества оптических элементов, необходимость присоединения к валу объекта исследования.

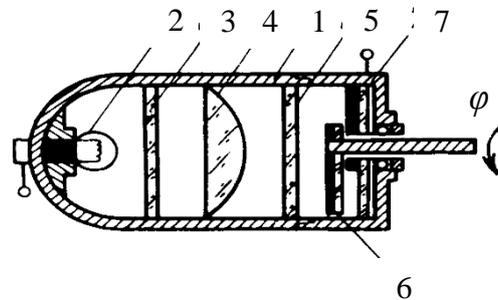


Рис. 1.11. Конструкция фотоэлектрического функционального преобразователя угловых перемещений:

- 1 – полый световод; 2 – источник излучения; 3 – тепловой экран;
- 4 – фокусирующая линза; 5 – защитное стекло; 6, 7 – профилированные фоторезисторы

Еще одним представителем волоконно-оптических устройств с полым световодом является преобразователь угловых перемещений [102]. Устройство имеет следующие недостатки: низкая помехозащищенность из-за наличия магнитной связи, технологическая сложность изготовления зеркальных световодов и конструкции преобразователя.

Известен фотоэлектрический датчик угловых перемещений, который имеет в своем составе корпус, размещенные в корпусе и оптически связанные источник света, световоды и фотоприемный блок [103]. Недостатками известного фотоэлектрического датчика угловых перемещений являются наличие вала датчика, который необходимо механически связать с объектом, а также незащищенность от одновременного засвечивания соседних входных торцов световодов.

В работе [104] представлено устройство для измерения малых угловых перемещений, которое имеет в своем составе оптически связанные источник света,

световод и фотоприемный блок. Оно имеет следующие недостатки: узкий диапазон измерения и сложность схемы обработки сигналов.

Фотоэлектрический датчик угловых перемещений, который содержит кодовый диск с избыточным цифровым кодированием, рассмотрен в работе [105]. Недостатком этого устройства является наличие массива фотодатчиков и избыточность цифрового кодирования, что усложняет схему обработки информации и технологичность изготовления кодового диска.

### **1.3. Выводы по анализу технологий измерения угловых перемещений**

Анализ технологий измерения угловых перемещений показал, что для реализации высокотехнологичных и высокоточных проектов с применением компьютерных систем, в особенности касающихся процессов контроля, оптический метод измерения угловых перемещений имеет ряд преимуществ, которые помогают адекватно решить поставленные в этих проектах задачи.

В результате проведенного анализа оптических (фотоэлектрических и волоконно-оптических) устройств было также выявлено, что существует нехватка устройств, которые бы одновременно имели следующие преимущества:

- малые габариты конструкций;
- возможность производить высокоточные измерения без внесения изменений в конструкцию объекта исследования;
- небольшое количество оптических элементов (световодов, фотоприемников и т. д.).

Таким образом, возникает необходимость в разработке новых методов и средств измерения угловых перемещений для компьютерных систем, что будет рассмотрено в последующих разделах монографии.

## 2. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с применением кодирующей дуги и устройство для его реализации

В работе [106] предложен метод фотоэлектрического измерения углового перемещения, согласно которому источник излучения закрепляется на конце объекта вращения, принимающие оптические элементы размещены по дуге, очерченной поверхностью этого объекта.

На рис. 2.1 показана функциональная схема устройства.

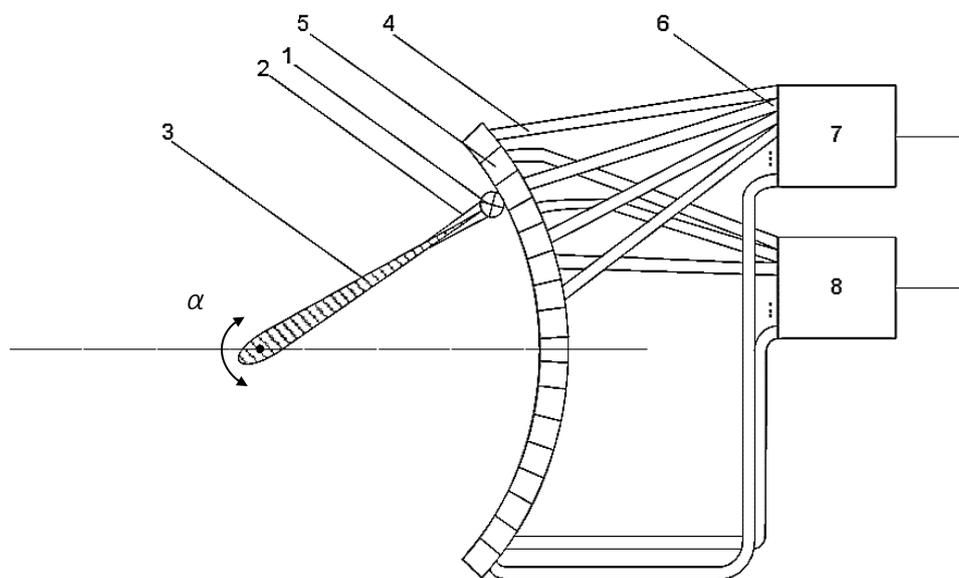


Рис. 2.1. Функциональная схема устройства, реализующего предложенный фотоэлектрический метод измерения:

- 1 – лазерный излучатель; 2 – зажим; 3 – рулевая поверхность самолета;
- 4 – световоды; 5 – входные торцы световодов; 6 – выходные торцы световодов; 7, 8 – фотоприемники

Для того чтобы исключить возможность одновременного засвечивания нескольких входных торцов световодов источником света, существует два решения указанной проблемы [107]:

- 1) используется дополнительный блок, отвечающий за разделение информации;
- 2) выходные торцы световодов информационного канала разделены на четные и нечетные группы, объединены и оптически связаны с фотоприемниками.

Установка дуги с входными торцами световодов осуществляется с помощью металлического башмака [106], который устанавливается на поверхность объекта вращения. Во избежание возможного скольжения башмака на его нижнюю поверхность наносится слой резины (рис. 2.2).

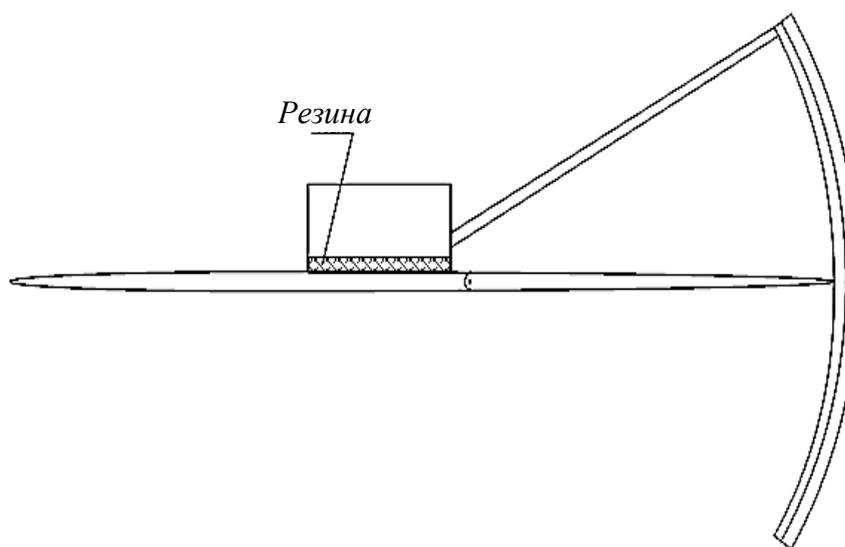


Рис. 2.2. Установка дуги с входными торцами световодов на поверхность объекта вращения

Преимущества предложенного метода фотоэлектрического измерения угловых перемещений таковы:

- автоматизация процесса измерения углового перемещения;
- измерение без изменения конструкции объекта вращения;
- высокое быстродействие.

Недостатки метода:

- большое количество оптических элементов;
- использование башмака и дуги большого радиуса (это увеличивает массогабаритные показатели устройств для его реализации).

## **2.2. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с применением зеркала и устройство для его реализации**

В работе [108] предложен усовершенствованный метод измерения. В его основу положено фотоэлектрическое преобразование угловых перемещений с применением зеркала. Использование указанного метода измерения дает возможность:

- автоматизировать процесс сбора данных об угловых перемещениях;
- проводить высокоточные измерения, не изменяя конструкции объекта вращения;
- уменьшить габаритные параметры измерительного устройства.

Суть метода заключается в следующем. На объекте исследования закрепляют источник излучения таким образом, чтобы его главная ось была направлена радиально по отношению к оси вращения. Когда объект исследования находится в начальном положении, на некотором расстоянии  $B$  от оси его вращения до точки касания луча к зеркалу, под углом  $\beta$  к горизонтали, проходящей через центр оси вращения объекта исследования, устанавливается зеркало, которое закрепляется на опоре и фиксируется с помощью пружины. На расстоянии  $h$  от горизонтали, проходящей через точку касания луча к зеркалу, когда объект исследования находится в конечном положении, фиксируются входные торцы световодов, выходные торцы которых соединяются с фотоприемным блоком. Входные торцы световодов размещаются по горизонтальной линии таким образом, чтобы положение каждого торца отвечало конкретному углу поворота объекта исследования, причем величина угла  $\beta$  должна быть больше величины

максимального угла поворота объекта, а количество световодов определяется формулой

$$n = \frac{\alpha_{max}}{\Delta\alpha}, \quad (2.1)$$

где  $\alpha_{max}$  – максимальный угол поворота объекта исследования;  $\Delta\alpha$  – разрешающая способность.

Для многомодового оптоволокна диаметром оболочки  $d = 125$  мкм, диапазоном измерения углового перемещения  $\alpha \in [0^\circ; 30^\circ]$  и значениями параметров  $B = 100$  мм,  $h = 20$  мм,  $\beta = 45^\circ$  точность достигает  $2,5'$ .

На рис. 2.3 изображена функциональная схема фотоэлектрического преобразователя [109], реализующего усовершенствованный метод с применением зеркала.

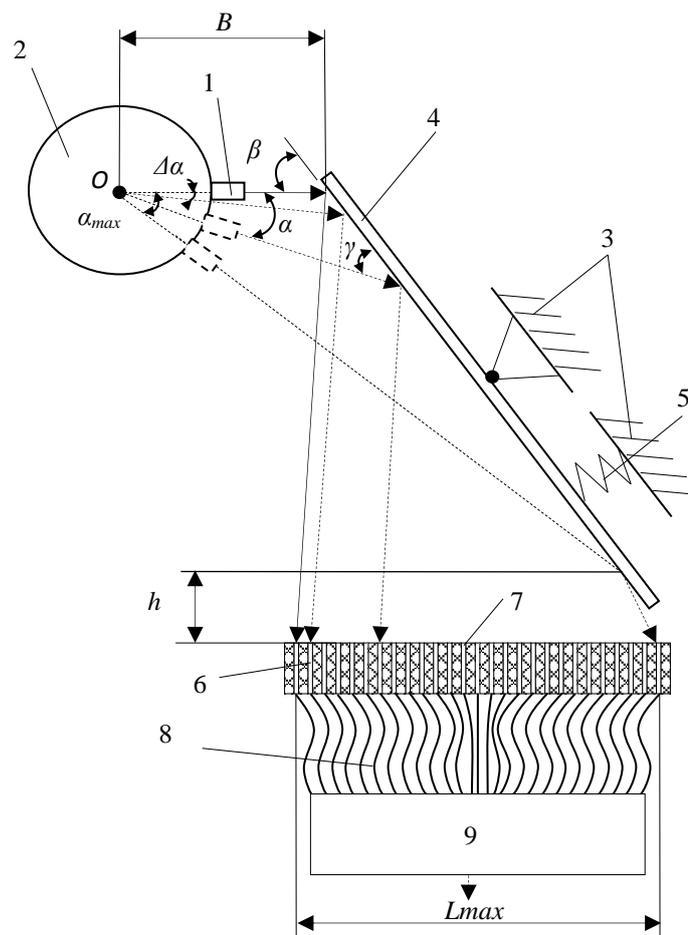


Рис. 2.3. Функциональная схема фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением зеркала

Фотоэлектрический преобразователь угловых перемещений состоит из источника света 1, который закреплен на объекте исследования 2, размещенном в одном корпусе 3 зеркала 4, что с помощью пружины 5 установлено под углом  $\beta$  к горизонтальной оси, которая проходит через центр вращения объекта исследования 2, световодов 6, входные торцы 7 которых размещены по горизонтальной линии таким образом, чтобы положение каждого торца отвечало конкретному углу поворота объекта, а выходные торцы 8 собраны в жгуты и оптически связаны с фотоприемным блоком 9.

Зависимость расстояния, которое проходит луч по горизонтальной линии укладки входных торцов 7 световодов 6, от углового перемещения объекта исследования 2 имеет следующий вид:

$$L = \frac{H}{\operatorname{tg}(2\beta - \alpha)} + \frac{B \sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \left( \cos \beta - \frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(2\beta - \alpha)} \right). \quad (2.2)$$

Здесь  $H = \frac{B \cdot \sin \alpha_{max}}{\sin(\beta - \alpha_{max})} \cdot \sin \beta + h$ , где  $h$  – расстояние от горизонтали, проходящей через точку касания луча к зеркалу, когда объект исследования находится в конечном положении, до входных торцов световодов;  $B$  – расстояние от оси вращения объекта исследования до точки касания луча к зеркалу, когда объект исследования находится в начальном положении;  $\beta$  – угол наклона зеркала по отношению к горизонтальной оси, которая проходит через центр вращения объекта исследования ( $\beta > \alpha_{max}$ );  $\alpha$  – угловое перемещение объекта исследования.

Недостатком метода является сложная математическая зависимость (2.2), что влияет на быстродействие обработки данных.

### **2.3. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с использованием блока поддержки уровня и устройство для его реализации**

Дальнейшее усовершенствование методов фотоэлектрического измерения угловых перемещений основано на использовании такого компонента, как блок

поддержки уровня, который устанавливается на объекте вращения и позволяет сохранять перпендикулярность направления луча от источника света относительно входных торцов световодов, соединенных с фотоприемным блоком.

Применение усовершенствованного метода [110] дает возможность:

- упростить математическую зависимость (2.2);
- провести высокоточные измерения, не изменяя конструкции исследуемого объекта вращения;
- уменьшить габаритные параметры измерительного преобразователя.

Метод измерения угловых перемещений с блоком поддержки уровня заключается в следующем. На объекте исследования закрепляется блок поддержки уровня. На него устанавливается источник света, с которым оптически связаны световоды, входные торцы которых укладываются в горизонтальную линию таким образом, чтобы положение каждого торца отвечало конкретному углу поворота объекта исследования. Выходные торцы световодов присоединяются к фотоприемному блоку.

Зависимость расстояния, которое проходит луч по горизонтальной линии укладки входных торцов световодов, от углового перемещения  $\alpha$  объекта исследования имеет следующий вид:

$$L = R(1 - \cos\alpha), \quad (2.3)$$

где  $R$  – расстояние от оси вращения объекта до точки соединения источника света с объектом исследования;  $\alpha$  – угловое перемещение объекта исследования.

Для многомодового оптоволокна с диаметром оболочки  $d = 125$  мкм, диапазоном измерения углового перемещения  $\alpha \in [0^\circ; 30^\circ]$  и значением  $R = 150$  мм точность достигает  $4,8'$ .

Преобразователь (рис. 2.4), реализующий усовершенствованный метод, состоит из источника света 1, установленного на блоке поддержки уровня 2, который соединен с объектом исследования 3. Источник света 1 оптически связан со световодами 4, входные торцы 5 которых уложены по горизонтальной линии таким образом, чтобы положение каждого торца отвечало конкретному углу

поворота объекта исследования 3. Выходные торцы 6 оптически связаны с фотоприемным блоком 7 [111].

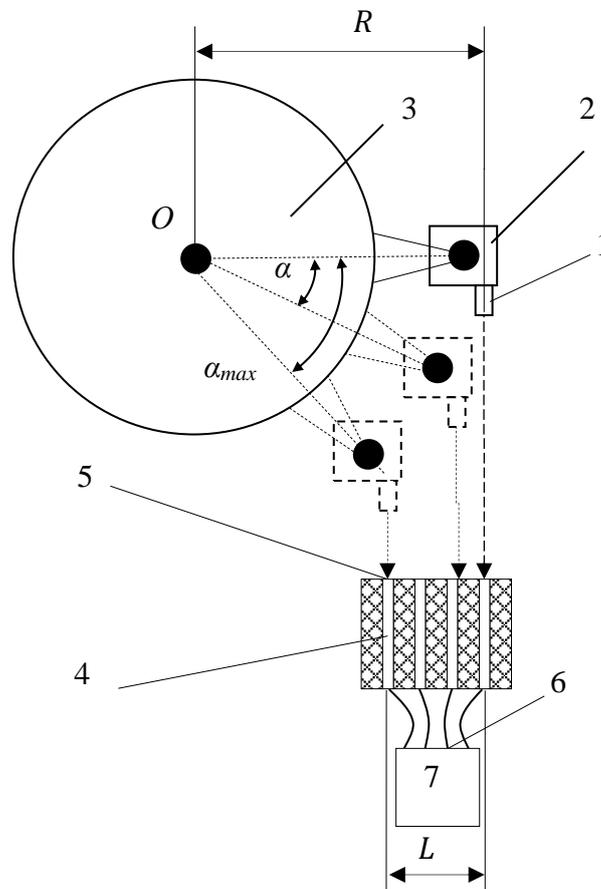


Рис. 2.4. Преобразователь с блоком поддержки уровня

Недостатки метода:

- применение большого количества световодов;
- ограниченный диапазон измерения углового перемещения.

#### **2.4. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с использованием кодового диска и устройство для его реализации**

В работе [112] предложено дальнейшее усовершенствование метода фотоэлектрического измерения угловых перемещений путем применения кодового диска с тремя кодирующими дорожками.

Благодаря применению указанного компонента достигаются следующие преимущества:

- расширяется диапазон измерений до  $360^\circ$ ;
- уменьшается количество световодов до шести.

Усовершенствованный метод измерения с использованием кодового диска заключается в следующем. К валу объекта вращения крепится расположенный в корпусе вал с кодирующим диском, на трех кодирующих дорожках которого выполнены отверстия с дискретностью  $q$ . Кодирующий диск устанавливают между выходными торцами первой группы световодов и входными торцами второй группы световодов. Количество световодов в первой и второй группах равно трем. Входные торцы первой группы световодов размещаются в фоконе, который с помощью фиксатора присоединяется к выходному отверстию осветителя. Входные торцы второй группы световодов оптически связаны с выходными торцами первой группы световодов и отверстиями кодирующего диска, а также соответствующими тремя фотоприемниками, объединенными в одном блоке. Выходы фотоприемников подсоединяются к соответствующим цепям последовательно соединенных усилителей и фильтров, которые подключаются к микропроцессорному блоку или компьютеру, а тот в свою очередь подсоединяется к устройству отображения информации.

Точность метода определяется точностью изготовления кодового диска. Для одномодового оптоволокна с диаметром сердцевины  $d = 10$  мкм [113] и диаметром диска  $D = 50$  мм точность достигает  $1,4'$ .

Для усовершенствованного метода с кодовым диском разработан способ соединения объекта вращения и измерительного устройства [114] между собой. Благодаря этому процесс измерения угловых перемещений можно проводить, не изменяя конструкции исследуемого объекта вращения.

На рис. 2.5 изображена функциональная схема фотоэлектрического преобразователя углового перемещения [109], реализующего усовершенствованный метод с использованием кодового диска.

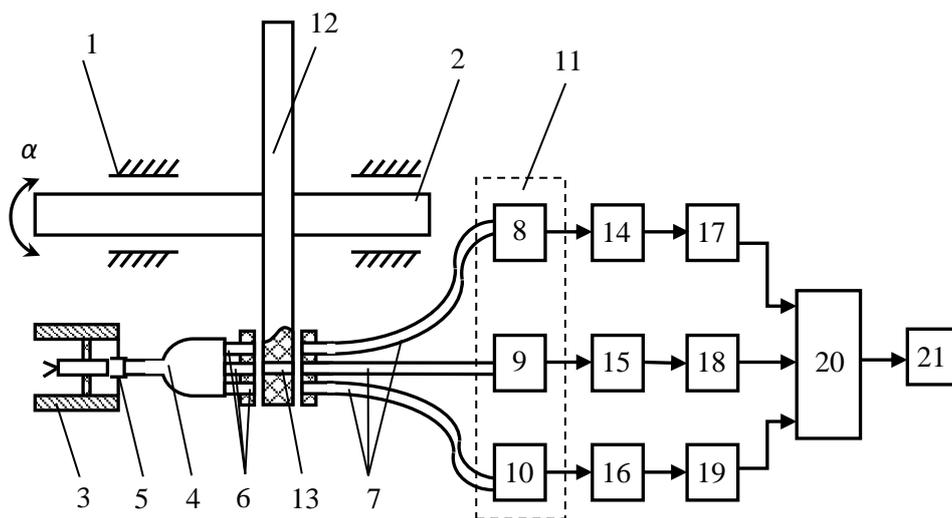


Рис. 2.5. Функциональная схема фотоэлектрического преобразователя углового перемещения с кодовым диском

На рис. 2.6 показан кодовый диск с тремя кодирующими дорожками.

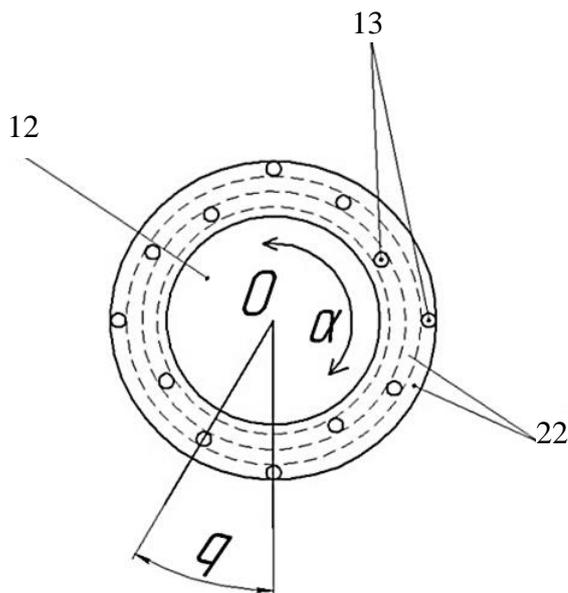


Рис. 2.6. Кодовый диск с отверстиями

Фотоэлектрический преобразователь угловых перемещений имеет в своем составе корпус 1, вал 2, размещенный в корпусе и предназначенный для связывания с объектом, оптически связанные осветитель 3, фокон 4, прикрепленный с помощью фиксатора 5 к выходному отверстию осветителя, где размещены входные торцы первой группы световодов 6, вторую группу световодов 7, своими выходными торцами оптически связанные с

соответствующими тремя фотоприемниками 8, 9, 10 фотоприемного блока 11, диск 12 с отверстиями 13, установленный на валу 2 и размещенный между выходными торцами первой группы световодов 6 и входными торцами второй группы световодов 7, причем выходы фотоприемников 8, 9, 10 подсоединены к соответствующим цепям из последовательно соединенных усилителей 14, 15, 16 и фильтров 17, 18, 19, которые своими выходами подключены к микропроцессорному блоку 20, подсоединенному к устройству отображения 21, а отверстия в диске 12 выполнены на трех дорожках с дискретностью  $q$ .

Преимущества метода:

- высокая точность;
- высокое быстродействие;
- малое количество световодов ( $n = 6$ ).

Недостаток метода:

- высокая стоимость изготовления кодового диска и оптоволоконных компонентов.

## **2.5. Метод фотоэлектрического измерения угловых перемещений с применением держателей оптических элементов и устройство для его реализации**

Дальнейшим усовершенствованием методов фотоэлектрического измерения угловых перемещений для компьютерных систем является разработка метода, в котором не применяются дорогостоящие компоненты, но сохраняется возможность проведения высокоточных измерений без изменения конструкции объекта вращения.

В указанном методе измерения устанавливаются две подставки с держателями, одна из которых с помощью клея присоединяется к неподвижной части объекта исследования, а другая – к объекту вращения. В начальном положении расстояние между держателями равно  $L$ . Источник излучения соединяется с драйвером питания (ДП) и устанавливается на держателе, подставка

которого закрепляется на неподвижной части объекта исследования. Два фотоприемника, оптически связанные с источником излучения, закрепляются на расстоянии  $R$  друг от друга на другом держателе, подставка которого установлена непосредственно на объекте вращения. После этого фотоприемники подключаются к электронному блоку обработки информации (ЭБОИ). Значения расстояний  $R$  и  $L$  определяются, исходя из геометрических размеров объекта вращения.

Функциональная схема фотоэлектрического преобразователя [115], реализующего предложенный метод измерения угловых перемещений, показана на рис. 2.7.

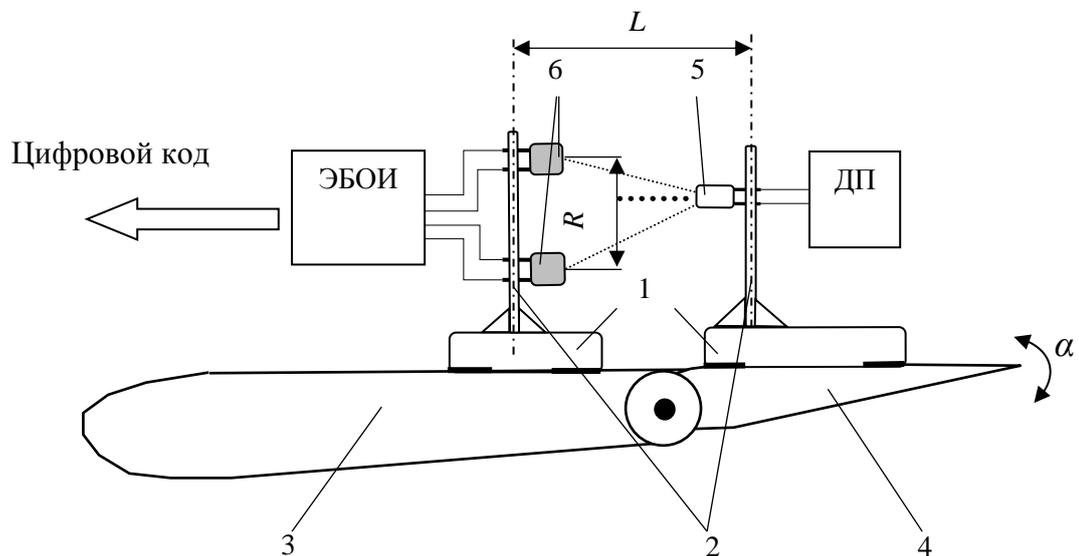


Рис. 2.7. Фотоэлектрический преобразователь для измерения угла поворота рулевых поверхностей самолета:

1 – подставка; 2 – держатели; 3 – объект исследования; 4 – объект вращения; 5 – источник излучения; 6 – фотоприемник

Таким образом, усовершенствованы методы и средства фотоэлектрического измерения угловых перемещений для компьютерных систем. Указанные методы могут использоваться в тех отраслях науки и промышленности, где функционируют объекты вращения, конструкции которых нельзя изменять в процессе измерения и контроля их угловых параметров.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

#### 3.1. Программные средства для оптимизации планов экспериментальных исследований фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений

При исследовании измерительных устройств, информационно-измерительных систем и технологических процессов возникает задача получения математических моделей функционирования указанных объектов [116]. При этом оправдано стремление экспериментаторов получать эти модели при минимальных стоимостных и временных затратах. Особенно эта задача актуальна при исследовании дорогостоящих и длительных процессов.

Задача оптимизации планов многофакторного эксперимента с учетом временных и стоимостных показателей сводится к решению двух экстремальных задач [117]:

$$S_0 = \sum_{i=1}^k V_i^{a_{i,1}} + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}} + \sum_{i=1}^k V_i^{a_{i,n}} \rightarrow \min; \quad (3.1)$$

$$t_0 = \sum_{i=1}^k T_i^{a_{i,1}} + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}} + \sum_{i=1}^k T_i^{a_{i,n}} \rightarrow \min; \quad (3.2)$$

где  $k$  – количество факторов;  $n$  – количество опытов;  $a_{i,j}$  – значение  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте;  $V_i^{a_{i,1}}$  – стоимость установки  $i$ -го фактора в состояние  $a_{i,1}$  в первом опыте;  $V_i^{a_{i,n}}$  – стоимость установки  $i$ -го фактора в исходное состояние  $a_{i,n}$  в последнем опыте;  $S_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}}$  – стоимость установки  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте;  $T_i^{a_{i,1}}$  – время установки  $i$ -го фактора в состояние  $a_{i,1}$  в первом опыте;  $T_i^{a_{i,n}}$  – время установки  $i$ -го фактора в исходное состояние  $a_{i,n}$  в последнем опыте;  $t_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}}$  – время установки  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте.

В работе [117] также указано, что возможна оптимизация или по критерию (3.1) с ограничением на суммарное время проведения эксперимента  $t_0$ , или по критерию (3.2) с ограничением на суммарную стоимость проведения эксперимента  $S_0$ , т. е.

$$S_0 \rightarrow \min \quad \text{при} \quad t_0 \leq t_{orp}, \quad (3.3)$$

$$t_0 \rightarrow \min \quad \text{при} \quad S_0 \leq S_{orp}. \quad (3.4)$$

В работе [118] проведен сравнительный анализ модифицированных и примененных для синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов многофакторных экспериментов таких методов дискретной оптимизации:

- анализ перестановок (полный перебор);
- случайный поиск;
- метод ветвей и границ;
- последовательного приближения;
- симплекс-метод;
- муравьиные алгоритмы;
- метод имитации отжига;
- жадный алгоритм;
- метод ближайшего соседа;
- генетические алгоритмы;
- табу-поиск;
- метод вложенных разбиений;
- метод символьных последовательностей;
- комбинаторно-графовый метод;
- методы синтеза оптимальных планов дробного и полного факторных экспериментов, основанные на применении кода Грея;
- метод итерационного планирования для оптимизации композиционных планов.

Перечень программ, реализующих эти методы синтеза, показан на рис. 3.1, а также даны рекомендации по применению методов синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов многофакторных экспериментов.

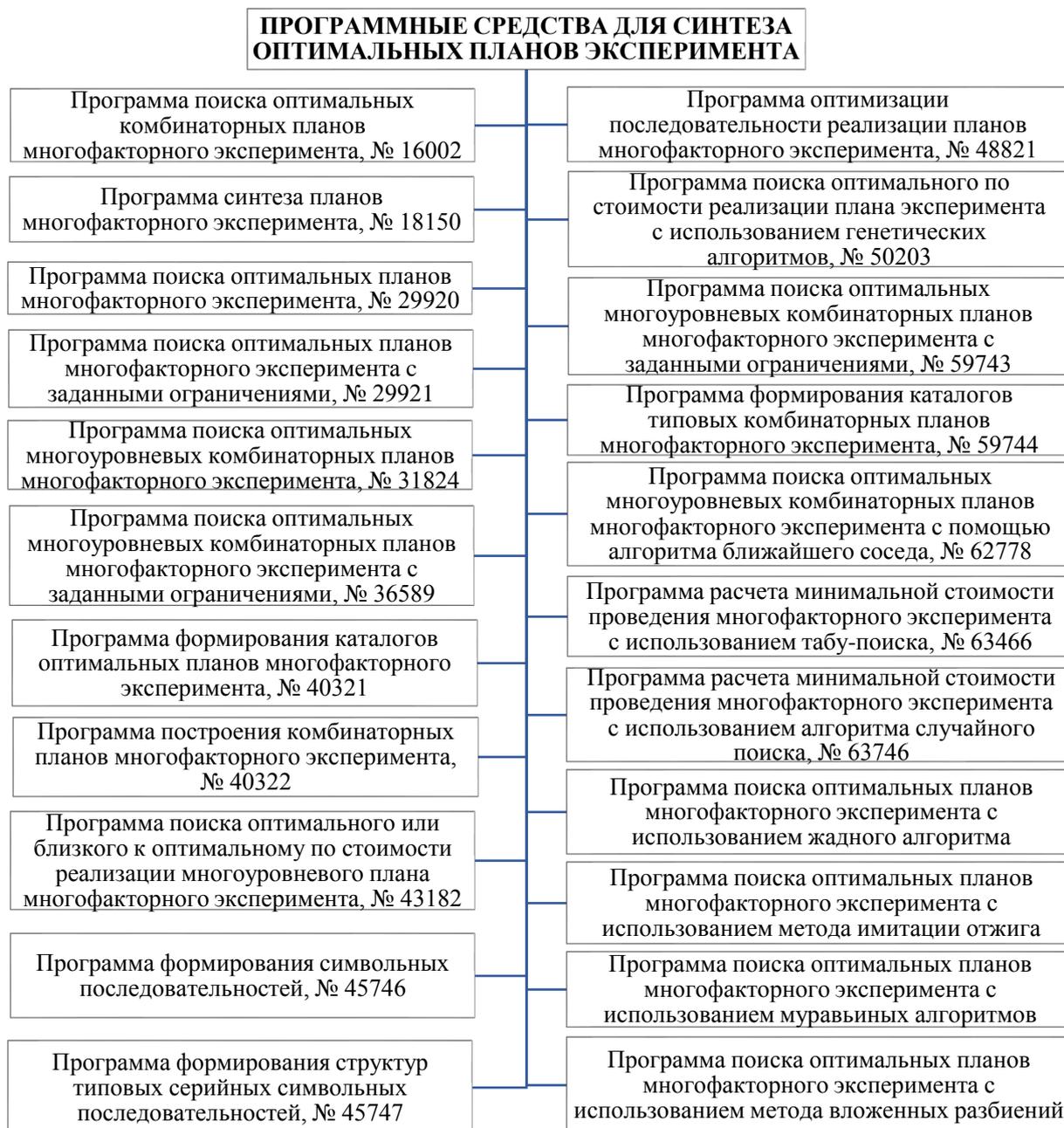


Рис. 3.1. Программное обеспечение для синтеза оптимальных планов эксперимента

Для оценки эффективности применения указанных методов и программ для их реализации проведены исследования на ряде объектов. По результатам указанных исследований можно сделать следующие рекомендации [118].

1. К методам, которые позволяют получить оптимальные по стоимостным (временным) затратам планы многофакторных экспериментов, можно отнести: полный перебор, метод символьных последовательностей, комбинаторно-графовый метод. При этом полный перебор для любых видов эксперимента позволяет получить оптимальное решение, однако его целесообразно применять для планов с количеством факторов  $k \leq 3$ , так как при большем  $k$  значительно увеличиваются число перестановок и временные затраты на поиск, а при современном уровне вычислительной техники эту задачу не всегда можно решить.

Метод символьных последовательностей дает точное решение при оптимизации только планов ПФЭ с количеством факторов  $k \leq 3$ .

Комбинаторно-графовый метод позволяет синтезировать оптимальные по стоимостным (временным) затратам планы только полного факторного эксперимента с количеством факторов  $k \leq 4$ .

2. К методам, которые позволяют получить оптимальные или близкие к оптимальным планы многофакторных экспериментов, следует отнести: анализ перестановок (ограниченный перебор), случайный поиск, методы ветвей и границ, последовательного приближения, итерационного планирования эксперимента, имитации отжига, вложенных разбиений, симплекс-метод, муравьиные алгоритмы, жадный алгоритм, метод ближайшего соседа, генетические алгоритмы, табу-поиск, методы, основанные на применении кода Грея.

Характерными особенностями этих методов являются следующие: применимые для любых видов эксперимента; количество факторов, для которых возможно применение метода, ограничено только вычислительными возможностями ЭВМ; при получении лучшего из рассмотренных вариантов (близкое к минимальному по стоимости (времени) реализации) степень «близости» оценить нельзя; невозможно создание каталогов типовых решений.

Методы, основанные на применении кода Грея, позволяют строить оптимальные по стоимостным (временным) затратам планы дробного и полного факторных экспериментов для любого количества факторов.

3. В результате проведенных исследований [119], в которых для оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов многофакторных экспериментов использовались такие методы, как анализ перестановок (ограниченный перебор), случайный поиск, методы последовательного приближения и ветвей и границ, наибольшие выигрыши в стоимости (времени) реализации получали в основном при применении метода ветвей и границ.

При применении ограниченного перебора и случайного поиска зачастую лучшие результаты давал случайный поиск, позволяющий уходить от локальных оптимумов.

4. Методы, позволяющие получать оптимальные или близкие к оптимальным планы любых многофакторных экспериментов, следует применять для объектов с количеством факторов  $k > 3$ . При этом по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- при исследовании объектов с количеством факторов  $k=3$  результаты оптимизации планов МФЭ приближенными алгоритмами, как правило, совпадают с оптимальным решением, полученным методом полного перебора. Это, в свою очередь, подтверждает правильность разработанных алгоритмов и программ. Иногда исключение составляют методы случайного поиска, ветвей и границ, симплекс-метод, жадный и ячеистый генетический алгоритмы;

- при исследовании объектов с количеством факторов  $k \geq 4$  предпочтение необходимо отдавать муравьиным и генетическим алгоритмам, иногда хорошие результаты дает алгоритм метода ближайшего соседа;

- при оптимизации композиционных планов МФЭ целесообразно использовать метод итерационного планирования эксперимента и комбинированный метод, основанный на применении жадного алгоритма и метода

имитации отжига. Неплохие результаты получаются и при применении генетических алгоритмов и симплекс-метода;

– при оптимизации трехуровневых планов  $3^k$  хорошие результаты получаются при использовании генетических алгоритмов, симплекс-метода и табу-поиска;

– по быстродействию решения задачи оптимизации планов МФЭ методы можно расположить следующим образом: симплекс-метод, табу-поиск, метод ближайшего соседа, жадный алгоритм, имитации отжига, метод вложенных разбиений, генетические алгоритмы.

Таким образом, в соответствии с указанными выше рекомендациями для оптимизации планов экспериментальных исследований фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений для компьютерных систем может применяться одно из разработанных программных средств.

### **3.2. Экспериментальное исследование фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением зеркала**

В подразд. 2.2 монографии представлен фотоэлектрический преобразователь угловых перемещений с применением зеркала [109]. При этом выражение (2.2) характеризует аналитическую зависимость расстояния, которое проходит луч по горизонтальной линии укладки входных торцов световодов, от углового перемещения объекта вращения. Недостатком этой аналитической зависимости является то, что не определены параметры  $B$ ,  $h$ ,  $\beta$ , входящие в ее состав, при которых распределение торцов приемной части является наиболее равномерным, что не дает возможности повысить технологичность изготовления измерительного устройства. Нахождение указанных параметров измерительного устройства для компьютерной системы относится к задаче параметрического синтеза, заключающейся в оптимизации параметров системы, имеющей определенную структуру, с точки зрения заданного критерия [120].

Достижение поставленной цели экспериментального исследования осуществляется с помощью моделирования процесса измерения угловых перемещений в среде Microsoft Excel 2010.

Исследуется фотоэлектрический преобразователь угловых перемещений с применением зеркала со следующими параметрами:

- диапазон измерения угловых перемещений –  $\alpha \in [0; 30^\circ]$ ;
- разрешающая способность устройства –  $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ .

В качестве критерия оптимизации был выбран модуль максимальной разности (рис. 3.2) между  $\Delta L_i$  и  $\Delta L_{cp}$

$$\Delta_{max} = |\Delta L_i - \Delta L_{cp}|, \quad (3.4)$$

где  $\Delta L_i = L_i - L_{i-1}$ ;  $L_i$  – расположение  $i$ -го входного торца световода;  $L_{i-1}$  – расположение  $(i - 1)$ -го входного торца световода;  $\Delta L_{cp}$  – расстояние между соседними входными торцами световодов при их равномерном распределении ( $\Delta L_{cp} = const$ ).

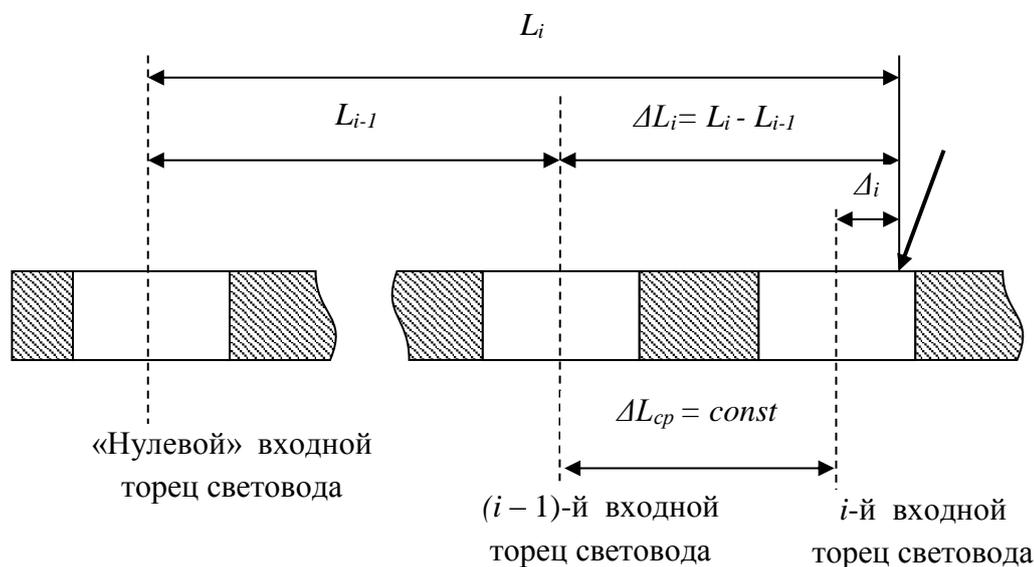


Рис. 3.2. Иллюстрация, поясняющая величины, формирующие критерий оптимизации

Факторами, которые влияют на критерий оптимизации, были выбраны следующие параметры (см. рис. 2.3):

- $X_1 - h$ , мм;
- $X_2 - B$ , мм;
- $X_3 - \beta$ , град.

Интервалы варьирования, а также основные уровни факторов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования	Размерность
	- 1	0	+ 1		
$X_1$	30	40	50	10	мм
$X_2$	30	45	60	15	мм
$X_3$	37	45	53	8	град

Далее был определен исходный план полного факторного эксперимента типа  $2^k$  (число факторов  $k = 3$ , число опытов  $N_{exp} = 8$ ). Матрица планирования такого эксперимента приведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Факторы		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	- 1	- 1	- 1
2	+ 1	- 1	- 1
3	- 1	+ 1	- 1
4	+ 1	+ 1	- 1
5	- 1	- 1	+ 1
6	+ 1	- 1	+ 1
7	- 1	+ 1	+ 1
8	+ 1	+ 1	+ 1

При проведении реального исследования исходный план эксперимента можно оптимизировать по критерию стоимостных затрат на его реализацию с

использованием метода ветвей и границ [121]. Для этого необходимо сформировать матрицу стоимостей изменений значений уровней факторов, исходя из текущих затрат эксперимента (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Стоимости изменений значений уровней факторов

Переход уровней факторов	$S_{X1}$ , у.е.	$S_{X2}$ , у.е.	$S_{X3}$ , у.е.
«0» → «-1»	1,5	4	5,5
«0» → «+1»	1,7	4,5	5,8
«-1» → «0»	1,7	4,2	5,6
«+1» → «0»	1,5	4	5,5
«-1» → «+1»	3,2	6,8	7
«+1» → «-1»	3	5,5	6,4

Исходя из указанных данных, синтезирован оптимальный по стоимости план эксперимента, полученный с помощью применения метода ветвей и границ. Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Результаты реализации оптимального плана эксперимента

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\Delta L_{cp}$ , мм	$\Delta L_{max}$ , мм
5	- 1	- 1	+ 1	0,800	0,044
6	+ 1	- 1	+ 1	0,978	0,053
8	+ 1	+ 1	+ 1	1,510	0,082
7	- 1	+ 1	+ 1	1,331	0,072
3	- 1	+ 1	- 1	2,638	1,057
4	+ 1	+ 1	- 1	2,877	1,153
2	+ 1	- 1	- 1	1,737	0,696
1	- 1	- 1	- 1	1,498	0,600

Стоимость реализации оптимального плана эксперимента составляет 53,9 у. е., а исходного – 69,9 у. е., выигрыш по стоимости равен 1,3 раза.

Произведем оптимизацию исходного плана эксперимента по стоимости методом ветвей и границ с введением ограничения на дополнительный показатель

[122]. Исследование следует провести не более чем за 120 мин. Таким образом, дополнительным показателем, накладывающим ограничение на проведение эксперимента, будет время. В табл. 3.5 показано время изменений значений уровней факторов.

Таблица 3.5

Время изменений значений уровней факторов

Переход уровней факторов	Время, мин		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
«0» → «-1»	9	15	3
«0» → «1»	6	12	3
«-1» → «0»	6	12	3
«1» → «0»	6	12	3
«-1» → «1»	12	24	6
«1» → «-1»	15	27	6

Оптимальный по стоимости реализации план эксперимента приведен в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Оптимальный по стоимости план эксперимента

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$
4	+ 1	+ 1	- 1
8	+ 1	+ 1	+ 1
7	- 1	+ 1	+ 1
3	- 1	+ 1	- 1
1	- 1	- 1	- 1
5	- 1	- 1	+ 1
6	+ 1	- 1	+ 1
2	+ 1	- 1	- 1

Выигрыш по стоимости составил 14 %. При этом на реализацию оптимального плана эксперимента необходимо затратить 120 мин, что не превышает указанного ограничения. Оптимальные параметры  $B$ ,  $h$ ,  $\beta$  с точки зрения равномерности задаются опытом № 5 и графически показаны на рис.3.3.

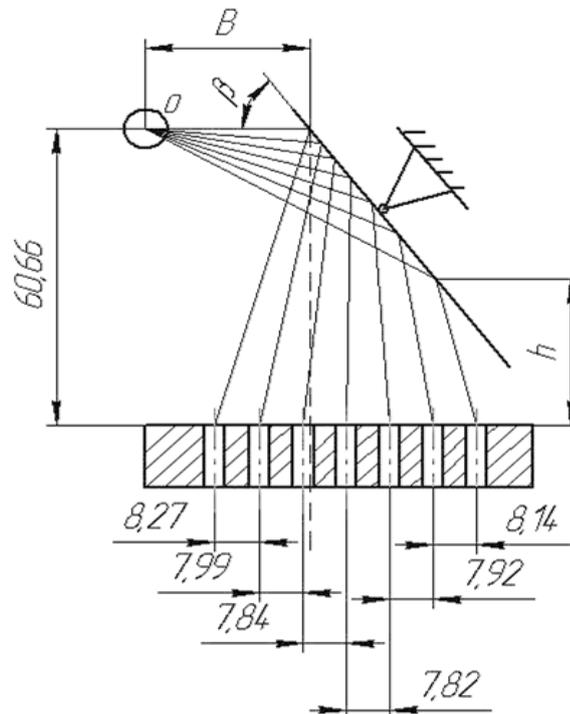


Рис. 3.3. Распределение входных торцов световодов при параметрах:

$$B = 30 \text{ мм}; h = 30 \text{ мм}; \beta = 53^\circ; \Delta\alpha = 5^\circ$$

Итак, определены значения параметров фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением зеркала, входящих в состав аналитической зависимости (2.2), которые являются оптимальными с точки зрения равномерности распределения входных торцов световодов:  $B = 30 \text{ мм}; h = 30 \text{ мм}; \beta = 53^\circ$ . Благодаря проведенному исследованию повышена технологичность изготовления измерительного устройства. Следует отметить, что найденные значения параметров  $B$  и  $h$  могут быть установлены только в случае, когда источник излучения фотоэлектрического преобразователя устанавливается на торце объекта вращения.

### **3.3. Экспериментальное исследование фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением держателей оптических элементов**

В подразд. 2.5 монографии описан фотоэлектрический преобразователь для компьютерных систем с применением держателей оптических элементов [115]. Недостатком этого устройства является отсутствие математических моделей его работы в каждой контрольной точке диапазона измерений, что не позволяет оценить и повысить точность измерения угловых перемещений, а также управлять чувствительностью измерительного устройства в зависимости от конструктивных особенностей объекта вращения.

Целью исследования является нахождение математических моделей работы измерительного устройства в каждой контрольной точке диапазона измерений, которые учитывают зависимость чувствительности от геометрического расположения фотоприемников относительно источника излучения.

Достижение цели исследования осуществлено благодаря полунатурному моделированию работы рулевой поверхности самолета с помощью экспериментальной установки [123], конструкция которой показана на рис. 3.4. К основанию 1 крепится поворотный штатив 2, измерительная плата 3 и две подставки 4, в которые устанавливаются две направляющие 5 и фиксируются в них с помощью четырех гаек 6. Поворотный штатив 2 оснащен ручкой с фиксатором 7 и градуировочной шкалой 8. К нему присоединяется Г-образный металлический рычаг 9, верхняя часть которого моделирует внешнюю сторону рулевой поверхности самолета. С помощью клеевого соединения на рычаг 9 устанавливается платформа 10 из неметаллического материала, на которой закрепляется держатель передающей части 11 с источником излучения 12, установленный на расстоянии  $B$  от оси вращения. Принимающая часть состоит из рамки 13, нижняя часть которой крепится к направляющим 5 с помощью гаек 14, фотоприемниками 16. Источник излучения 12 и фотоприемники 16 связаны с измерительной платой 3 соединительными проводами 17. В начальном положении

держатели передающей части 11 и приемной части 15 находятся на расстоянии  $L$  друг от друга, причем главная ось источника излучения 12 совпадает с главной осью центрального фотоприемника 16.

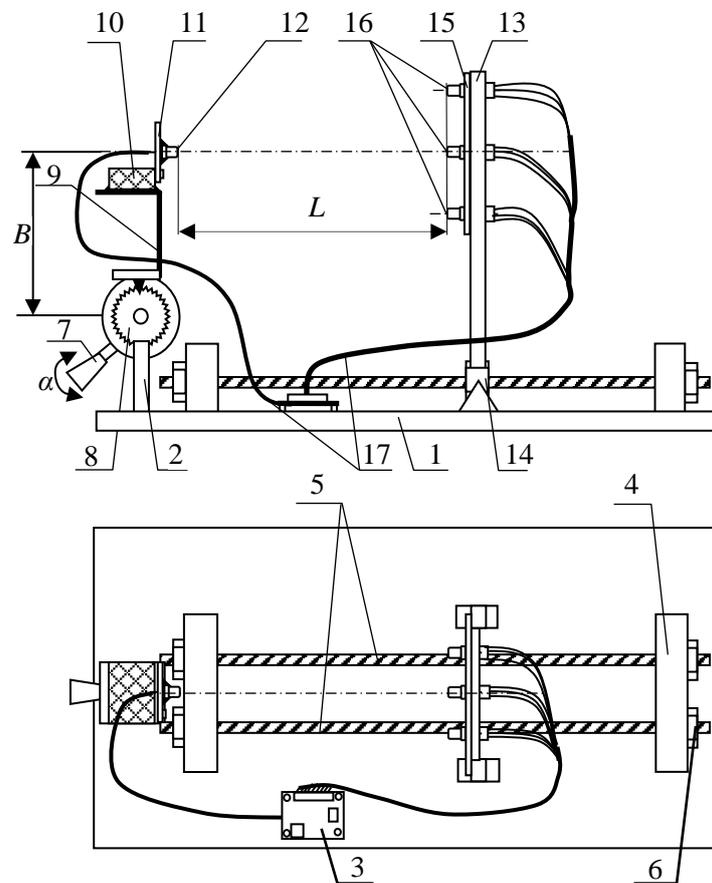


Рис. 3.4. Экспериментальная установка, моделирующая работу рулевой поверхности самолета

Принцип работы указанной экспериментальной установки заключается в следующем. С помощью гаек 14 рамка 13 фиксируется на расстоянии  $L$  от держателя передающей части 11. Измерительная плата 3 подключается к стабилизированному источнику питания  $+12V$  (на рисунке не указан). Затем, перемещая ручку с фиксатором 6, последовательно с шагом  $\Delta\alpha$  по градуировочной шкале 7 задается угловое положение поворотного штатива 2. Благодаря его жесткому сцеплению с Г-образным металлическим рычагом 8 и платформой 9 это перемещение передается на держатель передающей части 11 с источником излучения 12. Фотоприемники 16 воспринимают распределение интенсивности светового потока излучателя и преобразовывают ее в соответствующее

напряжение, которое по соединительным проводам 17 передается на измерительную плату 3. С помощью цифрового вольтметра (на рисунке не указан) осуществляется съем сигнала с каждого фотоприемника 16 в отдельности.

Внешний вид установки изображен на рис. 3.5, а принципиальная схема устройства – на рис. 3.6

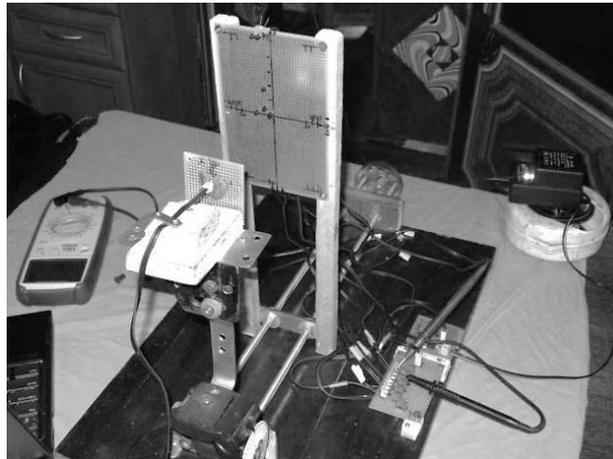


Рис. 3.5. Внешний вид экспериментальной установки

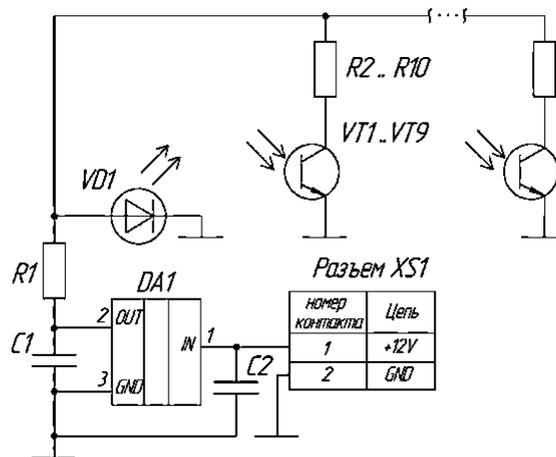


Рис. 3.6. Принципиальная схема экспериментальной установки

Главное функциональное назначение принципиальной схемы – фиксирование падения напряжения в зависимости от изменения углового перемещения объекта измерения, представление его уровня в диапазоне, удобном для дальнейшего сопряжения с цифровыми средствами измерительной техники. В состав схемы входят следующие элементы: светоизлучающий диод (*VD1*) в ближнем

инфракрасном диапазоне с ограничивающим резистором  $R1$ , фотоприемники  $VT1...VT9$  с коллекторными резисторами  $R2...R10$ , стабилизатор питающего напряжения  $DA1$  с высокочастотными фильтрами в виде конденсаторов  $C1, C2$ . Целесообразно использовать один из представленных в работе [124] драйверов питания светоизлучающего диода, который повышает надежность и долговечность функционирования устройства.

Перечень основных элементов схемы представлен в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Перечень элементов принципиальной схемы

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
	Конденсаторы		
$C1$	КМ, 0,1 мкф, 50 В, $\pm 10\%$ ,	1	
	ЗАО «Промэлектроника»		
$C2$	КМ, 0,33 мкф, 50 В, $\pm 10\%$ ,	1	
	ЗАО «Промэлектроника»		
$DA1$	LM7805A, +5В, TO-220, STM	1	
	Резисторы		
$R1$	3296W-500R, 0-0,5кОм, 0,125 Вт, Bourns	1	
$R2..R10$	МЛТ, 4,7 кОм, 0,125 Вт,	9	
	ЗАО «Промэлектроника»		
$VD1$	Светодиод BIR-BL0731, 940 нм, 50 мА,	1	
	4,8 мВт/см <sup>2</sup> , STM		
$VT1..VT9$	Фототранзисторы ВРТ-ВР2931, 940 нм,	9	
	0,6 мкА(мВ)/мкВт, STM		
$XS1$	Разъем KF301-2P, Shenzhen	1	

Среди особенностей представленной схемы следует отметить следующее. Стабилизация напряжения выполнена на базе микросхемы LM7805A. Стандартная схема включения требует конденсаторов емкостью 0,1 и 0,33 мкФ для фильтрации высокочастотных помех. Поскольку расстояние сопряжения источника и приемника излучения не превышает 0,5 м, то в качестве диода  $VD1$  может быть взят любой инфракрасный светодиод средней мощности, а в качестве фотоприемников  $VT1...VT9$  – фототранзисторы, соответствующие его главной длине волны излучения. Работа излучателя и фотоприемника в ближнем инфракрасном диапазоне излучения дает следующие преимущества: низкая стоимость; надежность работы в загрязненной передающей среде; низкая потребляемая мощность. Резистор  $R1$  используется для того, чтобы ограничить ток, текущий через светодиод. Его номинал рассчитывается по формуле

$$R = \frac{U_{num} - U_D}{I_D}, \quad (3.5)$$

где  $R$  – сопротивление резистора;  $U_{num}$  – напряжение питания, приложенное к последовательному соединению резистора и светодиода;  $U_D$  – падение напряжения на светодиоде;  $I_D$  – номинальный ток светодиода. Расчётное значение номинала резистора  $R1$  составило 76 Ом.

Съем сигнала производится цифровым мультиметром Mastech-MS8200G (табл. 3.8) с резисторов  $R2-R10$  [125].

Таблица 3.8

Основные технические характеристики Mastech-MS8200G

Количество измерений, с	2–3
Постоянное напряжение $U$	200 мВ/2 В/20 В/200 В $\pm 0,5$ %, 1000 В $\pm 0,8$ %
Постоянный ток $I$	2 мА/20 мА $\pm 1,0$ %, 200 мА $\pm 1,5$ %, 10 А $\pm 2,0$ %
Сопротивление $R$	20 Ом/2 кОм/20 кОм/200 кОм/2 МОм/20 МОм $\pm 1,0$ %
Входное сопротивление $R$	10 МОм
Тестирование диодов	есть
Питание	9 В (типа Крона)

Измерения производились при трех различных значениях расстояния между держателем источника излучения и держателя фотоприемников  $L$ , а именно: а)  $L_1 = 110$  мм; б)  $L_2 = 150$  мм; в)  $L_3 = 220$  мм. Расстояние от оси вращения рулевой поверхности самолета до главной оси источника излучения  $B = 150$  мм.

В качестве параметра, который описывает работу фотоэлектрического преобразователя, выбрано напряжение  $U_{VT}$  на фотоприемнике  $VT$ , поскольку его значение прямо пропорционально чувствительности исследуемого измерительного устройства. Диапазон измерения углового перемещения  $\alpha \in [-30^\circ; 30^\circ]$  с шагом  $\Delta\alpha = 5^\circ$ . Факторами, влияющими на эту характеристику, были выбраны:

$X_1$  – смещение по горизонтальной оси относительно главной оси источника излучения  $X$ , мм;

$X_2$  – смещение по вертикальной оси относительно главной оси источника излучения  $Y$ , мм. В табл. 3.9 представлены интервалы варьирования и основные уровни факторов.

Таблица 3.9

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования	Размерность
	- 1	0	+ 1		
$X_1(X)$	-30	0	+30	30	мм
$X_2(Y)$	-70	0	70	70	мм

Поскольку неотъемлемой частью исследования является нахождение оптимума (максимума) выбранной характеристики, а линейные модели позволяют определить лишь область в окрестности точки оптимума, то целесообразным является применение моделей более высокого порядка, чтобы повысить точность нахождения максимума исследуемого параметра [126]. В проводимом эксперименте будет синтезирована квадратичная модель. Ее построение базируется на применении ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) (табл. 3.10).

Таблица 3.10

## ОЦКП эксперимента

Номер опыта	$X_1$	$X_2$
1	-1	1
2	0	+1
3	+1	+1
4	-1	0
5	0	0
6	+1	0
7	-1	-1
8	0	-1
9	-1	+1

При этом фотоприемники размещаются в соответствующих точках представленного плана, изображенного на рис. 3.7.

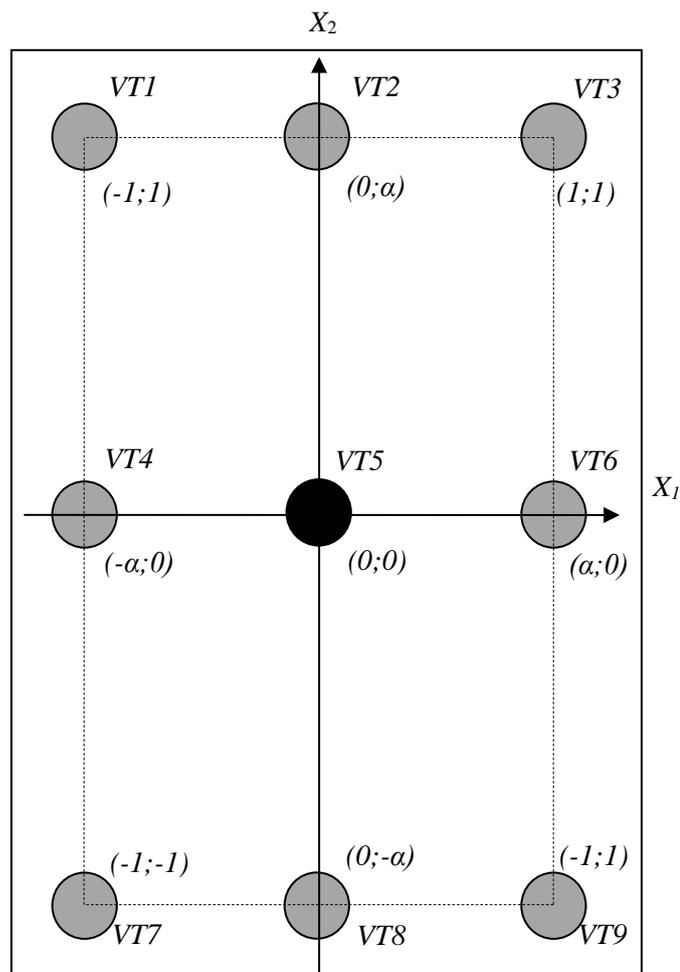


Рис. 3.7. Размещение фотоприемных элементов в точках ОЦКП

В каждой контрольной точке диапазона измерения математическая модель работы измерительного устройства будет иметь вид [127]

$$U_{VT}(\alpha_k) = \tilde{b}_0 + \sum_{j=1}^2 b_j(\alpha_k)X_j + \sum_{j=1}^2 \sum_{u=j+1}^2 b_{ju}(\alpha_k)X_jX_u + \sum_{j=1}^2 b_{jj}(\alpha_k)(X_j^2 - c), \quad (3.6)$$

$$\tilde{b}_0(\alpha_k) = b_0(\alpha_k) + c \sum_{j=1}^m b_{jj}(\alpha_k), \quad (3.7)$$

где  $U_{VT}(\alpha_k)$  – значение напряжения в  $k$ -й контрольной точке диапазона измерения;  $\alpha_k$  –  $k$ -я контрольная точка диапазона измерения;  $c$  – параметр смещения ( $c = 0,667$  для  $n = 2$ );  $b_0(\alpha_k), b_j(\alpha_k), b_{ju}(\alpha_k), b_{jj}(\alpha_k)$  – коэффициенты математической модели в  $k$ -й контрольной точке диапазона измерения.

В табл. 3.11 представлены численные результаты исследования в каждой контрольной точке диапазона измерения, а на рис. 3.8–3.16 – графические зависимости напряжения на фотоприемниках  $U_{VT}(\alpha_k)$  в каждой точке ОЦКП для  $L_1, L_2, L_3$ .

Таблица 3.11

Результаты реализации ОЦКП эксперимента

$L_1$														
№ п/п	VT	$U(\alpha_1^*)$	$U(\alpha_2)$	$U(\alpha_3)$	$U(\alpha_4)$	$U(\alpha_5)$	$U(\alpha_6)$	$U(\alpha_7)$	$U(\alpha_8)$	$U(\alpha_{10})$	$U(\alpha_{11})$	$U(\alpha_{12})$	$U(\alpha_{13})$	$U(\alpha_{14})$
1	VT1	0,380	0,650	0,990	1,160	1,140	0,480	0,060	0,030	0,030	0,020	0,000	0,000	0,000
2	VT2	0,550	0,950	1,110	1,800	1,640	1,430	0,150	0,040	0,030	0,010	0,000	0,000	0,000
3	VT3	0,160	0,260	0,310	0,350	0,310	0,140	0,020	0,020	0,020	0,010	0,000	0,000	0,000
4	VT4	0,070	0,100	0,150	0,300	1,370	2,820	4,530	2,970	0,450	0,130	0,110	0,030	0,000
5	VT5	0,050	0,070	0,110	0,670	1,700	2,910	4,530	4,650	4,650	0,680	0,160	0,030	0,000
6	VT6	0,060	0,080	0,130	0,290	1,070	1,640	2,490	1,920	0,370	0,160	0,110	0,030	0,000
7	VT7	0,030	0,040	0,040	0,040	0,050	0,050	0,050	0,090	0,120	0,160	0,190	0,250	0,210
8	VT8	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,060	0,100	0,840	2,670	4,700	4,790
9	VT9	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,030	0,040	0,070	0,100	0,150	0,200	0,250	0,250
$L_2$														
№ п/п	VT	$U(\alpha_1^*)$	$U(\alpha_2)$	$U(\alpha_3)$	$U(\alpha_4)$	$U(\alpha_5)$	$U(\alpha_6)$	$U(\alpha_7)$	$U(\alpha_8)$	$U(\alpha_{10})$	$U(\alpha_{11})$	$U(\alpha_{12})$	$U(\alpha_{13})$	$U(\alpha_{14})$
1	VT1	0,140	0,390	0,610	0,740	0,800	0,850	0,150	0,040	0,020	0,020	0,010	0,000	0,000
2	VT2	0,290	0,600	0,850	1,180	1,430	1,570	0,750	0,090	0,040	0,020	0,010	0,000	0,000
3	VT3	0,090	0,220	0,280	0,340	0,350	0,240	0,080	0,020	0,020	0,010	0,010	0,000	0,000
4	VT4	0,050	0,070	0,110	0,220	1,000	1,970	3,000	3,170	1,050	0,210	0,070	0,060	0,020
5	VT5	0,040	0,050	0,090	0,480	1,070	1,700	2,620	3,440	3,990	0,540	0,230	0,080	0,020
6	VT6	0,050	0,060	0,100	0,320	0,910	1,390	1,850	2,180	1,050	0,230	0,110	0,070	0,020
7	VT7	0,030	0,030	0,040	0,040	0,050	0,060	0,080	0,170	0,560	1,380	2,000	0,600	0,510
8	VT8	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,050	0,320	0,680	1,320	3,210	4,680	2,860
9	VT9	0,010	0,020	0,020	0,030	0,030	0,040	0,060	0,180	0,440	0,790	1,210	0,470	0,310

$L_3$														
№ п/п	VT	$U(\alpha_1^*)$	$U(\alpha_2)$	$U(\alpha_3)$	$U(\alpha_4)$	$U(\alpha_5)$	$U(\alpha_6)$	$U(\alpha_7)$	$U(\alpha_8)$	$U(\alpha_{10})$	$U(\alpha_{11})$	$U(\alpha_{12})$	$U(\alpha_{13})$	$U(\alpha_{14})$
1	VT1	0,050	0,340	0,580	0,650	0,850	0,840	0,730	0,090	0,040	0,010	0,010	0,010	0,010
2	VT2	0,040	0,320	0,500	0,590	0,880	0,900	0,940	0,150	0,070	0,030	0,010	0,010	0,000
3	VT3	0,030	0,220	0,320	0,370	0,460	0,450	0,330	0,060	0,030	0,000	0,000	0,010	0,000
4	VT4	0,020	0,030	0,060	0,330	0,700	1,150	1,500	1,840	1,640	0,250	0,100	0,050	0,020
5	VT5	0,010	0,020	0,040	0,330	0,600	0,850	1,350	1,590	1,930	0,750	0,170	0,100	0,050
6	VT6	0,010	0,020	0,040	0,230	0,510	0,710	0,890	1,100	0,810	0,150	0,070	0,030	0,020
7	VT7	0,010	0,020	0,020	0,030	0,040	0,070	0,370	0,850	1,500	2,310	3,050	2,300	0,500
8	VT8	0,000	0,000	0,000	0,010	0,010	0,030	0,270	0,540	0,730	1,330	1,880	2,880	0,600
9	VT9	0,000	0,010	0,010	0,010	0,020	0,040	0,200	0,480	0,710	1,050	1,450	0,960	0,320

\*  $\alpha_k = \alpha_{k-1} + \Delta\alpha$ ;  $k \in [1; 14]$ ;  $\alpha_0 = -30^\circ$ ;  $\Delta\alpha = 5^\circ$ .

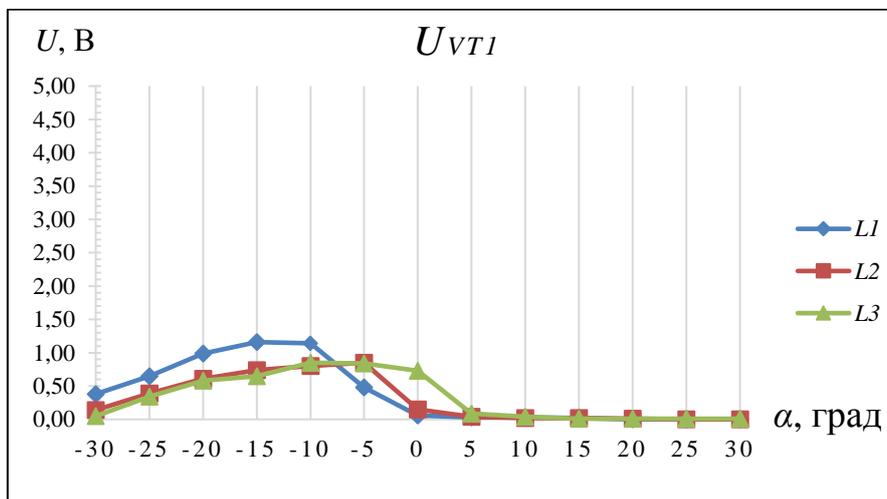


Рис. 3.8. Зависимости  $U_{VT1}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

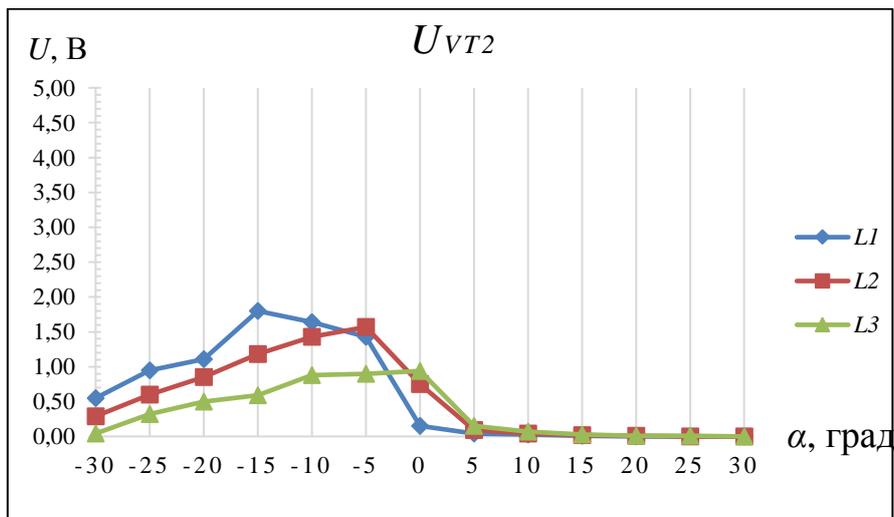


Рис. 3.9. Зависимости  $U_{VT2}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

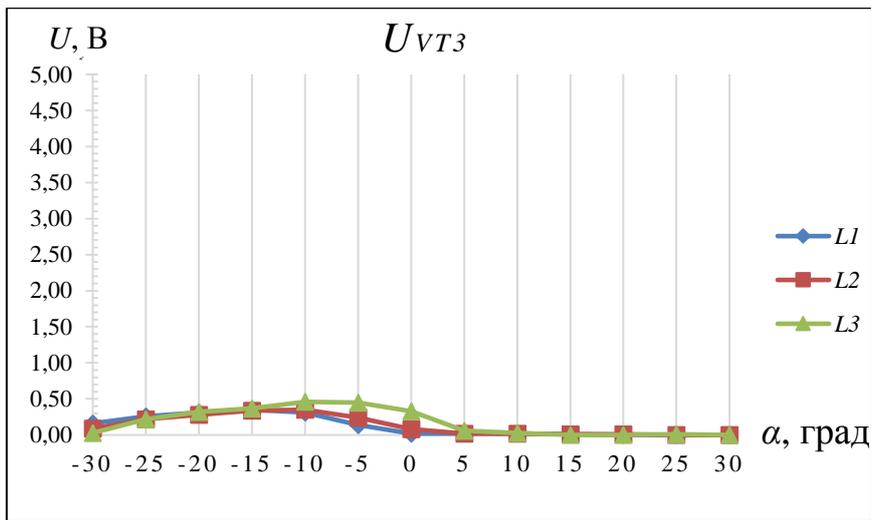


Рис. 3.10. Зависимости  $U_{VT3}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

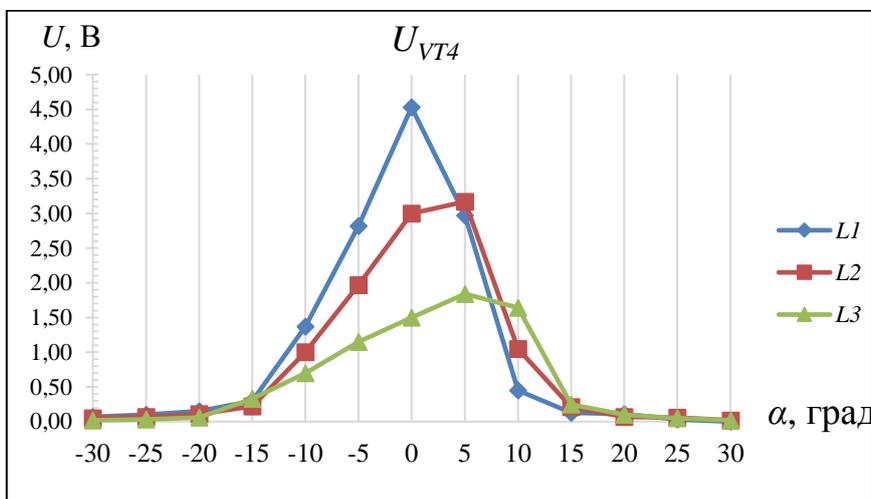


Рис. 3.11. Зависимости  $U_{VT4}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

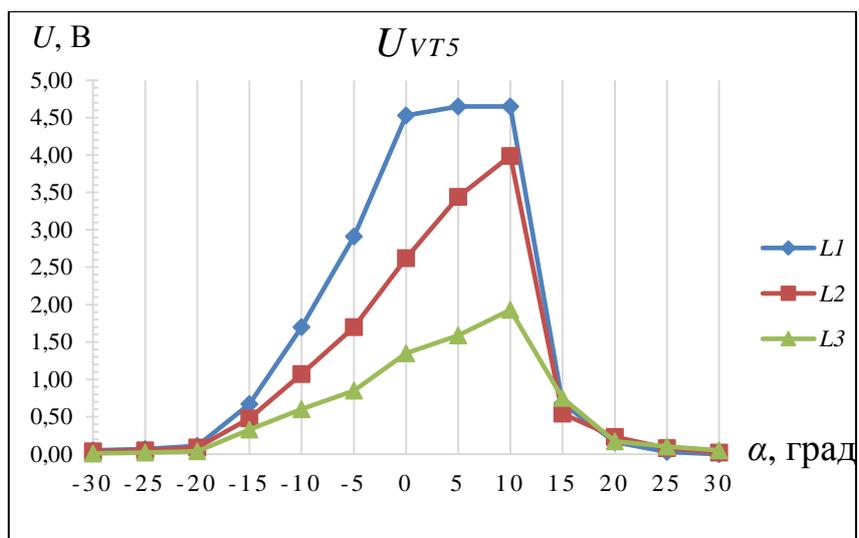


Рис. 3.12. Зависимости  $U_{VT5}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

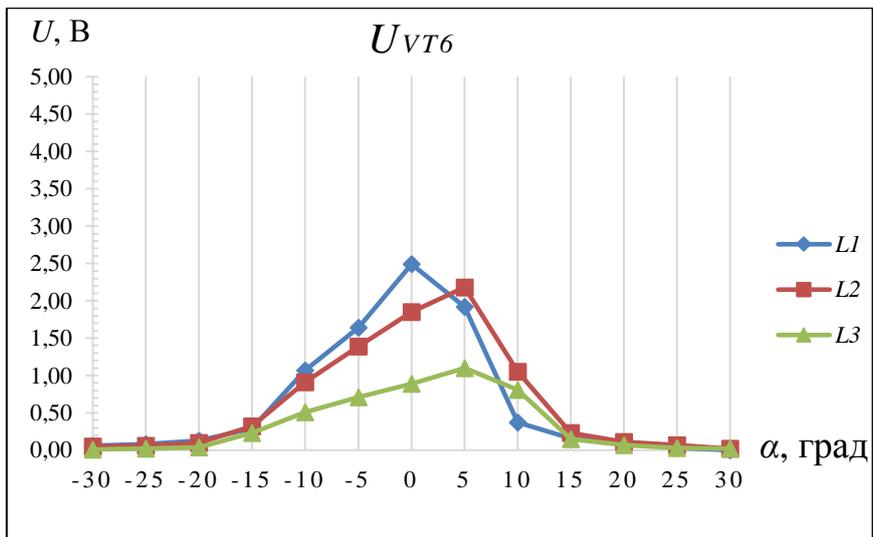


Рис. 3.13. Зависимости  $U_{VT6}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

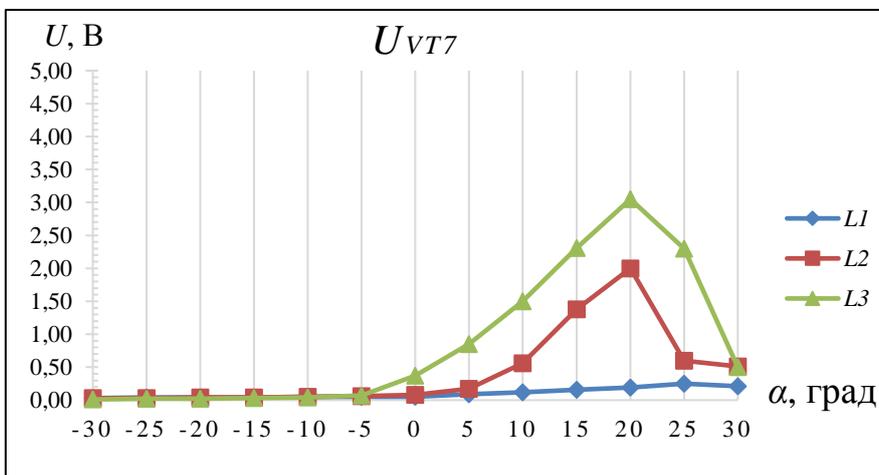


Рис. 3.14. Зависимости  $U_{VT7}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

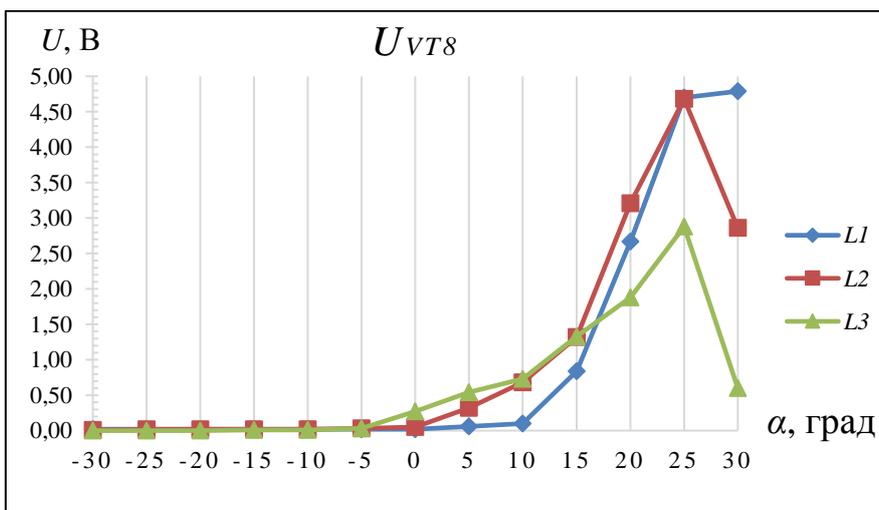


Рис. 3.15. Зависимости  $U_{VT8}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

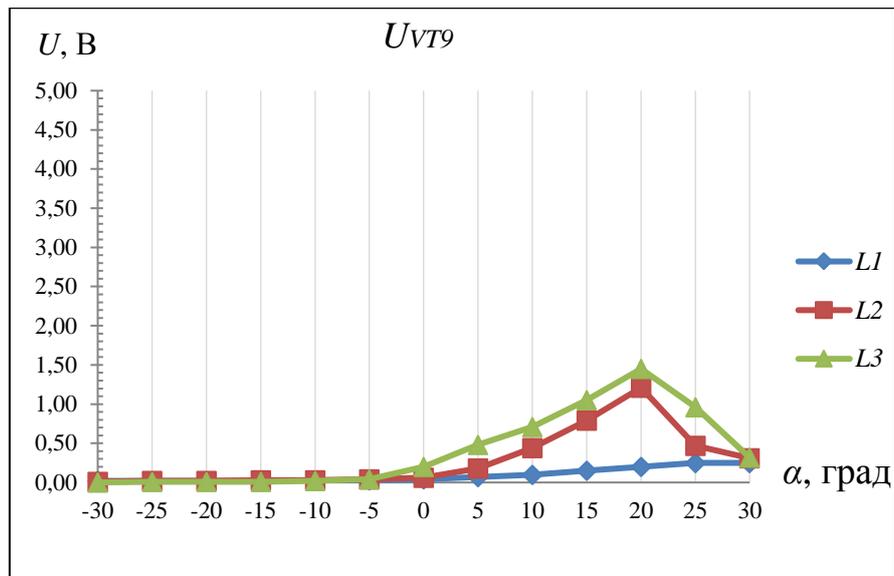


Рис. 3.16. Зависимости  $U_{VT9}(\alpha)$  для  $L_1, L_2, L_3$

Оптимизация полученных математических моделей осуществляется с помощью надстройки «Поиск решений» программы для работы с электронными таблицами Excel 2010, входящей в состав пакета Microsoft Office [128]. Эта надстройка использует метод сопряженных градиентов для нахождения экстремума (минимума или максимума) нелинейной функции [129]. Значение коэффициентов математических моделей в контрольных точках углового перемещения для  $L_1, L_2, L_3$  представлены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Коэффициенты математических моделей для  $L_1, L_2, L_3$

$L_1$											
$\alpha_k$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_{12}$	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$U_{max}(\alpha_k)$	$X_{1max}$	$X_{2max}$	$X_{max,MM}$	$Y_{max,MM}$
-30°	0,118	-0,04	0,17	-0,052	-0,087	0,133	0,446	-0,534	1	-16,02	70
-25°	0,187	-0,072	0,297	-0,093	-0,155	0,240	0,767	-0,530	1	-15,9	70
-20°	0,223	-0,120	0,388	-0,165	-0,140	0,285	1,042	-1	1	-30	70
-15°	0,733	-0,140	0,538	-0,198	-0,470	0,145	1,477	-0,359	1	-10,77	70
-10°	1,686	-0,192	0,498	-0,203	-0,458	-0,848	1,794	-0,281	0,327	-8,43	22,89
-5°	2,852	-0,257	0,325	-0,080	-0,593	-2,098	2,894	-0,222	0,082	-6,66	5,74
0°	4,096	-0,348	0,020	-0,008	-0,368	-3,793	4,178	-0,473	0,003	-14,19	0,21
5°	3,669	-0,180	-0,022	0,002	-0,733	-3,128	3,680	-0,123	-0,004	-3,69	-0,28
10°	2,764	-0,018	-0,040	0,002	-1,412	-1,757	2,765	-0,01	-0,01	-0,3	-0,7
15°	0,593	0,002	-0,185	0,000	-0,405	-0,125	0,662	0,002	-0,740	0,06	-51,8
20°	0,688	0,002	-0,510	-0,002	-0,842	0,383	1,581	0,002	-1	0,06	-70
25°	1,019	0,000	-0,867	0,000	-1,483	0,837	2,722	0	-1	0	-70
30°	1,013	0,007	-0,875	-0,010	-1,520	0,875	2,763	0,005	-1	0,15	-70

$L_2$											
$\alpha_k$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_{12}$	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$U_{max}(\alpha_k)$	$X_{1max}$	$X_{2max}$	$X_{max,MM}$	$Y_{max,MM}$
-30°	0,081	-0,012	0,078	-0,007	-0,052	0,048	0,210	-0,185	1	-5,55	70
-25°	0,121	-0,032	0,190	-0,040	-0,092	0,153	0,478	-0,391	1	-11,73	70
-20°	0,184	-0,060	0,277	-0,077	-0,127	0,203	0,702	-0,543	1	-16,29	70
-15°	0,526	-0,052	0,362	-0,098	-0,278	0,052	0,959	-0,268	1	-8,04	70
-10°	1,204	-0,093	0,413	-0,108	-0,317	-0,547	1,297	-0,215	0,399	-6,45	27,93
-5°	1,914	-0,202	0,422	-0,148	-0,342	-1,222	1,989	-0,337	0,193	-10,11	13,51
0°	2,670	-0,207	0,132	-0,013	-0,270	-2,295	2,712	-0,383	0,030	-11,49	2,1
5°	3,146	-0,167	-0,087	-0,008	-0,323	-2,793	3,168	-0,258	-0,015	-7,74	-1,05
10°	2,728	-0,020	-0,267	0,030	-1,047	-1,737	2,738	-0,011	-0,077	-0,33	-5,39
15°	0,451	-0,097	-0,573	0,145	-0,187	0,263	1,366	-0,647	-1	-19,41	-70
20°	0,524	-0,125	-1,065	0,198	-0,582	0,938	2,572	-0,277	-1	-8,31	-70
25°	0,994	-0,020	-0,958	0,033	-1,387	0,888	2,842	-0,019	-1	-0,57	-70
30°	0,564	-0,033	-0,613	0,050	-0,817	0,593	1,773	-0,051	-1	-1,53	-70
$L_3$											
$\alpha_k$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_{12}$	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$U_{max}(\alpha_k)$	$X_{1max}$	$X_{2max}$	$X_{max,MM}$	$Y_{max,MM}$
-30°	0,011	-0,007	0,018	-0,002	0,003	0,008	0,050	-1	1	-30	70
-25°	0,028	-0,023	0,142	-0,028	-0,007	0,128	0,342	-1	1	-30	70
-20°	0,052	-0,048	0,228	-0,063	-0,008	0,192	0,575	-1	1	-30	70
-15°	0,323	-0,067	0,260	-0,065	-0,040	-0,020	0,655	-1	1	-30	70
-10°	0,648	-0,100	0,353	-0,092	-0,067	-0,227	0,900	-1	0,983	-30	68,81
-5°	0,937	-0,143	0,342	-0,090	-0,050	-0,515	1,120	-1	0,419	-30	29,33
0°	1,369	-0,197	0,193	-0,058	-0,183	-0,773	1,438	-0,559	0,146	-16,77	10,22
5°	1,526	-0,190	-0,262	0,085	-0,023	-1,148	1,718	-1	-0,151	-30	-10,57
10°	1,541	-0,272	-0,467	0,195	-0,122	-0,947	1,807	-1	-0,349	-30	-24,43
15°	0,433	-0,228	-0,775	0,313	-0,075	0,405	2,079	-1	-1	-30	-70
20°	0,051	-0,273	-1,060	0,398	0,093	0,953	2,829	-1	-1	-30	-70
25°	0,351	-0,227	-1,018	0,335	-0,437	0,968	2,518	-0,643	-1	-19,29	-70
30°	0,078	-0,032	-0,235	0,043	-0,072	0,208	0,540	-0,517	-1	-15,51	-70

Поскольку измерения в каждой контрольной точке были проведены один раз, то для доказательства адекватности полученных математических моделей необходимо произвести дополнительные измерения. Адекватность будет определяться по максимальной допустимой погрешности  $\Delta_{\max}$  [130]. Модель адекватна, если разность между экспериментальным значением отклика и предсказанным не превышает  $\Delta_{\max}$ . Значение  $\Delta_{\max}$  выбирается исследователем исходя из требований к точности и условий их выполнения. Вместо абсолютной погрешности будет использована относительная погрешность ( $\varepsilon_{\max} = 10\%$ ). Шаг

координатной сетки экспериментальной установки равен 2,5 мм. Таким образом, в целях учета ограничивающих условий следует взять точки с координатами, близкими к области максимума и кратными значению шага координатной сетки. Результаты реализации эксперимента представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Проверка адекватности математических моделей

$L_1$								
$\alpha_k$	$X_{max}, мм$	$Y_{max}, мм$	$X_{эксп}, мм$	$Y_{эксп}, мм$	$U_{теор}$	$U_{эксп}$	$\varepsilon, \%$	Проверка адекватности
-30°	-16,02	70	-15	70	0,446	0,49	-9,87	Модель адекватна
-25°	-15,9	70	-15	70	0,767	0,83	-8,21	Модель адекватна
-20°	-30	70	-30	70	1,042	0,99	4,99	Модель адекватна
-15°	-10,77	70	-10	70	1,477	1,62	-9,68	Модель адекватна
-10°	-8,43	22,89	-7,5	22,5	1,794	3,1	-72,80	Неадекватна
-5°	-6,66	5,74	-7,5	5	2,893	4,3	-48,63	Неадекватна
0°	-14,19	0,21	-15	0	4,178	4,63	-10,82	Модель адекватна
5°	-3,69	-0,28	-2,5	0	3,679	4,69	-27,48	Неадекватна
10°	-0,3	-0,7	0	0	2,764	4,65	-68,23	Неадекватна
15°	0,06	-51,8	0	-70	0,653	0,84	-28,64	Неадекватна
20°	0,06	-70	0	-70	1,581	2,67	-68,88	Неадекватна
25°	0	-70	0	-70	2,722	4,7	-72,67	Неадекватна
30°	0,15	-70	0	-70	2,763	4,79	-73,36	Неадекватна
$L_2$								
$\alpha_k$	$X_{max}, мм$	$Y_{max}, мм$	$X_{эксп}, мм$	$Y_{эксп}, мм$	$U_{теор}$	$U_{эксп}$	$\varepsilon, \%$	Проверка адекватности
-30°	-5,55	70	-5	70	0,210	0,22	-4,76	Модель адекватна
-25°	-11,73	70	-10	70	0,478	0,49	-2,51	Модель адекватна
-20°	-16,29	70	-15	70	0,702	0,69	1,71	Модель адекватна
-15°	-8,04	70	-10	70	0,959	0,87	9,28	Модель адекватна
-15°	-8,04	70	-10	70	0,959	0,87	9,28	Модель адекватна
-10°	-6,45	27,93	-7,5	27,5	1,297	1,32	-1,77	Модель адекватна
-5°	-10,11	13,51	-10	15	1,989	2,14	-7,59	Модель адекватна
0°	-11,49	2,1	-12,5	2,5	2,711	2,76	-1,81	Модель адекватна
5°	-7,74	-1,05	-7,5	0	3,167	3,45	-8,94	Модель адекватна
10°	-0,33	-5,39	0	-5	2,738	4,23	-54,49	Неадекватна
15°	-19,41	-70	-20	-70	1,366	1,45	-6,15	Модель адекватна
20°	-8,31	-70	-7,5	-70	2,572	2,46	4,35	Модель адекватна
25°	-0,57	-70	0	-70	2,842	4,68	-64,67	Неадекватна
30°	-1,53	-70	-2,5	-70	1,772	1,89	-6,66	Модель адекватна

$L_3$								
$\alpha_k$	$X_{max}, мм$	$Y_{max}, мм$	$X_{экср}, мм$	$Y_{экср}, мм$	$U_{теор}$	$U_{экср}$	$\varepsilon, \%$	Проверка адекватности
-30°	-30	70	-30	70	0,050	0,05	0,0	Модель адекватна
-25°	-30	70	-30	70	0,342	0,34	0,6	Модель адекватна
-20°	-30	70	-30	70	0,575	0,58	-0,9	Модель адекватна
-15°	-30	70	-30	70	0,655	0,65	0,8	Модель адекватна
-10°	-30	68,81	-30	70	0,900	0,85	5,6	Модель адекватна
-5°	-30	29,33	-30	30	1,120	1,02	8,9	Модель адекватна
0°	-16,77	10,22	-17,5	10	1,438	1,32	8,2	Модель адекватна
5°	-30	-10,57	-30	-10	1,718	1,63	5,1	Модель адекватна
10°	-30	-24,43	-30	-25	1,807	1,78	1,5	Модель адекватна
15°	-30	-70	-30	-70	2,08	2,3	-10,6	Модель адекватна
20°	-30	-70	-30	-70	2,830	3,05	-7,8	Модель адекватна
25°	-19,29	-70	-20	-70	2,518	1,23	51,2	Неадекватна
30°	-15,51	-70	-15	-70	0,540	0,3	44,4	Неадекватна

В табл. 3.14 отображены значения  $U_{max}(\alpha_k)$ , найденные по адекватным математическим моделям с учетом непрерывности измерений для  $L_1, L_2, L_3$ , а на рис. 3.17 они показаны графически.

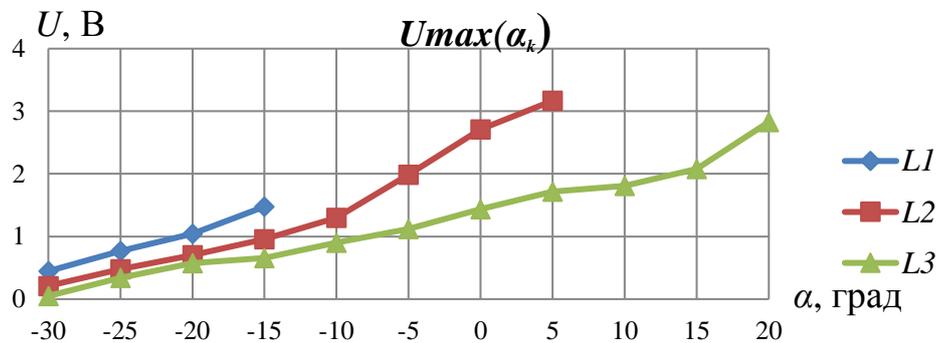


Рис. 3.17. Графическое представление значений напряжения  $U_{max}(\alpha_k)$  для  $L_1, L_2, L_3$

Таблица 3.14

Значения  $U_{max}(\alpha_k)$  для  $L_1, L_2, L_3$ 

$\alpha_k$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
$L_1$													
$U_{max}(\alpha_k)$	0,446	0,767	1,042	1,477	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$L_2$													
$U_{max}(\alpha_k)$	0,21	0,478	0,702	0,959	1,297	1,989	2,712	3,168	-	-	-	-	-
$L_3$													
$U_{max}(\alpha_k)$	0,05	0,342	0,575	0,655	0,9	1,12	1,438	1,718	1,807	2,079	2,829	-	-

На рисунках 3.18–3.20 изображено геометрическое расположение фотоприемников в каждой контрольной точке углового перемещения  $\alpha$ , где  $U(\alpha_k)$  достигает максимального значения, для  $L_1, L_2, L_3$ .

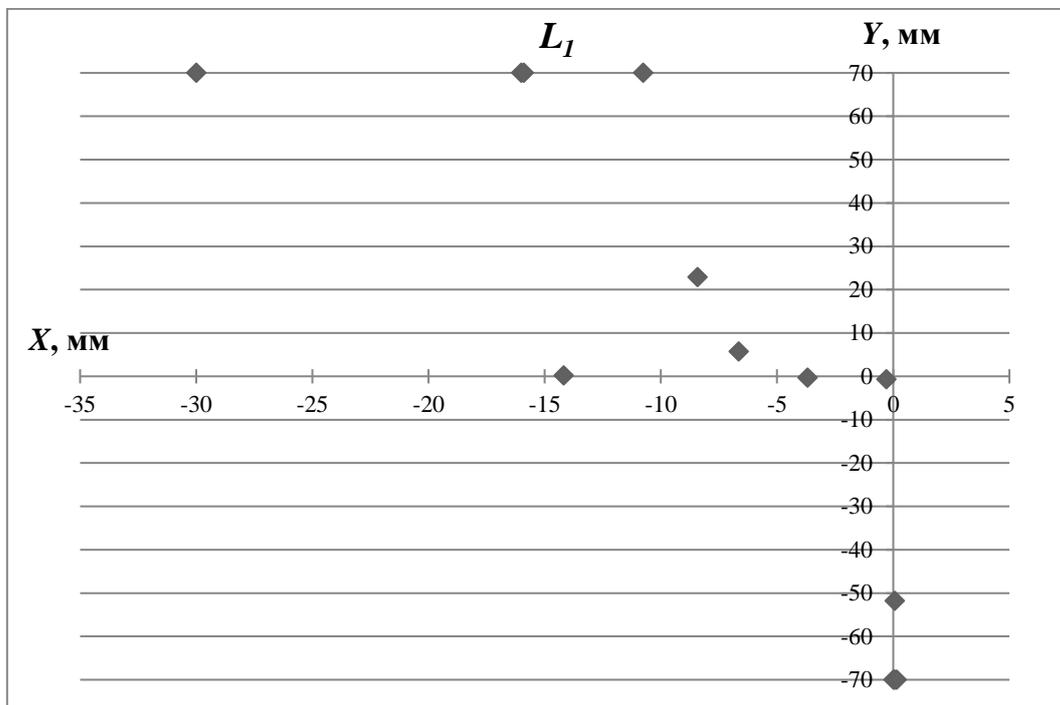


Рис. 3.18. Геометрическое расположение фотоприемников для  $L_1$

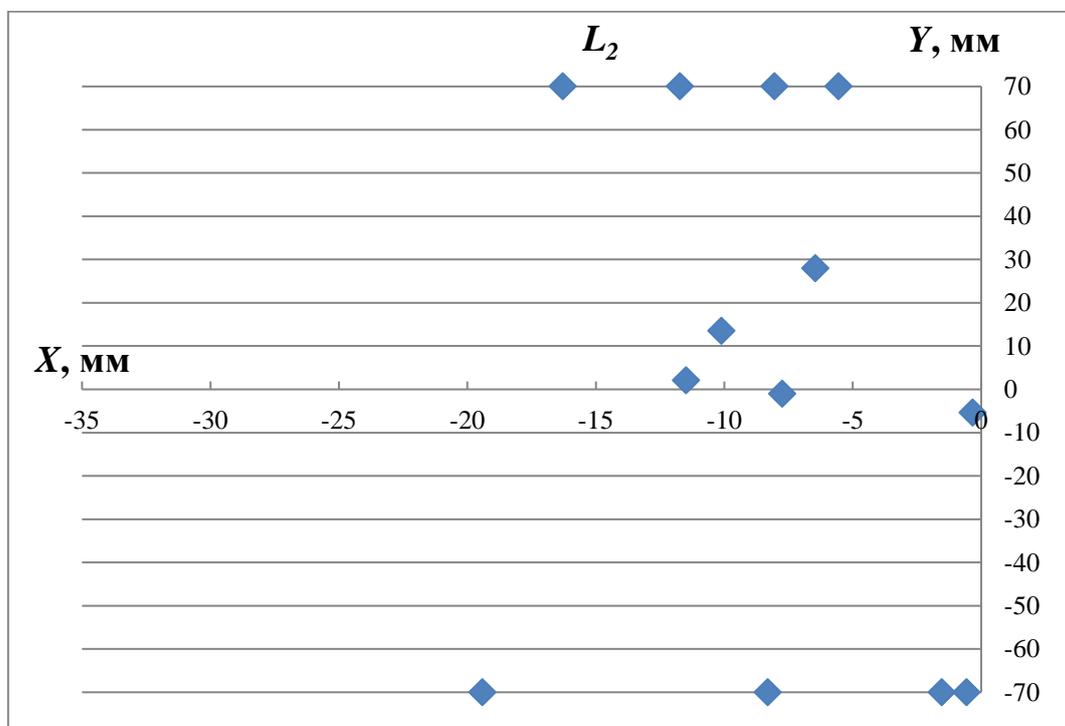


Рис. 3.19. Геометрическое расположение фотоприемников для  $L_2$

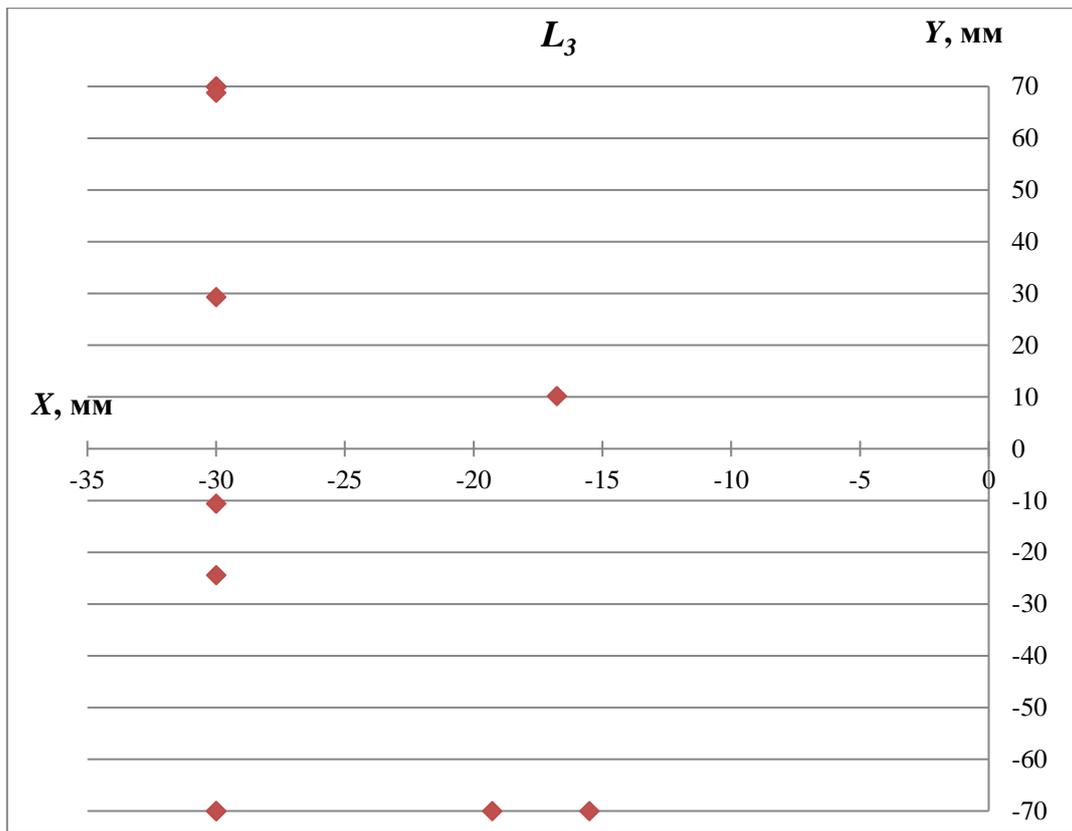


Рис. 3.20. Геометрическое расположение фотоприемников для  $L_3$

Поскольку точность измерения ограничена шумовыми токами фотоприемника [131], а максимальный шумовой ток для фототранзистора ВРТ-ВР2931 составляет 100 нА при  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , то граничный уровень шумового напряжения при питающем напряжении  $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$  составит  $U_{\text{ш}} = 0,23 \text{ мВ}$ .

С учетом указанных ограничений и при соотношении сигнал–шум, равном + 6 дБ, в табл. 3.15 представлен сравнительный анализ результатов исследований фотоэлектрического преобразователя с применением держателей оптических элементов для  $L_1, L_2, L_3$ .

Количество фотоприемников (ФП) может быть уменьшено путем введения устройства управления (УУ), которое будет перемещать один ФП согласно полученным координатам по одной из осей при условии, что вторая координата остается неизменной (табл.3.16).

Таблица 3.15

Сравнительный анализ основных результатов исследований фотоэлектрического преобразователя с применением держателей оптических элементов для  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$

№ п/п	Расстояние между держателями оптических элементов, мм	Минимальная чувствительность, В/град	Максимальная точность измерения, угл. мин	Диапазон значений измеряемых угловых перемещений, град	Количество фотоприемников *, шт.
1	110	0,055	1	15	3
2	150	0,045	1,23	35	7
3	220	0,016	3,45	50	6

\* – количество фотоприемников определяется с учетом геометрических размеров используемых фототранзисторов ( $d = 4$  мм).

Таблица 3.16

#### Количество применяемых ФП с использованием УУ

№ п/п	Расстояние между держателями оптических элементов, мм	Количество ФП с учетом УУ, шт.	Количество перемещаемых ФП
1	110	1	1 ФП по оси X ( $Y = 70$ мм)
2	150	5	1 ФП по оси X ( $Y = 70$ мм)
3	220	2	1 ФП по оси Y ( $X = -30$ мм)

Таким образом, в результате экспериментального исследования фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением держателей оптических элементов найдены математические модели работы измерительного устройства в каждой контрольной точке диапазона измерений, которые учитывают зависимость чувствительности от геометрического расположения фотоприемников относительно источника излучения. Благодаря полученным математическим моделям повышена точность фотоэлектрического преобразователя до  $1'$  и адаптирована чувствительность измерительного

устройства к особенностям конструкции объекта вращения. Предложено уменьшить количество применяемых фотоприемников в измерительном устройстве путем введения такого компонента, как устройство управления, которое будет перемещать один фотоприемник согласно полученным координатам по одной из осей.

## 4. ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ

### 4.1. Принципы сопряжения предложенных устройств с компьютерными системами

В статье [132] описана разработка вариантов электронной схемы фотоэлектрических устройств измерения угловых перемещений для сопряжения с компьютерными системами, которые позволяют определить местоположение объекта вращения в данный момент времени.

Первый вариант реализации электронной схемы состоит из  $n$  схем сравнения, входы которых подсоединены к фотодиодам,  $8n$  элементов «И», первые входы которых соединены с соответствующими фотодиодами, а вторые входы через инвертор подключаются к выходам схем сравнения (рис. 4.1).

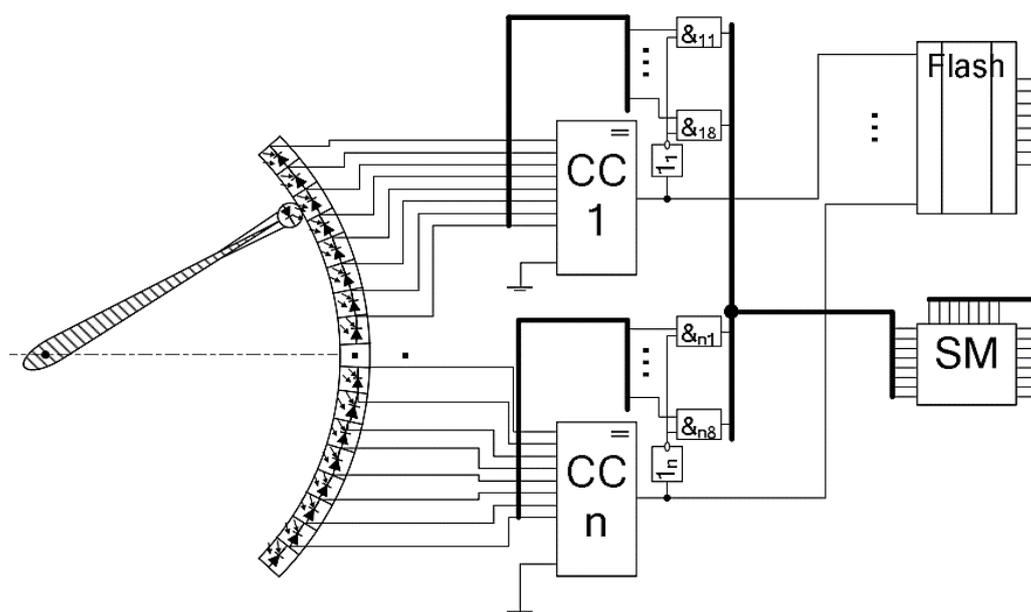


Рис. 4.1. Электронная схема устройства измерения угловых перемещений для сопряжения с компьютерными системами

Выходы схем сравнения подсоединены к адресным входам блока памяти, выходы которого соединены с первыми входами сумматора, а вторые его входы

соединены с выходами элементов «И» [133]. Данная электронная схема выдает на выходе сигнал с сумматора, который формируется в результате суммирования значения с конкретной схемы сравнения и константы, находящейся в блоке памяти. Значение константы несет в себе информацию о номере сектора из восьми элементов, в котором находится объект вращения. Значение же, считываемое с выходов схем сравнения, несет информацию о том, какой именно элемент засвечен в секторе.

Существенным недостатком такой схемы является отсутствие возможности схемотехнического решения проблемы одновременного засвечивания двух соседних чувствительных элементов. Такая ситуация может возникать, когда объект вращения с излучателем находится между двумя элементами и при этом световой поток засвечивает как один, так и другой чувствительный элемент.

Второй вариант реализации электронной схемы, который позволяет устранить указанный недостаток, показан на рис.4.2.

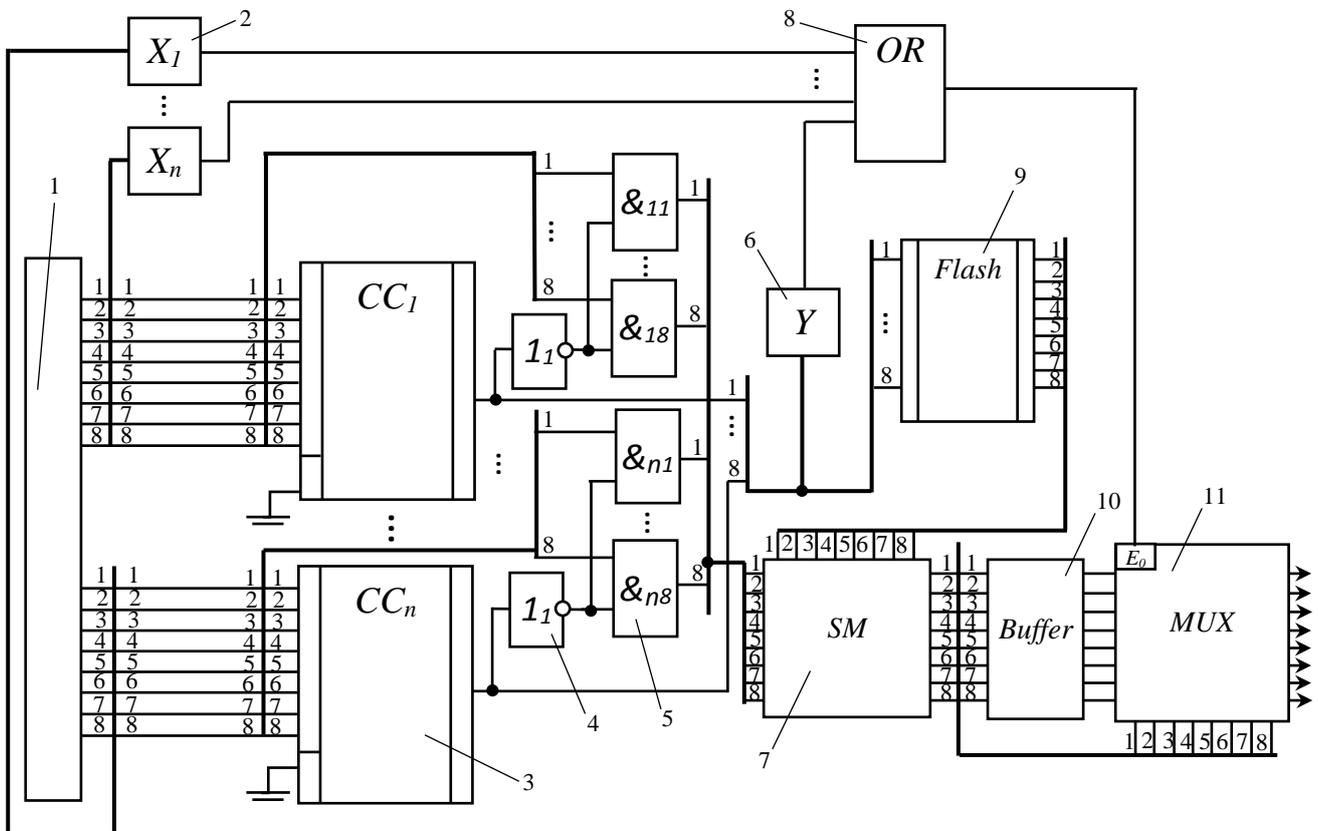


Рис. 4.2. Схемотехническое решение с использованием функциональных блоков сумматоров

На рис. 4.2 цифрами обозначены следующие элементы: 1 – блок чувствительных элементов, установленных на объекте вращения; 2 – функциональные блоки  $X1 \dots Xn$ , которые представляют схему, показанную на рис. 4.3; 3 – схемы сравнения; 4 – инверторы; 5 – логические элементы «И»; 6 – функциональные блоки  $Y$ ; 7 – сумматоры; 8 – логический элемент «ИЛИ»; 9 – блок flash-памяти; 10 – буфер данных; 11 – мультиплексор.

На рис. 4.3 показана внутреннее устройство функциональных блоков  $X1 \dots Xn, Y$ .

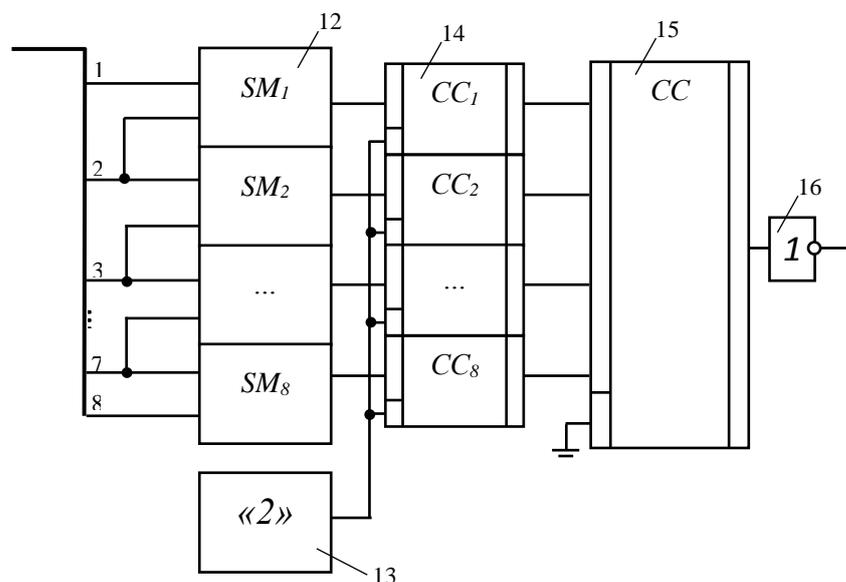


Рис. 4.3. Функциональные блоки  $X1 \dots Xn, Y$

На сумматоры 12 функциональных блоков поступают сигналы от чувствительных элементов (блоки  $X1 \dots Xn$ ) либо от схем сравнения 3 (блок  $Y$ ). Если два соседних элемента засвечены, то на выходе одного из сумматоров образуется значение «2». Схемы сравнения 14 сопоставляют значение, поступившее с сумматоров, со значением «2» из блока 13. Если хотя бы на одной из схем сравнения 14 значения, поступающие на ее вход, будут равны, то функциональный блок выдает на выходе значение «1». В случае, когда хотя бы одна единица с функциональных блоков поступила на элемент «ИЛИ» 8, то на активирующий вход мультиплексора 11 подается сигнал. В таком случае на выход его проходят данные из буфера 10, в котором записана информация из предыдущей

итерации. В случае, когда мультиплексор закрыт, данные на выход схемы подаются с сумматора 7. При этом эти же данные записываются в буфер 10 для возможности считывания в следующей итерации в случае открытия мультиплексора 11.

Третий вариант реализации электронной схемы позволяет устранить проблему одновременного засвечивания двух соседних чувствительных элементов. Принципиальное отличие данной схемы заключается в том, что каждый чувствительный элемент, в зависимости от того, является ли его порядковый номер четным или нечетным, подключается к отдельной схеме сравнения. В случае, если засвечен только один элемент, то выходной сигнал схемы поступает либо с сумматора четной группы, либо с сумматора нечетной группы. При одновременном засвечивании соседних элементов сигнал «1» через логическую схему прекращает поступление данных с сумматоров напрямую на выход схемы.

Недостатками схемы с использованием функциональных блоков сумматоров являются большое количество используемых элементов (сумматоров, схем сравнения и др.) и сложность реализации на печатной плате. При этом логика данной схемы является более простой и быстросейственной по сравнению со схемой с отдельным подключением четных и нечетных элементов. Но схема с отдельным подключением имеет гораздо большую компактность при реализации ее на печатной плате и намного меньшее количество используемых в схемотехническом решении элементов.

Таким образом, для качественного сопряжения предложенных фотоэлектрических устройств измерения угловых перемещений с компьютерными системами необходимо выбирать одну из предложенных электронных схем в соответствии с поставленными задачами проводимого исследования. Стоит отметить, что для практической реализации данных схемотехнических решений рекомендуется применять схему с отдельным подключением четных и нечетных элементов, поскольку она обладает компактностью и меньшим количеством используемых элементов при достаточно высоком уровне быстродействия.

## **4.2. Компьютеризированная система измерения углового отклонения рулевых поверхностей летательного аппарата**

Представленный подраздел монографии основан на работе [134].

Применение компьютерных систем в измерении физических величин обеспечивает высокую технологичность производственных процессов, точность, быстрое получение результатов, возможность представления результатов в удобных эргономичных формах, возможность сопряжения комплексов измерительных устройств. Не является исключением и авиационная промышленность, где для интеграции компьютерных технологий существуют довольно просторные ниши, заполненные в том числе устаревшей аналоговой измерительной техникой. Примером такого сегмента авиационного производства является контроль углов отклонения рулевых поверхностей летательных аппаратов.

Для проведения экспериментального исследования системы на реальном объекте необходимы компьютеризированные программно-аппаратные средства, позволяющие не только принимать и обрабатывать информацию с датчика на персональный компьютер, но и организовывать замкнутую автоматизированную систему управления процессом контроля.

При решении указанной выше поставленной задачи была изготовлена аппаратная часть компьютеризированной системы, представляющая собой устройство (блок преобразования), описанное в работе [135] (рис. 4.4). По протоколу RS-232 с устройства на СОМ-порт ПК передается выходной сигнал. Элементы датчика (фототранзисторы ВРТ-ВР2931) подключены к устройству через разъем DB-37. Данный блок преобразования рассчитан на фиксированный диапазон измерения углов. При использовании на реальном объекте необходимо проводить масштабирование системы путем наращивания ее компонентов.

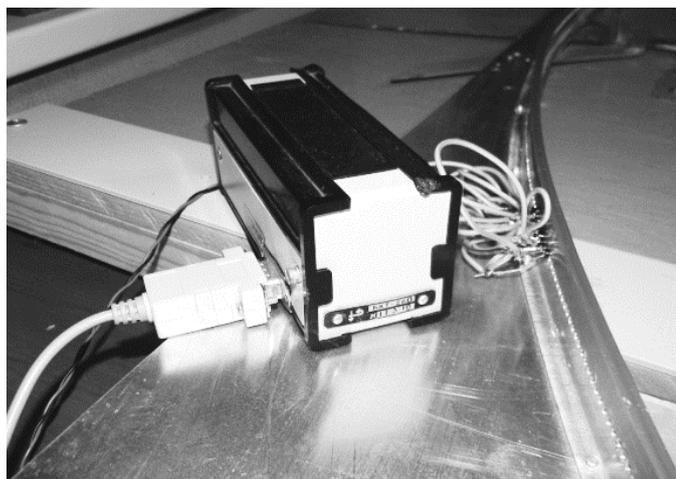


Рис. 4.4. Блок преобразования

Фототранзисторы устанавливаются на дуге датчика и подключаются к блоку преобразования, который подключен к ПК (рис. 4.5). На ПК устанавливается специально разработанное программное обеспечение, предоставляющее возможность считывать информацию с СОМ-порта и обрабатывать ее.

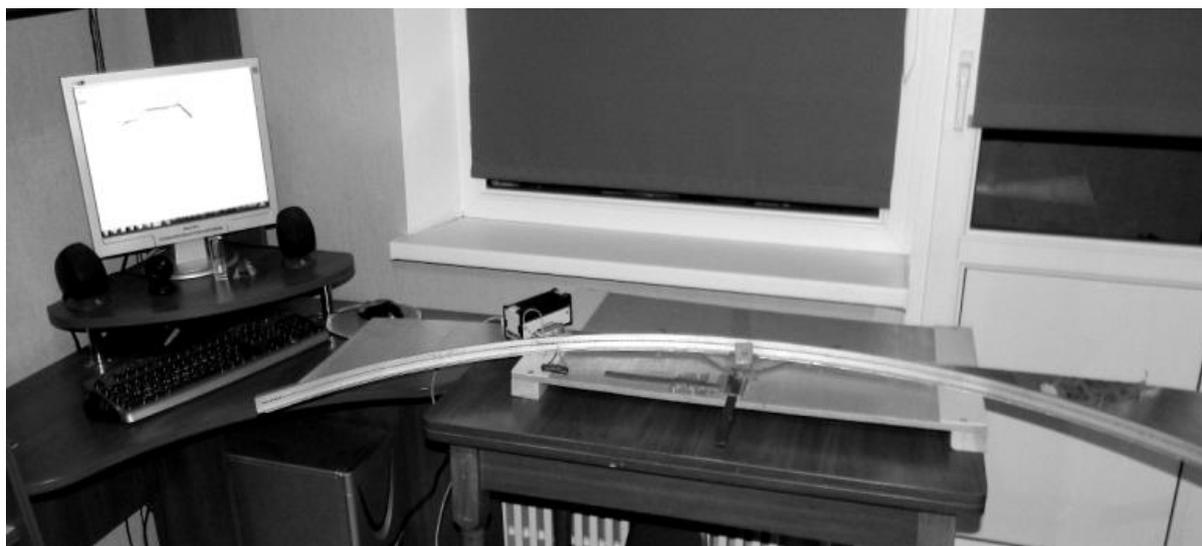


Рис. 4.5. Компьютеризированная система измерения углового отклонения рулевых поверхностей летательного аппарата

Программный комплекс обработки информации компьютерной системы контроля углового отклонения рулевых поверхностей летательного аппарата [136] обеспечивает универсальность при выборе дискретности измерения, возможность проведения эксперимента на отдельном секторе исследуемой дуги, расчет

абсолютной погрешности каждого измерения, получение выходной информации как в табличном, так и в графическом виде, что позволяет оператору наглядно оценивать качество обработки рулевой поверхностью заданного значения.

Разработанная система обладает возможностью сопряжения с системой автоматического управления (САУ) летательного аппарата. В данном случае система выступает в качестве обратной связи при тестировании исследуемой рулевой поверхности в условиях авиапроизводства. Для работы в таком режиме оператору необходимо задать то угловое положение, в котором должна установиться рулевая поверхность, и при прохождении промежутка времени, заданного линией задержки, система отследит рассогласование между заданным и реальным значениями. Линия задержки может быть использована как аппаратная, так и программная. Функциональная готовность системы работать в режиме сопряжения с САУ должна быть обусловлена наличием современной цифровой САУ на летательном аппарате, которая, в свою очередь, обеспечена возможностью подключения внешних устройств. Передача данных происходит по тому же протоколу RS-232, который используют и для подключения блока преобразования, но через другой СОМ-порт компьютера. Структурная схема такого режима работы системы показана на рис. 4.6.

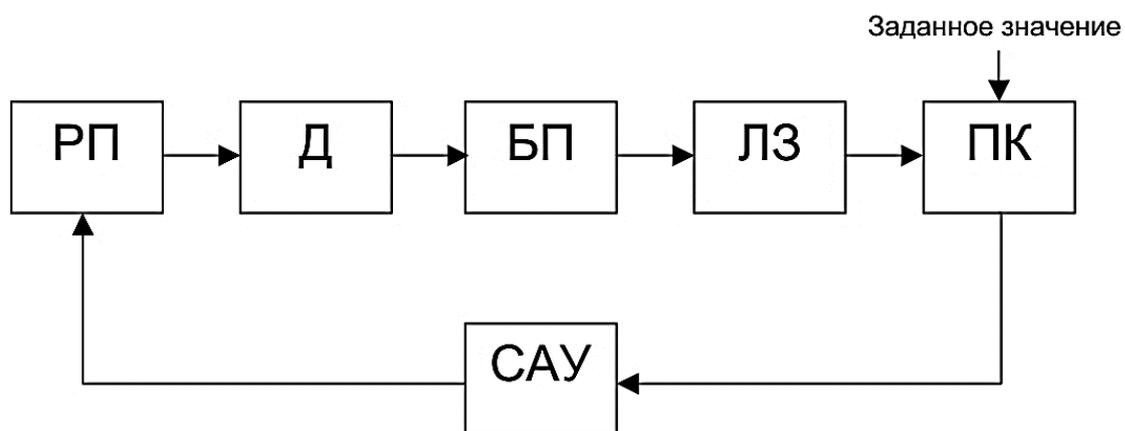


Рис. 4.6. Структурная схема замкнутой системы:

РП – рулевая поверхность; Д – датчик системы; БП – блок преобразования;  
ЛЗ – линия задержки; ПК – персональный компьютер с разработанным программным обеспечением; САУ – система автоматического управления ЛА

На выходе пользователь программного комплекса получает удобно представленную информацию, основываясь на которой можно делать заключение о корректности либо некорректности обработки механикой задающего значения с органов управления в кабине пилота или с системы автоматического управления. Внешний вид окна программного комплекса обработки информации компьютерной системы контроля углового отклонения рулевых поверхностей летательного аппарата показан на рис. 4.7.

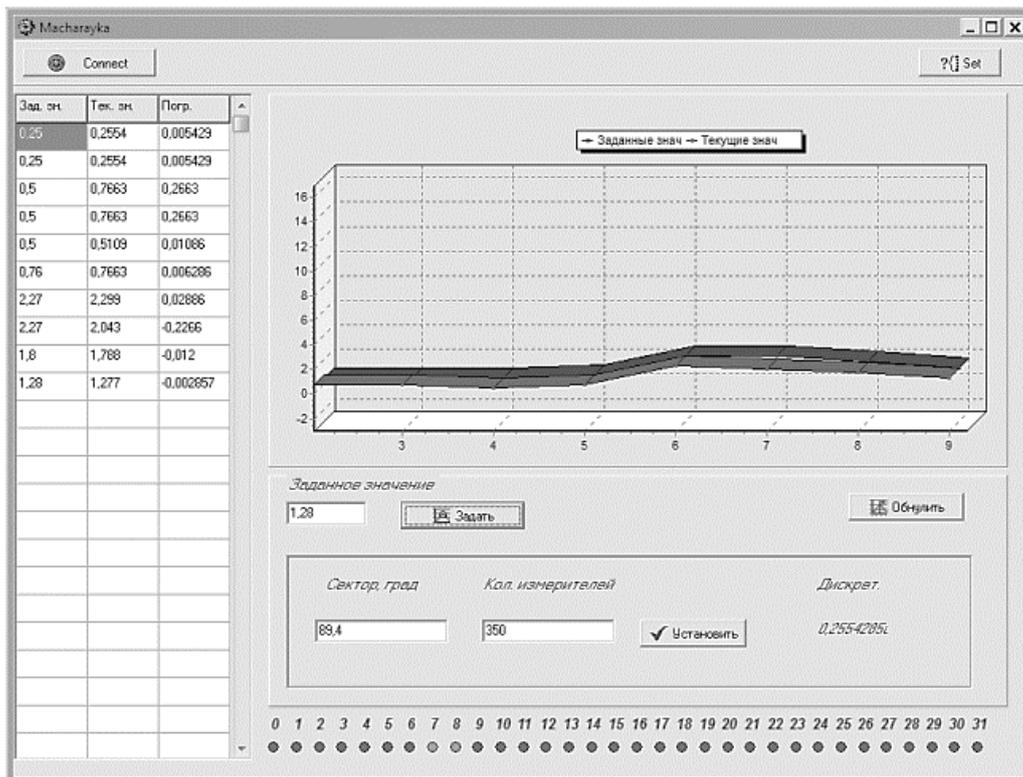


Рис. 4.7. Внешний вид окна программной части системы

Таким образом, данная компьютерная система готова к функционированию и представляет собой удобное и надежное средство контроля угловых отклонений рулевых поверхностей летательного аппарата. При проведении экспериментального исследования на реальных объектах она позволяет не только демонстрировать результаты тестирования обработки рулевых органов летательного аппарата в удобной форме, но и обеспечивать возможность организации замкнутой автоматизированной системы управления процессом контроля.

### 4.3. Разработка архитектуры компьютерной системы контроля угловых перемещений

На основании результатов, достигнутых в разд. 3 монографии, разработана архитектура компьютерной системы контроля угловых перемещений [137]. Компьютерная система относится к контрольно-измерительной технике и предназначена для проверки технического состояния объектов вращения в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Ее применение дает возможность использовать только один фотоприемник для измерения угловых перемещений, воссоздавать реальные условия в процессе контроля, изменять количество контрольных точек указанного диапазона измерения, получать визуальную общую характеристику отклонений от нормы угловых перемещений по всем контрольным точкам.

Разработанная архитектура компьютерной системы контроля угловых перемещений показана на рис. 4.8.

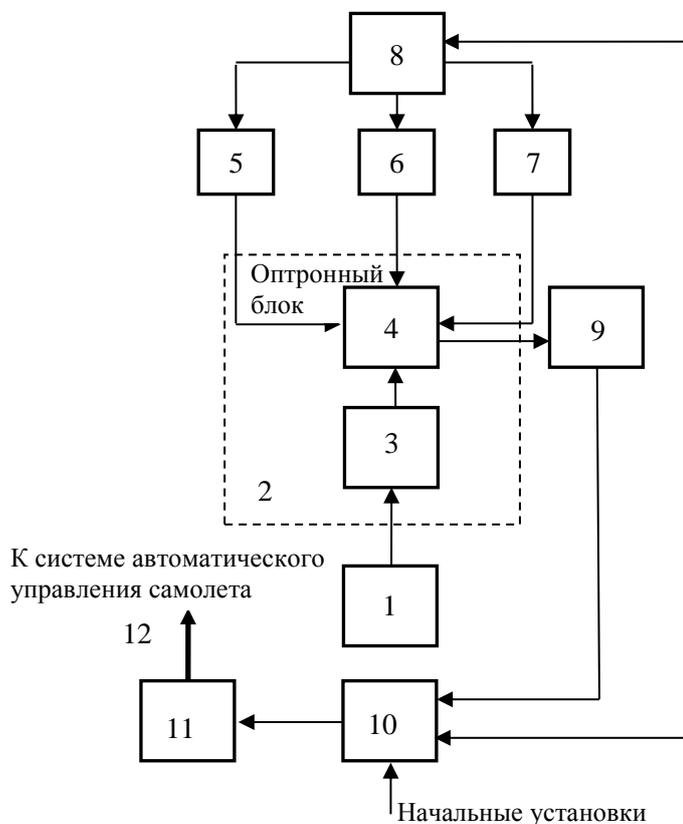


Рис.4.8. Архитектура компьютерной системы контроля углового перемещения

Компьютерная система контроля углового перемещения [138] имеет в своем составе следующие компоненты: 1 – объект вращения, 2 – оптронный блок, 3 – источник инфракрасного излучения, 4 – фотоприемник, 5 – перемещатель по оси X, 6 – перемещатель по оси Y, 7 – перемещатель по оси Z, 8 – управляющее устройство, 9 – преобразователь, 10 – персональный компьютер, 11 – соединительный интерфейс, 12 – выходная шина.

Применение персонального компьютера, который через соединительный интерфейс подключен к выходной шине, а также имеет непосредственную связь с управляющим устройством, позволяет подключаться к системе автоматического управления объектом вращения.

Компьютерная система контроля может работать в двух режимах: ручном и автоматическом. Если система автоматического управления объектом вращения позволяет присоединение внешних устройств, тогда компьютерная система контроля будет работать в автоматическом режиме следующим образом. Персональный компьютер 10 передает код номера контрольной точки углового перемещения в управляющее устройство 8, которое из него формирует сигнал для перемещателей по оси X 5, по оси Y 6, по оси Z 7 для установки фотоприемника 4 оптронного блока 2 в соответствующее положение. Управляющее устройство 8 сигнализирует о завершении установки персональному компьютеру 10, который далее передает контрольное значение углового перемещения через соединительный интерфейс 11 на выходную шину 12. С нее эта информация считывается системой автоматического управления объекта вращения. При перемещении объект вращения 1 меняет положение источника инфракрасного излучения 3 относительно фотоприемника 4 оптронного блока 2, в результате чего на выходе фотоприемника 4 появляется сигнал, пропорциональный его угловому перемещению. Этот сигнал поступает на вход преобразователя 9, где формируется цифровой код и передается для дальнейшей обработки в персональном компьютере 10. При ручном режиме работы сигнал с компьютера 10 на выходную шину 12 не поступает.

В памяти персонального компьютера хранятся следующие данные: количество контрольных точек, их числовое значение, соответствующие кодовые значения координат фотоприемника для каждой контрольной точки соответствующего вида объекта вращения (определяется экспериментально), функция преобразования полученного кода в величину углового перемещения.

Таким образом, при использовании специального программного обеспечения можно получить следующие данные: значение реального углового перемещения объекта вращения и погрешность отклонения от номинального значения в каждой контрольной точке, графическое изображение полученных данных на экране персонального компьютера.

Практическая значимость компьютерной системы контроля подтверждена патентом Украины № 96478.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии решена важная научно-практическая задача анализа и усовершенствования технологий измерения угловых перемещений для компьютерных систем управления и контроля путем разработки и оптимизации фотоэлектрических методов и устройств для измерения угловых перемещений, а также применения программных средств для обработки полученных данных и планирования проведения исследовательских проектов. Итогом проделанной работы стали следующие результаты:

1. Проанализировано одиннадцать современных методов преобразования угловых перемещений, которые применяются в измерительных устройствах компьютерных систем. Обоснована целесообразность дальнейшего анализа устройств, базирующихся на оптическом методе измерения угловых перемещений.

2. Усовершенствованы методы фотоэлектрического измерения угловых перемещений для компьютерных систем и разработаны устройства для их реализации. Применение указанных методов и устройств позволяет с высоким быстродействием проводить высокоточные измерения угловых перемещений (до  $1,4'$ ), не изменяя конструкции объекта вращения.

3. Представлены программные средства для оптимизации планов экспериментальных исследований фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений с учетом стоимостных и временных показателей. Даны рекомендации касательно применения указанных программных средств в зависимости от количества входящих факторов и количества уровней их варьирования.

4. Определены оптимальные с точки зрения равномерности параметры распределения торцов световодов фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением зеркала, в частности:  $B = 30$  мм,  $h = 30$  мм,  $\beta = 53^\circ$ ,  $\Delta_{max} = 44$  мкм. С помощью программных средств, базирующихся на методе ветвей

и границ, получены выигрышные результаты оптимального по стоимости плана эксперимента в сравнении с исходным 1,3 раза, 1,14 раза с учетом ограничения на показатель времени  $T_{\text{огр}} = 120$  мин. Найдены математические модели работы фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением держателей оптических элементов в каждой контрольной точке диапазона измерений. Определены следующие основные параметры измерительного устройства: точность  $1'$ , диапазон измерения  $\alpha \in [-30^\circ; -15^\circ]$  при  $L_1 = 110$  мм; точность  $1,23'$ , диапазон измерения  $\alpha \in [-30^\circ; 5^\circ]$  при  $L_2 = 150$  мм; точность  $3,45'$ , диапазон измерения  $\alpha \in [-30^\circ; 20^\circ]$  при  $L_2 = 220$  мм.

5. Предложены электронные схемы для качественного сопряжения предложенных фотоэлектрических устройств измерения угловых перемещений с компьютерными системами. Стоит отметить, что для практической реализации данных схемотехнических решений рекомендуется применять схему с отдельным подключением четных и нечетных элементов, поскольку она обладает компактностью и меньшим количеством используемых элементов при достаточно высоком уровне быстродействия.

6. Разработана компьютеризированная система измерения углового отклонения рулевых поверхностей летательного аппарата, которая позволяет не только демонстрировать результаты тестирования отработки рулевых органов летательного аппарата в удобной форме, но и обеспечивать возможность организации замкнутой автоматизированной системы управления процессом контроля.

7. Обоснована и разработана архитектура компьютерной системы контроля угловых перемещений, позволяющая использовать один фотоприемник для измерения угловых перемещений, воссоздавать реальные условия в процессе контроля, изменять количество контрольных точек указанного диапазона измерения, получать визуальную общую характеристику отклонений от нормы угловых перемещений по всем контрольным точкам.

В связи со стремительным развитием методологий управления проектами, а также технологий разработки квантовых компьютеров и квантового вычисления дальнейшими перспективными направлениями научного исследования являются:

- применение квантовых алгоритмов для обработки результатов эксперимента и оптимизации планов реализации исследовательских проектов;
- адаптация гибких методологий управления проектами для осуществления научно-исследовательской и обучающей деятельности;
- разработка теоретических положений, методов, моделей и средств для организации и управления исследовательскими проектами в онлайн-режиме.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондратец, В. О. Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин / В. О. Кондратец. – Ч. 1: Теорія і технічні засоби систем. – К. : Вища шк., 1993. – 319 с.
2. Примеры применения датчиков угла поворота [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.germany-electric.ru/doc/IVO/IVO\\_Applikation.pdf](http://www.germany-electric.ru/doc/IVO/IVO_Applikation.pdf).
3. Елочкин, М. Е. Информационные технологии: учеб. / М. Е. Елочкин, Ю. С. Брановский, И. Д. Николаенко. – М. : Оникс, 2009. – 253 с.
4. Siko Ltd [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.siko-uk.com>.
5. BEI sensors [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.beiied.com>.
6. Meggitt Sensorex [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sensorex.fr>.
7. Durham Geo-Enterprises, Inc [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.slopeindicator.com>.
8. MP-Sensor GmbH [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mp-sensor.de>.
9. Aeron Systems Pvt. Ltd [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.directindustry.com>.
10. Shanghai Zhichuan Electronic Tech Co., Ltd [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://en.zc-sensor.com>.
11. Бушуев, Д. А. Технические измерения и приборы. Измерение угловых перемещений и скоростей вращательного движения: метод. указания к

выполнению лаб. работ / Д. А. Бушуев, В. Г. Рубанов. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. – 64 с.

12. Михеев, В. П. Датчики и детекторы: учеб. пособие / В. П. Михеев, А. В. Просандеев. – М. : МИФИ, 2007. – 172 с.

13. Воротников, С. А. Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие / С. А. Воротников; под ред. С. Л. Зенкевича, А. С. Ющенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 384 с.

14. Основы автоматизации управления производством: учеб. пособие для студ. техн. вузов / И. М. Макаров, Н. Н. Евтихийев, Н. Д. Дмитриев и др.; под ред. И. М. Макарова. – М. : Высш. шк., 1983. – 504 с.

15. Бриндли, К. Измерительные преобразователи: справ. пособие / К. Бриндли; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

16. Дмитриев, А. Ю. Основы технологии бурения скважин: учеб. пособие / А. Ю. Дмитриев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 216 с.

17. Сенсоры углового перемещения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/590/446/lecture/9917?page=4>.

18. Пат. 2330241 Российская Федерация, МПК(2006) G 01 С 9/18. Датчик углов наклона объекта / О. Д. Бахарев (Российская Федерация); заявитель и патентообладатель ОАО «Конструкторское бюро специального машиностроения». – № 2007103973/28; заявл. 01.02.2007; опубл. 27.07.2008. – 4 с.

19. Фрайден, Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.

20. Fisher, C. J. Using an Accelerometer for Inclination Sensing / C. J. Fisher // AN-1057. – Norwood : Analog devices, 2010. – 8 p.
21. Друзьякин, И. Г. Технические измерения и приборы: учеб. пособие / И. Г. Друзьякин, А. Н. Лыков. – Пермь : Изд-во Перм. гос.техн. ун-та, 2008. – 412 с.
22. Осадчий, Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин; под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
23. Бухгольц, В. П. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления / В. П. Бухгольц, Э. Г. Тисевич. – М. : Энергия, 1972. – 80 с.
24. Baxter L. K. Capacitive sensors. Design and Applications / L. K. Baxter. – New York : IEEE Press, 1997. – 320 p.
25. Мелентьев, В. С. Метод измерения параметров емкостных датчиков положения и перемещения / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, А. М. Смолина // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 8. – С. 26–30.
26. Повышение точности измерения параметров емкостных датчиков перемещения / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, А. М. Смолина, Т. С. Евстифеева // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 6. – С. 36–38.
27. Логинов, В. Н. Электрические измерения механических величин / В. Н. Логинов. – 2-е изд., доп. – М. : Энергия, 1976. – 104 с.
28. Uchino, K. Advanced piezoelectric materials: science and technology; editing by Kenji Uchino. – Oxford : WP Woodhead Publishing, 2010. – 678 p.

29. Домаркас, В. И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В. И. Домаркас, Р.-И. Ю. Кажис. – Вильнюс : Минтис, 1974. – 258 с.
30. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: в 2 кн. / Ж. Аш; пер. с фр. – Кн. 2. – М. : Мир, 1992. – 424 с.
31. Топильский, В. Б. Схемотехника измерительных устройств / В. Б. Топильский. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 232 с.
32. Малов, В. В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
33. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова; под ред. В. М. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
34. Кобус, А. Датчики Холла и магниторезисторы / А. Кобус, Я. Тушинский; пер. с польск. В. И. Тихонова и К. Б. Макидонской; под ред. О. К. Хомерики. – М. : Энергия, 1971. – 352 с.
35. Кучис, Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования / Е. В. Кучис. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
36. Датчики: довід. / З. Ю. Готра, Л. Я. Ільницький, С. С. Поліщук та ін.; за ред. З. Ю. Готри та О. І. Чайковського. – Львів : Каменяр, 1995. – 312 с.
37. Вайс, Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение / Г. Вайс. – М. : Энергия, 1974. – 384 с.
38. Чабанов, Ю. А. Бесконтактное измерение угловых перемещений и частоты вращения электродвигателя / Ю. А. Чабанов, Я. И. Пешев // Вест. Самар. гос. техн. ун-та. – Сер. : Технические науки. – 2013. – № 2 (38). – С. 223–227.

39. Fontana, M. Novel magnetic sensing approach with improved linearity / M. Fontana, F. Salsedo and M. Bergamasco // *Sensors*. – 2013. – №13. – P. 7618–7632.
40. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин: измерительные преобразователи: учеб. пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
41. Топильский, В. Б. Схемотехника измерительных устройств / В. Б. Топильский. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 232 с.
42. Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда; пер. с англ. В. Д. Новикова. – М. : Мир, 1990. – 535 с.
43. Пат. 78348 U1 Российская Федерация, МПК G 01 В 7/00. Бесконтактный интеллектуальный датчик углового положения / М. Я. Шур, М. Б. Трапезников, Ф. Ф. Мингалеев, Ю. Н. Кириллов, С. А. Лезин, Н. А. Волобуев (Российская Федерация); заявитель и патентообладатель Федеральное гос. унитарное предприятие «Науч.-произв. объединение автоматики им. акад. Н. А. Семихатова». – № 2008126620/22; заявл. 30.06.08; опубл. 20.11.08, Бюл. № 32. – 4 с.
44. Шишмарев, В. Ю. Средства измерений: учеб. пособие / В. Ю. Шишмарев. – 3-е изд. – М. : Академия, 2009. – 320 с.
45. Никитин, В. А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие / В. А. Никитин, С. В. Бойко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2004. – 462 с.
46. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений: учеб. для вузов / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 2-е изд. – М. : Академия, 2004. – 336 с.
47. Ахметжанов, А. А. Индукционный редуктосин / А. А. Ахметжанов, Н. В. Лукиных. – М. : Энергия, 1971. – 80 с.
48. Прецизионные датчики угла с печатными обмотками: библиотека приборостроителя / Л. Н. Сафонов, В. Н. Волнянский, А. И. Окулов, В. Н. Прохоров. – М. : Машиностроение, 1977. – 152 с.

49. Туричин, А. М. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина; под ред. П. В. Новицкого. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1975. – 576 с.
50. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс): учеб. пособие для вузов / К. П. Дьяченко, Д. И. Зорин, П. В. Новицкий, Г. Н. Новопашенный, Л. А. Островский и др.; под ред. Е. Г. Шрамкова. – М. : Высш. шк., 1972. – 520 с.
51. Kalsi, H. S. Electronic instrumentation; edition by H.S. Kalsi. – Third edition. – New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2012. – 829 p.
52. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков / пер. с англ. Б. Л. Горшкова. – СПб. : ЗАО АВТЕКС, 2000. – 311 с.
53. Алиев, Т. М. Измерительная техника: учеб. пособие для техн. вузов / Т. М. Алиев, В. А. Тер-Хачатуров. – М. : Высш. шк., 1991. – 384 с.
54. Физические явления и эффекты в технических системах: учеб. пособие / В. Л. Бурковский, Ю. Н. Глотова, Д. А. Ефремов, А. В. Романов. – Воронеж: ГОУВПО «Воронеж. гос. техн. ун-т», 2007. – 247 с.
55. Шевченко, Г. И. Магнитоанизотропные датчики / Г. И. Шевченко. – М. : Энергия, 1967. – 72 с.
56. Датчики: справ. пособие; под общ. ред. В. М. Шарапова и Е. С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.
57. Грахов, П. А. Моделирование устройств угловых перемещений на основе магнитострикционных пластин с учетом упругих напряжений / П. А. Грахов, А. В. Федин // Электротехн. и информ. комплексы и системы. – 2013. – № 3. – Т.1. – С. 9–17.

58. Гинзбург, В. Б. Магнитоупругие датчики / В. Б. Гинзбург. – М. : Энергия, 1970. – 72 с.

59. Пат. 2343645 Российская Федерация, МПК(2006): Н 04 R 15/00, G01B17/00. Магнестрикционный датчик перемещений / В. Н. Прошкин, А. Н. Дигузов, А. Н. Шеркутов (Российская федерация); заявитель и патентообладатель Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования РФ, Пенз. гос. технол. акад. – № 20071106533/28; заявл. 20.02.07; опубл. 10.01.09., Бюл. №1. – 3 с.

60. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: в 2 кн. / Ж. Аш.; пер. с фр. – Кн. 1. – М. : Мир, 1992. – 480 с.

61. Гуревич, М. М. Фотометрия. Теория, методы и приборы / М. М. Гуревич. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.

62. Ramsden, E. Choosing a sensor to measure rotation [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.electronicproducts.com/Electromechanical\\_Components/Choosing\\_a\\_sensor\\_to\\_measure\\_rotation.aspx](http://www.electronicproducts.com/Electromechanical_Components/Choosing_a_sensor_to_measure_rotation.aspx). – 1999.

63. Ball, S. Exploring Optical and Magnetic Sensors [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1195945](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1195945). – 2003.

64. Сысоева, С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. В 14 ч. Ч. 12. Актуальные классические принципы оптоэлектроники в автоэлектронике / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 5. – С. 44–56.

65. Орнатский, П. П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) / П. П. Орнатский. – 5-е изд., перераб. и доп. – К. : Вища шк., 1986. – 504 с.

66. Lee, H.-S. Reflective-type photonic displacement sensor incorporating a micro-optic beam shaper / H.-S. Lee, S.-S. Lee // Optics Express. – 2014. – Vol. 22. – № 1. – P. 859-868.

67. Домрачев, В. Г. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: справ. пособие / В. Г. Домрачев, В. Р. Матвеевский, Ю. С. Смирнов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 392 с.

68. Габидулин, М. А. Анализ и синтез считывающих систем растровых синусно-косинусных преобразователей перемещений / М. А. Габидулин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 6. – С. 39-50.

69. Буймистряк, Г. Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем: монография / Г. Я. Буймистряк. – СПб : ИВА, ГРОЦ Минатома. – 2005. – 198 с.

70. Ленк, Дж. Д. Справочник по проектированию электронных схем / Дж. Д. Ленк; пер. с англ. В. И. Зубчука и В. П. Сигорского; под ред. В. П. Сигорского. – К. : Техніка, 1979. – 208 с.

71. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: справ. рук. / У. Титце, К. Шенк; пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

72. Простой робот с логической микросхемой [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.chipinfo.ru/schems/robot/robot4.html>.

73. Москатов, Е. А. Книга «Электронная техника. Начало» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://moskatov.narod.ru/Books/The\\_electronic\\_technics/Bipolar\\_transistors.html](http://moskatov.narod.ru/Books/The_electronic_technics/Bipolar_transistors.html).

74. Фишер-Криппс, А. С. Интерфейсы измерительных систем. справ. рук. / А. С. Фишер-Криппс. – М. : Технологии, 2006. – 336 с.
75. Ang, K.-W. Germanium photodetector technologies for optical communication applications / K.-W. Ang, G.-Q. Lo and D.-L. Kwong // Semiconductor Technologies; editing by Jan Grym. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/9789.pdf>. – 2010. – P.373–406.
76. Haus, J. Optical Sensors: Basics and Applications; edited by Jorg Haus. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2010. – 189 p.
77. Steck, D. A. Classical and Modern Optics; edited by D. A. Steck. – Revision 1.5.1. – Oregon : University of Oregon, 2013. – 352 p.
78. Гусев, В. Г. Электроника: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1991. – 622 с.
79. Борзов, М. И. Индуктивные преобразователи угла в код / М. И. Борзов. – М. : Энергия, 1970. – 72 с.
80. Шульц, Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: справ.; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
81. Кирьянов, В. П. Повышение точности угловых измерений с помощью фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа / В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – № 6. – С. 84–91.
82. Повышение точностных параметров лазерных генераторов изображений с круговым сканированием для формирования прецизионных углоизмерительных

структур / А. В. Кирьянов, В. А. Жмудь, И. Н. Томилов, Д. А. Котин, Д. О. Терешкин, А. В. Останин // Науч. вестн. Новосибир. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 46–50.

83. Mazda, F. F. Electronics engineer's reference book; edited by F. F. Mazda. – Sixth edition. – London : Butterworth & Co, 1989. – 1010 p.

84. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин и др.: под. ред. Ю. Г. Якущенко. – М. : Машиностроение, 1987. – 480 с.

85. Вульвет, Дж. Датчики в цифровых системах / Дж. Вульвет; пер. с англ.; под ред. А. С. Яроменка. – М. : Энергоиздат, 1981. – 200 с.

86. Пат. 83931 Україна, МПК(2006) G 01 D 5/26, G 01 R 27/26, G 02 B 6/00, G 09 G 5/02, G 01 B 11/26. Датчик кута повороту вала / Г. В. Бродовий, В. П. Іщук, Ю. В. Коломзаров, П. Ф. Олексенко, Ю. В. Ушенін, Ю. Я. Циркунов, Л. Д. Яцко (Україна); заявник і патентоволодар Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова Нац. акад. наук України. – № а200612789; заявл. 04.12.2006; опубл. 26.08.08, Бюл. № 16. – 6 с.

87. Оптико-электронные приборы для изучения научных исследований: учеб. пособие / Л. А. Новицкий, А. С. Гоменюк, В. Е. Зубарев, А. М. Хохоров. – М. : Машиностроение, 1986. – 432 с.

88. Бесконтактный способ контроля углового перемещения охладителя микрокриогенной системы Стирлинга при охлаждении матричных фотоприемных устройств / А. И. Еремчук, А. В. Полесский, А. В. Самвелов, Д. А. Сысоев, К. А. Хамидуллин // Успехи прикладной физики. – 2013. – Том 1. – № 2. – С. 220–224.

89. Борисов, Г. М. Исследование метода определения оптических параметров, основанного на измерении углов падения / Г. М. Борисов, А. А. Ковалёв // Вестн. НГУ. Серия: Физика. – 2012. – Т. 7. – Вып. 1. – С. 103–109.

90. Patent 6 552 330 USA, International Class B 62 D 15/00; B 62 D 15/02; G01D5/26; G01D5/347. Optoelectronic angle of rotation sensor / Blasing Frank, Werl (DE); assignee: Leopold Kostal GmbH & Co. KG – Appl. № 10/097897; Filed 13.03.03; Publ. 22.04.03. – 2 p.

91. Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов / М. Адамс; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 512 с.

92. Peatross, J. Physics of Light and Optics / J. Peatross, M. Ware. – Brigham : Brigham Young University, 2013. – 345 p.

93. Стерлинг, Д. Дж. мл. Техническое руководство по волоконной оптике / Д. Дж. мл. Стерлинг; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : ЛОРИ, 1998. – 277 с.

94. Иванов, А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А. Б. Иванов. – М. : Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 671 с.

95. Световодные датчики / Б. А. Красюк, О. Г. Семенов, А. Г. Шереметьев, В. А. Шестериков. – М. : Машиностроение, 1990. – 256 с.

96. Гауэр, Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1989. – 504 с.

97. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ; под ред. Т. Окоси; пер. с япон. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

98. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики: вводный курс для инж. и науч. работников; под ред. Э. Удда. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.

99. Давыдов, А. И. Акустооптический коммутатор волоконно-оптических линий связи для информационно-измерительных систем / А. И. Давыдов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 4. – С. 12–17.

100. Азимов, Р. К. Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основе полых световодов / Р. К. Азимов, Ю. Г. Шипулин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 56 с.

101. А. с. СССР № 447739, МКИ G 08 C 9/06. Фотоэлектрический функциональный преобразователь угловых перемещений / Р. К. Азимов, Ю. Г. Шипулин. – № 1911073/18-24; заявл. 25.04.73; опубл. 25.10.74, Бюл. № 39. – 4 с.

102. А. с. СССР № 540276, МКИ G 08 C 9/06, G 01 B 7/16. Фотоэлектрический датчик угловых и линейных перемещений / Р. К. Азимов, Ю. Г. Шипулин. – № 2093230/10; заявл. 27.12.74; опубл. 25.12.76, Бюл. № 47. – 4 с.

103. А. с. СССР № 1490469, МКИ G 01 B 11/26. Фотоэлектрический датчик угловых перемещений / Н. И. Гиниятуллин, З. М. Хасанов, Р. Л. Сафиуллин, С. В. Шевченко. – № 4276011/25-28; заявл. 15.05.87; опубл. 30.06.89, Бюл. № 24. – 4 с.

104. А. с. СССР № 1027512, МКИ G 01 B 11/26. Устройство для измерения малых угловых смещений объекта / В. В. Ефимов, С. В. Пугачев. – № 3333770/18-28; заявл. 20.08.81; опубл. 07.07.83, Бюл. № 25. – 4 с.

105. Patent 6 501 069 USA, International Class G 01 D 3/08; G 01 D 5/26; G 01 D 5/347. Optoelectronic angle of rotation sensor having a code disk with redundant

digital coding / Blasing Frank (DE); assignee: Leopold Kostal GmbH & Co. KG – Appl. № 10/097793; Filed 14.03.02; Publ. 31.12.02. – 2 p.

106. Кошевой, Н. Д. Универсальный фотоэлектрический датчик углового перемещения рулевых поверхностей самолета / Н. Д. Кошевой, А. С. Оганесян // Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – К. : Обрій. – 2008. – Вип. 11. – С. 34-37.

107. Кошевой, Н. Д. Схемотехнические решения по проектированию оптического устройства для измерения угла поворота рулевой поверхности самолета / А. С. Оганесян, Н. Д. Кошевой, М. В. Цеховской // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків. – 2009. – № 3 – С. 75-78.

108. Пат. 33044 Україна, МПК(2006) G 01 B 11/26. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень / М. Д. Кошовий, О. Л. Бурлєєв (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – № u200801273; заявл. 01.02.08; опубл.10.06.08, Бюл. № 11. – 4 с.

109. Бурлєєв, О. Л. Волоконно-оптичний преобразователь угла поворота в цифровой код / О. Л. Бурлєєв // Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2008»: тези доп. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – 2008. – С. 103.

110. Пат. 61840 Україна, МПК(2006) G 01 B 11/26. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень / М. Д. Кошовий, О. Л. Бурлєєв (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – № U201102380; заявл. 28.02.11; опубл.25.07.11, Бюл. № 14. – 4 с.

111. Burleiev, O. L. Photoelectric methods of measuring the steering angle in aviation / N. D. Koshevoy, O. L. Burleiev, V. A. Gordienko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2012. – Vol. 71. – № 4. – P. 759–762.

112. Пат. 40489 Україна, МПК(2009) G 01 B 11/26. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень / М. Д. Кошовий, М. В. Цеховський, О. Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – № u200813330; заявл. 18.11.08; опубл.10.04.09, Бюл. № 7. – 4 с.

113. Guide to fiber optics and premises cabling. Topic: Optical fiber. [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>.

114. Пат. 61854 Україна, МПК(2006) G 01 B 11/26. Спосіб вимірювання кутових переміщень / М. Д. Кошовий, О. Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – № u201103265; заявл. 21.03.11; опубл.25.07.11, Бюл. № 14. – 4 с.

115. Бурлеев, О. Л. Фотоэлектрический преобразователь для измерения угла поворота рулевой поверхности самолета / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013): VI міжнар. наук.-практ. конф., 27–29 травня 2013 р., Київ, Україна. – К. : НАУ, 2013. – С. 77–78.

116. Быков, В. В. Исследовательское проектирование в машиностроении / В. В. Быков, В. П. Быков. – М. : Машиностроение, 2011. – 256 с.

117. Методология оптимального по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента: монография / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко, А. В. Павлик, Н. В. Доценко. – Полтава : Полтав. гос. аграрная акад., 2017. – 232 с.

118. Кошевой, Н. Д. Сравнительный анализ методов синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов многофакторного эксперимента / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко, И. И. Кошечкина // Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київ. Нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – 2016. – Вип. 54. – С. 33–39.

119. Кошевой, Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента: монография / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. – Полтава : Полтав. гос. аграрная акад., 2013. – 317 с.

120. Муромцев, Д. Ю. Конструирование узлов и устройств электронных средств: учеб. пособие / Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин, О. А. Белоусов. – Ростов н/Д : Феникс, 2013. – 540 с.

121. Бурлеев, О. Л. Применение метода ветвей и границ для оптимизации многофакторных экспериментов / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев, Е. М. Костенко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 1. – С. 67–70.

122. Бурлеев, О. Л. Оптимальное планирование эксперимента с введением ограничения по дополнительному критерию / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев, Е. М. Костенко // Вісн. Сум. держ. ун-ту. – 2010. – № 3. – Т. 2. – С. 63–67.

123. Бурлеев, О. Л. Оптимизация геометрического расположения фотоприемников при контроле углового перемещения рулевых поверхностей

самолета / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев, // Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2014. – Вип. № 46. – С. 36–44.

124. Светодиодные драйверы для различных применений // Современная светотехника. – № 5. – 2014. – С. 55–57.

125. Описание цифрового вольтметра Mastech MS8200G [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://masteram.com.ua/ru/Mastech-MS8200G-Digital-Multimeter.php>.

126. Володарский, Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е. Т. Володарский, Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – К. : Вища шк., 1987. – 280 с.

127. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Наука, 1977. – 280 с.

128. Уокенбах, Дж. Формулы в Microsoft Excel 2010 / Дж. Уокенбах; пер. с англ. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2011. – 704 с.

129. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 509 с.

130. Давиденко, А. П. Организация и планирование научных исследований, патентоведение / А. П. Давиденко. – Х. : НТУ «ХПИ», 2004. – 320 с.

131. Айзенберг, Ю. Б. Справочная книга по светотехнике; под ред. Ю. Б. Айзенберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Знак, 2006. – 972 с.

132. Оганесян, А. С. Схемотехнические решения по проектированию оптического устройства для измерения угла поворота рулевой поверхности самолета / А. С. Оганесян, Н. Д. Кошевой, М. В. Цеховской // Світлотехніка та електроенергетика. Міжнар. наук.-техн. журнал. – Х., 2009. – № 3. – С. 75–78.

133. Пат. № 33535 України, МПК(2006) G01B 11/26. Оптронний датчик кутового переміщення рульової поверхні літака / М. Д. Кошовий, А. С. Оганесян, М. В. Цеховський (Україна). – № u200802648; заявл. 29.02.2008; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12, 2008. – 4 с.

134. Оганесян, А. С. Программно-аппаратный комплекс компьютеризированной системы измерения углового отклонения рулевых поверхностей летательного аппарата / А. С. Оганесян, М. В. Цеховской, Н. Д. Кошевой // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 49. – Х., 2011. – С. 162–168.

135. Пат. № 55950 України, МПК(2006) G02F 7/00. Система обробки інформації з фотодатчиків / А. С. Оганесян, М. В. Цеховський, М. Д. Кошовий, А. М. Анікін (Україна). – № u201009210; заявл. 22.07.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. – 5 с.

136. Комп'ютерна програма «Програмний комплекс обробки інформації комп'ютерної системи контролю кутового відхилення рульових поверхонь літального апарату» / А. С. Оганесян, М. В. Цеховський, М. Д. Кошовий, О. В. Гапоненков // Свідоцтво про реєстр. авторського права на твір № 37681. –

Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін. освіти і науки України  
31.03.2011 р.

137. Пат. 96478 Україна, МПК(2015.01) G 06 N 99/00. Комп'ютерна система контролю кутового переміщення рульової поверхні літака / М. Д. Кошовий, О. Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – № u201408705; заявл. 01.08.14; опубл. 10.02.15, Бюл. № 3. – 3 с.

138. Бурлеев, О. Л. Усовершенствование компьютерной системы контроля углового перемещения рулевой поверхности самолета / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев // Интегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013). VIII міжнар. наук.-практ. конф., 18–19 травня 2015 р., Київ, Україна. – К. : НАУ, 2015. – С.100–102.

Наукове видання

**Кошовий Микола Дмитрович**

**Бурлєєв Олег Леонідович**

**Костенко Олена Михайлівна**

**ТЕХНОЛОГІЇ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ  
ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І УПРАВЛІННЯ**

Редактор Т. В. Савченко

Зв. план, 2019

Підписано до друку 29.03.2019

Формат 60x84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 5,8. Обл.-вид. арк. 6,5. Наклад 100 пр.

Замовлення . Ціна вільна

---

Видавець

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<https://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001

Виготовлювач

Полтавська державна аграрна академія

36003, м. Полтава, вул. Сковороди, 1/3

<https://www.pdaa.edu.ua>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер.