

номерностью темновых токов фотодиодов вдоль сканистора при слабых уровнях световых сигналов, а также в случае интенсивных световых помех.

#### Библиографические ссылки

1. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения // Изв. РАН. – 2005. – № 2. – С. 71–75.

2. Шелковников Ю. К., Липанов А. М. Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 144 с.

3. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р. Устройство для измерения размеров объектов : патент РФ № 2348900. – 2009.

\* \* \*

*A. M. Lipanov*, DSc in Engineering, Academician, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of the RAS  
*Yu. K. Shelkovnikov*, DSc in Engineering, Professor, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of the RAS  
*A. V. Aliev*, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
*N. I. Osipov*, PhD in Engineering, Senior Researcher, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of the RAS

#### Noise-free scanistor meter for the angular movements of the objects

*The paper considers the application of optical-electronic systems based on the scanistor to measure angular displacement of objects working at light interferences and noises. Expressions are obtained for output currents and voltages of the scanistor video signal when operating with amplitude-modulated light signals in the time-pulse and photo-potentiometric modes. The analysis of noise-proof collimator and self-collimator scanistor meters of object angular displacements is given.*

**Keywords:** television scanistor, video signal, light zones, misalignment, optical-electronic system

Получено: 22.10.12

УДК 623.544:681.78

*A. M. Липанов*, доктор технических наук, академик РАН;  
*Ю. К. Шелковников*, доктор технических наук, профессор  
 Институт прикладной механики Уральского отделения РАН  
*A. В. Алиев*, доктор физико-математических наук, профессор;  
*К. В. Сермягин*, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СКАНИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ СТВОЛЬНЫХ ТРУБ

*Рассмотрены основные свойства, режим работы и схема включения телевизионного сканистора как бесконтактного датчика измерительной информации в устройствах для измерения непрямолинейности ствольных труб. Определены условия и необходимые преобразования видеосигнала со сканистора для измерения временного местоположения его характерных точек, по которым определяются координаты световых зон. Исследованы физические особенности работы сканистора, с их учетом получены выражения для ошибки определения измеряемой координаты.*

**Ключевые слова:** сканисторный измеритель, угловые перемещения, видеосигнал, амплитудная модуляция

Высокие метрологические характеристики, отсутствие механического контакта с измеряемым объектом, небольшие габариты и высокая надежность наряду с широкими возможностями предварительной обработки оптической информации позволяют использовать оптико-электронной системы (ОЭС) в различных областях техники и научных исследованиях.

Разработка прецизионной ОЭС для контроля распределения кривизны ствольной трубы (СТ) по ее длине позволит внедрить использование норм кривизны в технологический цикл изготовления СТ и повысить объективность приемо-сдаточных испытаний при их проведении по вычисленному паспортному значению кривизны. При этом кривизна  $K(x)$  действительной оси канала трубы, как геометриче-

ского места центров его поперечных сечений, определяется выражением

$$K(x) = \frac{1}{R(x)} = \frac{H''(x)}{\left\{1 + [H'(x)]^2\right\}^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где  $R(x)$  – радиус кривизны;  $H(x)$  – непрямолинейность, характеризующаяся линейными отклонениями действительной оси канала СТ от его теоретической оси.

Измерение кривизны действительной оси канала СТ могут быть произведены:

– методом нивелирования, основанным на измерении непрямолинейности;

– коллимационным методом, сводящимся к определению угла смежности;

– методом прямого измерения кривизны.

Следует отметить, что наибольшей простотой технической реализации, эксплуатации и метрологической аттестации обладают оптико-электронные измерители кривизны СТ на основе метода нивелирования, которые при использовании прецизионных датчиков линейных перемещений удовлетворяют заданным требованиям и не имеют накопления ошибок (так как каждое измерение производится от материализованной теоретической оси СТ).

От выбора датчика оптико-электронного измерителя непрямолинейности СТ зависят его метрологические и эксплуатационные характеристики, простота аппаратной реализации, габариты, надежность работы. Наиболее полно этим требованиям отвечают полупроводниковые координатные фотоприемники (ПКФ) – аналоги телевизионных передающих трубок. Их принцип действия основан на преобразовании пространственного распределения освещенности на фоточувствительной поверхности (отражающего

геометрические параметры контролируемого объекта) в электрический видеосигнал (ВС) и использовании его для анализа изображений. Измерение необходимых линейных параметров объекта осуществляется путем измерения интервалов времени – или от начала развертки до характерных точек полученного ВС, или между этими точками. Среди представителей ПКФ (таких как приборы с зарядовой связью, фотодиодные интегральные линейки и др.) наиболее высокой координатной чувствительностью, способностью регистрировать мгновенное распределение освещенности в широком динамическом диапазоне ее изменения, а также простотой схем для обработки сигналов и более низкой стоимостью отличаются телевизионные сканисторные структуры (при этом наиболее совершенными из сканисторных структур являются сплошной сканистор и многофункциональный фотоприемник мультискан) [1].

На рис. 1 приведены зависимости световой составляющей видеосигнала и его первой и второй производных для световой зоны (СЗ) различной ширины и одинаковой освещенности.

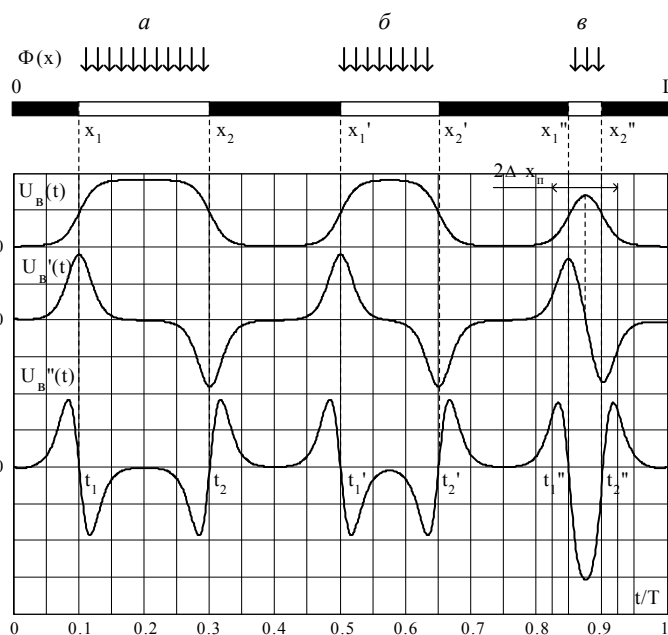


Рис. 1. Формы кривых видеосигнала и его первой и второй производных для СЗ различной ширины

Анализ этих зависимостей показал [2]:

– при постоянной ширине СЗ амплитуды ВС со сканистора и его первой и второй производных прямо пропорциональны освещенности;

– при расширении от минимальной СЗ амплитуды ВС и его первой и второй производных сначала нелинейно увеличиваются, а затем становятся постоянными и не зависящими от ширины СЗ (если ширина  $x_2 - x_1$  СЗ превысит удвоенную величину зоны переключения сканисторной структуры  $2 \cdot \Delta x_n$ );

– временная координата положения середины узкой СЗ ( $x_2 - x_1 < 2 \cdot \Delta x_n$ ) однозначно определяется моментом перехода через нуль первой производной ВС;

– временная координата середины широкой СЗ ( $x_2 - x_1 > 2 \cdot \Delta x_n$ ) может быть определена полусуммой моментов времени  $t_c = (t_1 + t_2)/2$  переходов через нуль второй производной ВС.

При измерении непрямолинейности СТ фотоприемник сканистор и лазерный луч (материализующий ось канала трубы) находятся внутри СТ, поэтому в данном случае целесообразно использовать наиболее простой режим работы сканистора без модуляции яркости светового потока. На рис. 2 приведена структурная схема предложенного измерителя непрямолинейности оси канала СТ с компенсацией погрешности от пространственной нестабильности лазерного луча (где Л – лазер; СП –

светоделительная приставка; ЦЛ – цилиндрическая линза; СК – сканистор; БВОВС – блок выделения и обработки видеосигнала; ГЗИ – генератор заполняющих импульсов; И1, И2, ИЛИ – схемы И, ИЛИ; ТМ – транспортный механизм; РУ – регистрирующее устройство).

Непрямую ось канала СТ измеряется сканисторным датчиком относительно линии, проходящей в середине между двух лазерных лучей

светоделительной приставки. Транспортный механизм перемещает измерительную каретку внутри СТ, при этом «привязка» измеряемых значений непрямолинейности к продольному положению каретки осуществляется путем установки в каретке измерительного колеса и углового фотоэлектрического датчика положения (например, серии ЛИР-137).

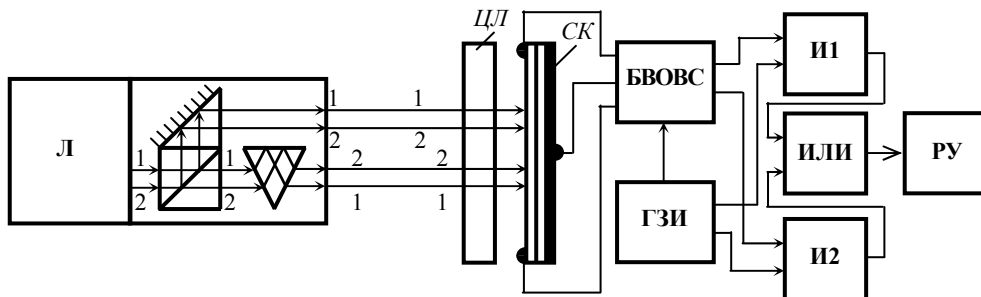


Рис. 2. Структурная схема сканисторного измерителя непрямолинейности СТ с компенсацией погрешности от пространственной нестабильности лазерного луча

В разработанном измерителе лазерная светоделительная приставка СП (рис. 2) с помощью цилиндрической линзы ЦЛ формирует прямой (1, 2) и инвертированный (2, 1) лучи лазера Л на фоточувствительной поверхности сканистора СК. Пространственные флуктуации лазерного луча преобразуются СП в противофазные перемещения лучей – прямого (1, 2) влево и инвертированного (2, 1) вправо. При последовательном опросе элементарных фотодиодных ячеек сканистора блок выделения и обработки видеосигнала БВОВС формирует видеосигнал, соответствующий прямому и инвертированному лучам лазера, который описывается зависимостью [2]:

$$V_n = \frac{L \cdot b \cdot l}{T} 2j_s \left[ \frac{1}{\exp \alpha (E_s - E_k) + 1} \right]_0^L + \frac{L \cdot b \cdot l}{T} 2j_{\text{фб}} (1 + K_n) \times \left\{ \left[ \frac{1}{\exp \alpha (E_s - E_k) + 1} \right]_{x_1}^{x_2} + \left[ \frac{1}{\exp \alpha (E_s - E_k) + 1} \right]_{x_3}^{x_4} \right\}, \quad (2)$$

где  $L$  – коэффициент, зависящий от способа дифференцирования;  $b, l$  – ширина и длина сканистора, соответственно;

$\alpha = \left( A \frac{KT^\circ}{q} \right)^{-1}$ ;  $K$  – постоянная

Больцмана;  $q$  – заряд электрона;  $A$  – коэффициент, отражающий степень неидеальности  $p$ - $n$ -перехода сканисторной структуры;  $T^\circ$  – температура в градусах Кельвина;  $E_s = E_0 \frac{x_0}{l}$  – потенциал эмиттера в точке опроса  $x_0$ ;  $E_0$  – постоянное напряжение смещения эмиттера;

$E_k = E_0 \frac{t_0}{T}$  – значение пилообразно-

го напряжения в момент опроса  $t_0$ ;  $T$  – период пилообразного напряжения;  $j_s, K_n$  – темновой ток насыщения и коэффициент несимметрии вольт-амперной характеристики фотодиодной ячейки, соответственно;  $j_{\text{фб}}$  – приращение тока насыщения фотодиодной ячейки при освещении;  $x_1, x_2$  и  $x_3, x_4$  – координаты начала и конца на сканисторе узких световых зон от прямого и инвертированного лучей лазера.

Анализ выражения (2) для ВС со сканистора показывает, что его амплитуда пропорциональна освещенности и ширине СЗ, крутизна нарастания фронта и спада среза импульса видеосигнала зависит от уровня освещенности СЗ, положение максимума видеосигнала во времени зависит от освещенности СЗ. Поэтому определение координаты СЗ непосредственно по максимуму амплитуды или длительности видеоимпульса не обеспечивает высокой точности. Характерной точкой видеосигнала является точка максимума видеосигнала от узкой СЗ. Следует учитывать, что со схемотехнической точки зрения точнее и проще фиксировать моменты времени по переходу через нуль первой производной ВС.

Обработанные видеоимпульсы с первого и второго выходов БВОВС поступают на первые входы первой и второй схем И, на вторые входы которых с первого и второго выхода генератора ГЗИ заполняющих импульсов поступают мерные импульсы с частотами следования  $f_3/2$  и  $f_3$ . В результате при одном опросе сканистора количество  $n$  импульсов на выходе схемы ИЛИ равно такому же количеству  $n$  мерных импульсов с частотой следования  $f_3$ , приходящихся на временной интервал от начала периода развертывающего напряжения опроса до середины видеоимпульса.

Пространственная нестабильность лазерного луча создает смещение видеосигнала от прямого луча

влево, а сигнала от инвертированного луча вправо. Длительность импульса с первого выхода БВОВС увеличивается, а длительность импульса с его второго выхода уменьшается так, что количество мерных импульсов остается прежним. В результате показания регистрирующего устройства РУ не зависят от пространственных флуктуаций луча лазера.

Потенциальная точность измерителя прямолинейности СТ с компенсацией погрешности от пространственной нестабильности лазерного луча ограничивается нелинейностью координатной характеристики сканистора и физическими особенностями его работы [3].

Абсциссы, соответствующие значениям видеосигнала  $V_{b\max}/2$ , являются граничными координатами  $x_1$  и  $x_2$  световых зон. В отличие от (2) выражение для производной от видеосигнала не имеет постоянной составляющей, обусловленной темновыми токами сканистора:

$$V'_n = j_{f1}(1 + K_n) \frac{L_1 \cdot L \cdot b \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot l}{T^2} \left[ \frac{\exp \alpha(E_s - E_k)}{(\exp \alpha(E_s - E_k) + 1)^2} \right], \quad (3)$$

где  $L_1$  – коэффициент, зависящий от способа дифференцирования  $V'_n$ .

В [1] показано, что производная от видеосигнала переходит через нуль в момент, соответствующий точке на эмиттере с потенциалом

$$E_v = \frac{E_{s1} + E_{s2}}{2}. \quad (4)$$

При линейных распределениях напряжения на эмиттере и возрастании коллекторного напряжения координата этой точки запишется в виде

$$x_v = \frac{x_1 + x_2}{2}. \quad (5)$$

Исследования [1], показали, что на точность измерения координаты СЗ существенное влияние оказывают перераспределение токов внутри эмиттера сканистора, его фоторезистивные свойства и эффект включения нагрузки. На работу сканистора дополнительное влияние оказывают вентиляционная фотоздс, возникающая в месте расположения на сканисторе эквипотенциальной линии нулевого потенциала, и несимметрия вольт-амперных характеристик фотодиодных ячеек. С учетом физических особенностей работы сканисторных структур выражение (4) можно переписать в следующем виде:

$$E_v = E_0 \frac{(x_1 + x'_2)}{2l'} + J_\phi R_3 \frac{(l - x_2)(x_1 + x'_2) - K_n x_1 (2l' - x'_2 - x_1)}{4l'l'} + J_\phi Z_n \frac{(1 - K_n)}{2}. \quad (6)$$

Тогда

$$x_{vc} = \frac{l(x_1 + x'_2)}{2l'} + \frac{J_\phi R_3 [(l - x_2)(x_1 + x'_2) - K_n x_1 (2l' - x'_2 - x_1)]}{4E_0 l'} + \frac{J_\phi Z_n (1 - K_n)}{2E_0}, \quad (7)$$

где  $x_{vc}$  – координата точки на эмиттере, соответствующая моменту перехода видеосигнала через нуль.

Согласно (6) можно записать:

$$\sigma_v = x_v - \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{l(x_1 + x'_2) - l'(x_1 + x_2)}{2l'} + \frac{J_\phi Z_n (1 - K_n)}{2E_0} + \frac{J_\phi R_3 [(l - x_2)(x_1 + x'_2) - K_n x_1 (2l' - x'_2 - x_1)]}{4E_0 l'}, \quad (8)$$

где  $\sigma_v$  – ошибка определения координаты световой зоны на сканисторе по максимуму видеосигнала с учетом перераспределения токов внутри фоточувствительного эмиттера, фоторезистивного эффекта, нагрузки и несимметрии ВАХ фотодиодных ячеек.

На рис. 3, а–е приведены зависимости  $\sigma_v$  при  $E_0 = 50 \text{ В}$ ;  $K_\phi = K_n = 0,5$ ;  $Z_n = 100 \text{ Ом}$ ;

$$J_\phi = 10^{-3} \frac{(x_2 - x_1)}{l} \text{ А}; \quad R_3 = 10^4 \text{ Ом}; \quad x_1 = 0,2l;$$

$x_1 = 0,21l$  (т. е. для ширины зоны, равной  $0,01l$ ).

Влияние эффектов на форму и амплитуду видеосигнала для разной ширины зоны ( $0,01l$ ;  $0,02l$ ;  $0,5l$ ) иллюстрируется кривыми рис. 3 (а, б; в, г; д, е – соответственно), где кривая 1 иллюстрирует перераспределение токов эмиттера, 2 – фоторезистивный эффект, 3 – нагрузку, 4 – их суммарный эффект с учетом несимметрии ВАХ фотодиодных ячеек. Из рассмотрения графиков (рис. 3) следует, что перераспределение токов эмиттера и включение нагрузки увеличивают, а фоторезистивный эффект уменьшает длительность видеосигнала со сканистора, причем суммарное воздействие эффектов может быть сведено к минимуму выбором соответствующих условий.

Определение непрямолинейности СТ по переднему фронту видеосигнала со сканистора является достаточно сложной задачей, так как для каждой освещенности необходимо привязываться к уровню  $V_{n\max}/2$ , соответствующему граничным координатам световой зоны, т. е. за временное положение видеосигнала принимается положение точки пересечения некоторого переменного уровня сравнения  $U_0 = U_{n\max}/2$  с передним фронтом видеосигнала.

При работе с лазерными пучками, ширина которых не превосходит величины, соответствующей удвоенной зоне переключения фотодиодной ячейки сканисторной структуры, целесообразно использовать временную фиксацию сигнала по положению его максимального значения, определяемого моментом перехода через нуль производной от видеосигнала.

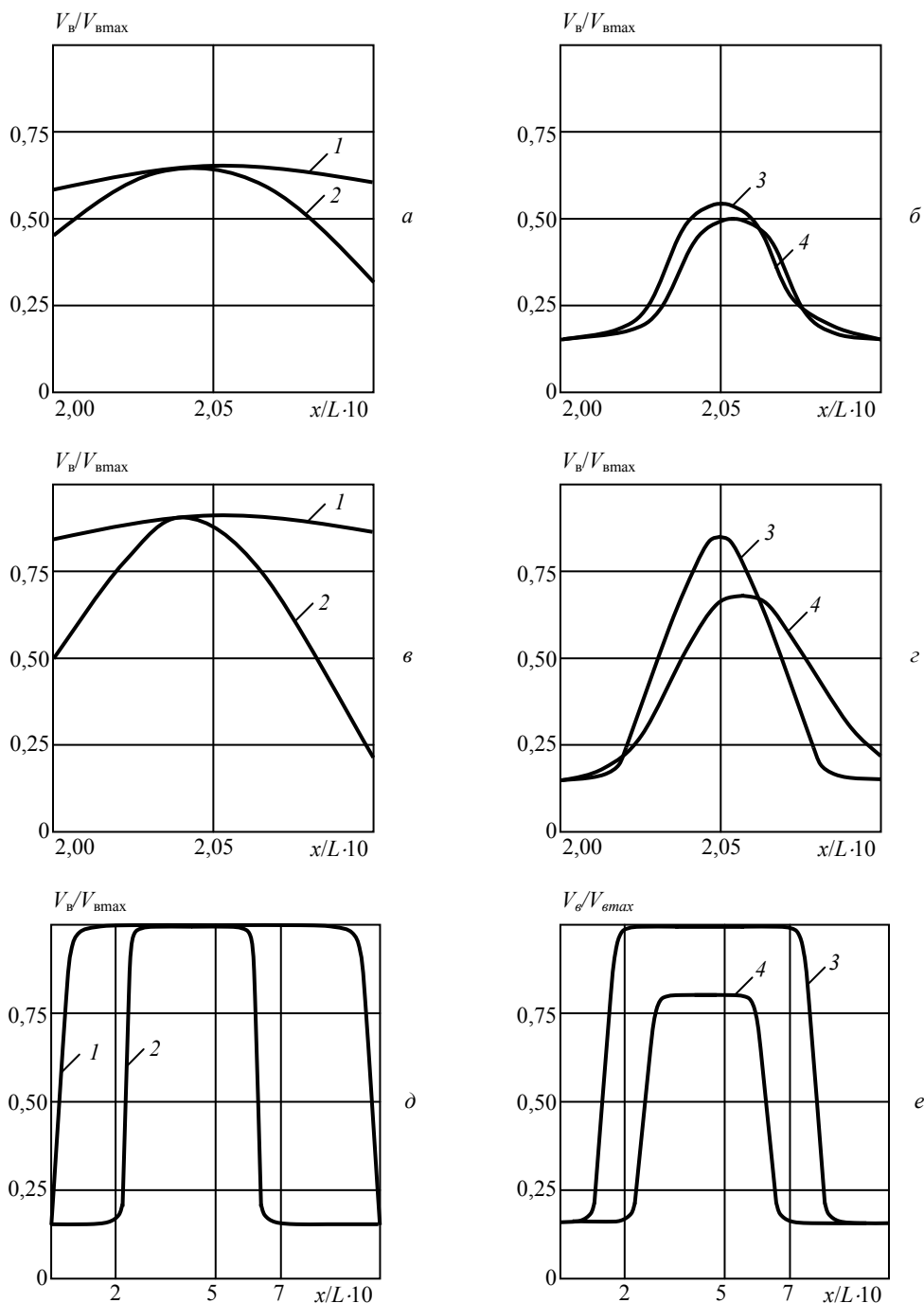


Рис. 3. Влияние физических особенностей работы сканистора на форму и амплитуду видеосигнала (кривая 1 иллюстрирует перераспределение токов эмиттера, 2 – фоторезистивный эффект, 3 – нагрузку, 4 – их суммарный эффект с учетом несимметрии ВАХ фотодиодных ячеек)

#### Библиографические ссылки

1. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения // Изв. РАН. – 2005. – № 2. – С. 71–75.
2. Шелковников Ю. К., Липанов А. М. Теоретические основы и технология изготовления телевизионных ска-

нисторных структур. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 144 с.

3. Шелковников Ю. К. Повышение стабильности и линейности координатной характеристики сканисторных информационно-измерительных систем // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2011. – № 1. – С. 251–255.

\*\*\*

A. M. Lipanov, DSc in Engineering, Academician, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of RAS, Izhevsk  
 Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of RAS, Izhevsk  
 A. V. Aliev, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 K. V. Sermyagin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

**Influence the physical features of the television skanistor structures to a measurement accuracy of misalignment of the barrel pipes**

*The paper considers the basic properties, mode of operation and circuitry of the television scanistor as a non-contact sensor of the measuring data in measuring devices for barrel pipe misalignment. Conditions and necessary transformations of a scanistor video signal are determined to measure the temporary location of its characteristic points that define the coordinates of light zones. Physical characteristics of scanistor operation were investigated and expressions of the error of the measured coordinate determination were achieved with their account.*

**Keywords:** scanistor meter, angular movements, video signal, amplitude modulation

Получено: 22.10.12

УДК 539.3+53.082.56

*Г. В. Ломаев*, доктор технических наук, профессор;

*Р. Н. Вахитов*, аспирант;

*Д. С. Кулешова*, инженер;

*А. Н. Мусалимов*, магистрант;

*Ю. Б. Камалова*, магистрант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА

*Рассматривается возможность оценки остаточных механических напряжений в околошовном пространстве сварочного соединения крупногабаритных стальных изделий на примере гидротурбины Загорской гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС). Разработана и опробована методика, основанная на измерении уровня магнитных шумов (метод эффекта Баркгаузена).*

**Ключевые слова:** остаточные механические напряжения, турбина ГАЭС, магнитные шумы, метод эффекта Баркгаузена

### Введение

В зоне шва сварного соединения возникают остаточные напряжения, которые могут привести к разрушению изделия. В сложных конструкциях больших габаритов, к которым относится гидротурбина ГАЭС, оценка уровня остаточных напряжений возможна лишь неразрушающими методами контроля (НК). Для решения этой задачи используют акустический, рентгеновский и магнитный методы. Известны работы, в которых для оценки механических напряжений успешно использован метод эффекта Баркгаузена (МЭБ) [1, 2].

**Целью работы** является исследование возможности определения остаточных напряжений в зоне сварного соединения рабочего колеса насосной гидротурбины с использованием МЭБ.

Длина сварных соединений такого колеса составляет 64 м; длина одностороннего шва, равная длине лопатки, – 2 м (рис. 1).

Контролю подвергается околошовная зона лопатки на расстоянии 15 см от шва. Материал лопатки – сталь 08Х15Н4ДМ, способ изготовления – прокат с последующей штамповкой. Материал обода и ступицы – 06Х15Н4ДМЛ, способ получения – литье в кокиль.

### Обоснование выбора метода и средств контроля

Физические основы взаимосвязи эффекта Баркгаузена с полем внутренних напряжений в ферромагнитном материале впервые сформулированы Е. И. Кондорским еще в 1937 г. в его теории коэрцитивной силы.

Теория метода неразрушающего контроля напряжений разрабатывалась многими исследователями.

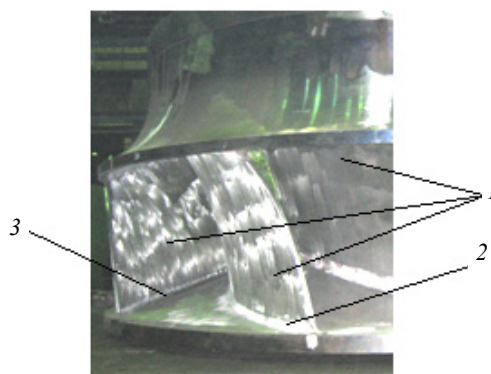


Рис. 1. Фрагмент рабочего колеса турбины: 1 – плоскости лопаток; 2 – правый нижний сварочный шов; 3 – левый нижний сварочный шов

Систематическое изложение положений теории можно найти в [1]. В настоящее время МЭБ введен в ГОСТ 18353–79 [3]. Специфичная форма объекта контроля (криволинейные поверхности лопаток рабочего колеса) и большие габариты (диаметр 6 м, высота 3 м) обусловили вид применяемых средств контроля и измерения. Мы использовали переносной портативный структуроскоп МС-20Б разработки ИжГТУ им. М. Т. Калашникова (руководитель проекта профессор В. К. Барсуков), накладной датчик (преобразователь магнитного шума) с площадью контроля 4 кв. мм (рис. 2).