

УДК 621.01

## ОСОБЕННОСТИ ОБМЕРА ПЛОСКОЙ ДЕТАЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЦИФРОВОЙ ФОТОСЪЁМКИ

Потапова Анастасия Игоревна<sup>(1)</sup>

*Студентка 3 курса<sup>(1)</sup>, кафедра МТ-3,  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

*Научные руководители:*

*Вуколов А.Ю., ассистент кафедры РК-2*

*Головин А.А., д.т.н., профессор кафедры РК-2*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

### Введение

Одним из актуальных направлений экспериментальных методов теории механизмов является бесконтактное измерение объектов промышленной механики. К ним относятся методы цифровой фотосъёмки с последующей обработкой полученных результатов. Наиболее используемыми методами данного направления принято считать:

- «Техническое зрение», основанное на отслеживании реперных точек. Метод состоит в измерении расстояния между оптическими реперами, закрепленными на исследуемом объекте, и/или контрастными границами в измеряемой области. Использование этого технического метода для бесконтактного обмера объектов промышленной механики описано в работах [1, 2];

- «Техническое зрение», основанное на определении фактического масштаба изображения. Метод состоит в использовании параметров фокусировки оптики и/или известных размеров эталонных объектов в рабочем поле. Данный метод следует признать наиболее предпочтительным для применения в робототехнике по причине высокого уровня развития технологий цифровой фотографии.

Данная исследование является расширением работы [2], в которой на основе цифровой фотосъёмки были получены размеры кулачкового механизма и на основе гипотезы о законе движения толкателя кулачкового механизма восстановлен исходный профиль кулачка. Кроме того, было показано, что малое рассогласование оптической оси фотоаппарата и оси вращения кулачка, фактически не влияет на результаты измерений.

К недостаткам работы [2] относятся следующие:

- При фотосъёмке не были учтены факторы, связанные с теневым эффектом;
- Получение фактического масштаба без применения эталона, то есть с пониженной точностью.

В данной работе предлагается метод бесконтактного измерения объектов промышленной механики с помощью цифровой фотосъемки, с учётом всех несовершенств. При фотосъемке использована аппаратура среднего класса, позволяющая получать результаты необходимой точности с минимумом затрат.

### **Планирование эксперимента. Постановка задачи экспериментального исследования**

В качестве объекта исследований был выбран кулачковый механизм гибочного пресс-автомата (рис. 1). Съёмка проводилась на цифровую фотокамеру Canon EOS 400D DIGITAL с выдержкой 8 с и фокусным расстоянием оптики 50 мм. Разрешение регистрирующей матрицы составляет 10.5 МПикс. Средняя розничная цена данной камеры составляет 500 евро.

Особенности фотосъемки:

- Малое угловое отклонение оптической оси фотоаппарата от параллельности оси вращения кулачка фактически не влияет на результаты измерений [2];
- Наличие теневого эффекта (затененных участков профиля кулачка);
- Необходимость точного определения начала координат. В данном случае – точного определения проекции оси вращения кулачка на снимок;
- Особенности вычисления размеров, связанные с формой пикселя и дискретностью цифрового фотоизображения – появление дробных размеров в пикселях (рис. 2).

Фотосъемка проводилась в помещении с естественным рассеянным светом, без использования дополнительных осветительных приборов. Во время фотосъемки на исследуемый механизм крепился эталон длины (стандартная концевая мера), основной размер которого составляет 30мм.

Основные задачи экспериментального исследования состояли в следующем:

1. Получить по имеющимся фотоснимкам с максимальной возможной точностью конструктивный профиль кулачка в виде развертки, либо контура;
2. Оценить величины возникающих ошибок и предложить эффективные методики их компенсации;
3. Определить по геометрическим характеристикам кулачка закон движения толкателя.

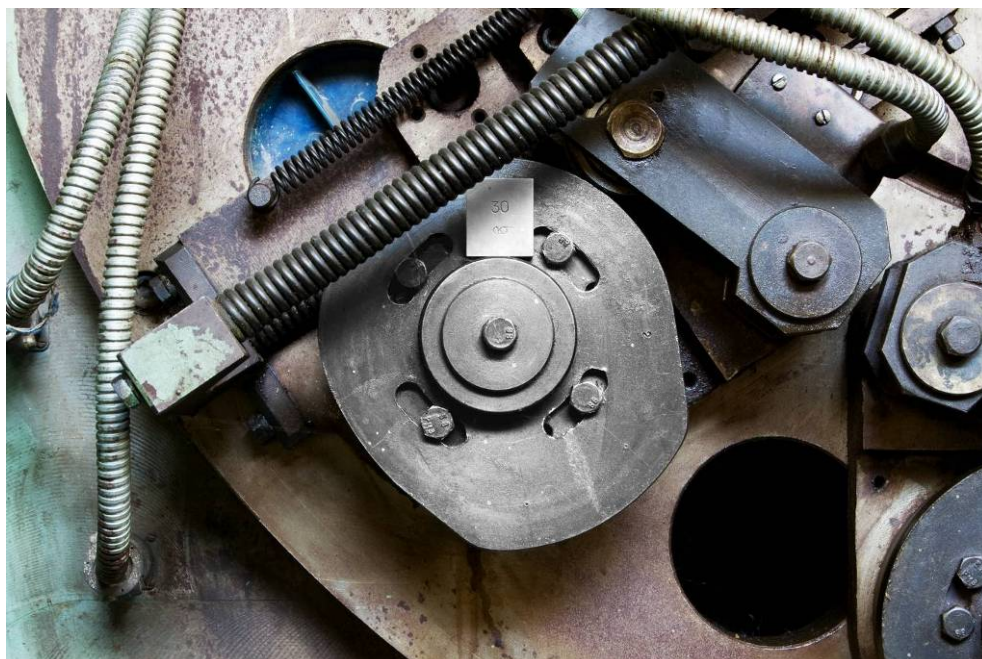


Рис. 1. Кулачковый механизм гибочного пресс-автомата

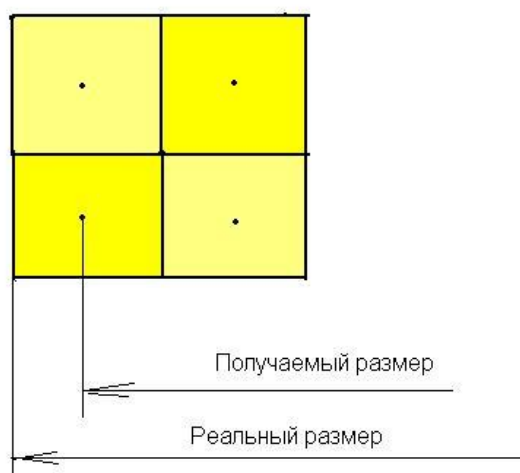


Рис. 2. Искажение измеряемой геометрии за счет дискретности цифрового фотоизображения

Общее число фотографий, полученных во время эксперимента – 8, обработке подвергались 3 наиболее четких снимка.

### Методика обработки результатов эксперимента

Обработка полученных фотоснимков проводилась в программах Canon CameraRAW2 Conversion и Adobe Photoshop CS4. Последовательность обработки указана ниже:

1. Выделение на фотоснимке полос пикселей (Scan Lines) и замер по контрасту длины их участков, соответствующих изображению кулачка или эталона длины (рис. 3);

2. Определение фактического масштаба изображения по эталону длины;
3. Статистическая обработка полученных результатов, определение доверительного интервала для величины фактического масштаба;
4. Определение центральной точки кулачка;
5. Получение фактического профиля кулачка;
6. Оценка и компенсация ошибок;
7. Определение доверительного интервала измерений на основе t-критерия [3].

Результаты определения фактического масштаба по эталону длины представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Результаты определения фактического масштаба изображения**

<b>Количество групп пикселей</b>	14	
<b>Выборочное среднее</b>	Пиксел	264.054
<b>Стандартное отклонение</b>	Пиксел	0.4302
<b>Оценочная величина ошибки</b>	Пиксел	0.1145
<b>Коэффициент Стьюдента</b>	2.1604 (для доверительной вероятности 95%)	
<b>Фактический масштаб</b>	<b>Пикс/мм</b>	<b>8.80175</b>
<b>Ширина доверительного интервала (по изображению)</b>	Пиксел	0.4947
<b>Ширина доверительного интервала (по длине)</b>	мм	0.0562

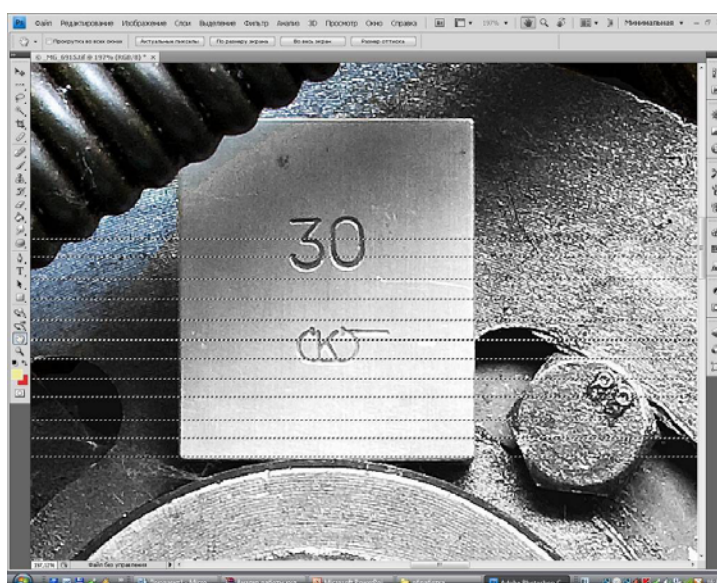


Рис. 3. К определению фактического масштаба

Центровая точка профиля кулачка определена по косвенным признакам (положению высокоточного крепящего болта в центре кулачка) в следующей последовательности:

1. Изображение головки шестигранного болта (см. рис.1) увеличивается до масштаба 100%;
2. В Adobe Photoshop CS4 восстанавливается её профиль – правильный шестигранник;
3. Вершины шестигранника соединяются прямыми крест-накрест;
4. Точка пересечения полученных прямых – центровая точка профиля кулачка с достаточно высокой (максимальное возможное отклонение не более 0.08 мм) точностью;
5. Реальное положение центральной точки, определенное на данном этапе, в дальнейшем проверяется построением центральной точки малой окружности кулачка методом хорд. Проверка показала приемлемую точность.

Для восстановления профиля кулачкового механизма используются полярные координаты. Измерения профиля проводятся многократно, дробные (по пикселям) координаты положения контрастной границы изображения кулачка на снимке – определяются триангуляцией. Каждому последующему результату соответствовал поворот кулака на 5 градусов по часовой стрелке.

В результате получен массив, в котором каждому углу поворота в градусах соответствует радиус кулачка, определённый в пикселях. Для каждого измеряемого положения по ранее полученному фактическому масштабу определена величина этого радиуса.

В табл. 2 приведён фрагмент результатов измерений, содержащий значение профильного угла, соответствующее ему значение длины радиуса, определенное в Adobe Photoshop CS4, математическое ожидание радиус-вектора, по которому возможно восстановить с высокой точностью конструктивный профиль.

Плотность распределения измеряемой величины определяется зависимостью [3]:

$$f_X(x) = \frac{1}{b-a} \mathbf{1}_{[a,b]}(x)$$

для распределения Гаусса, выбранного в качестве стандартной модели. В этом случае математическое ожидание определяется по формуле:

$$M[X] = \int_a^b \frac{x}{b-a} dx = \frac{a+b}{2}$$

Развертка полученного конструктивного профиля представлена на рис. 4.

**Таблица 2. Фрагмент результатов измерений**

№	Угол поворота	Пиксели	Min, мм	Max, мм	Математическое ожидание, мм
1.	0	721.68	81.916	82.0697	81.9928
2.	5	719.78	81.70	81.85	81.775
3.	10	714.77	81.13	81.28	81.205
4.	15	709.66	80.551	80.702	80.6265
5.	20	705.79	80.112	80.262	80.187
6.	25	700.75	79.54	79.689	79.6145
7.	30	700.08	79.464	79.613	79.5385
...	...	...	...	...	...
68.	335	719.86	81.70	81.936	81.818
69.	340	721.76	81.915	82.152	82.0335
70.	345	722.38	81.985	82.223	82.104
71.	350	720.48	81.779	82.001	81.89
72.	355	720.48	81.779	82.001	81.89
73.	360	721.15	81.846	82.083	81.9645

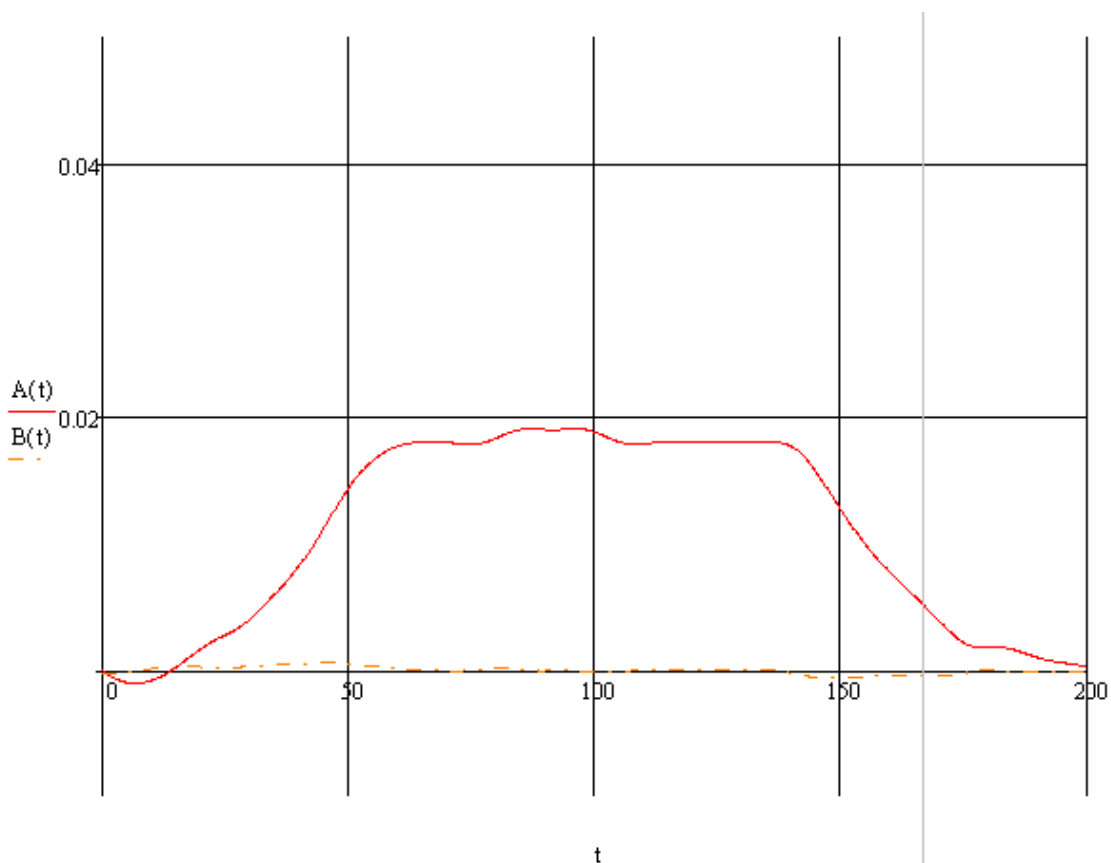


Рис. 4. Развертка конструктивного профиля кулачка

### **Ошибки и методика их компенсации**

Большинство возникающих в процессе измерения ошибок относятся к аппаратным шумам, ошибкам предварительной обработки изображения и т.п. Методика компенсации таких ошибок описана в работах [1, 4].

#### ***Теневого эффект***

Съёмка проводилась при естественном освещении, без использования каких-либо дополнительных источников освещения. Это привело к искажению размеров в нескольких затененных областях снимка – так называемому теневому эффекту.

Как можно видеть на рис. 5 – существует несколько зон, где края кулачка практически неразличимы. Кроме того, затененные участки из-за эффекта паразитного отражения создают двойные и малоcontrastные «воображаемые края» на профиле, создавая, таким образом, большое различие между реальной длиной радиуса кулачка и той же величиной, измеряемой в данном положении. Например, на рис. 1 минимальное различие составляет примерно 0.7 мм (6.15 пиксел). Для компенсации этой погрешности принято следующее решение: участки профиля, расположенные в зоне теневого эффекта, принимаются за участки, лежащие на малом образующем круге кулачка. В случае, когда подобная компенсация невозможна, реальный радиус определяется из предположения об изначальной геометрии профиля кулачка.



Рис. 5. Зоны теневого эффекта

### ***Ошибки дискретизации***

Данные ошибки возникают при рассмотрении формы единичного пиксела. Пиксел представляет собой неделимый объект, обычно квадратной или круглой (при печати на твердом носителе) формы, обладающий определённым цветом. Цифровое фотоизображение состоит из строго квадратных пикселов, расположенных по строкам и столбцам. В случае цифрового видеоизображения форма пиксела искажается при преобразовании формы экрана, что требует специальной методики обработки [4].

Граница измеряемой детали состоит из пикселов. При проведении измерения, возможно, что один или несколько пикселов выпадают из измерения по причине малого контраста [1] (рис. 6).

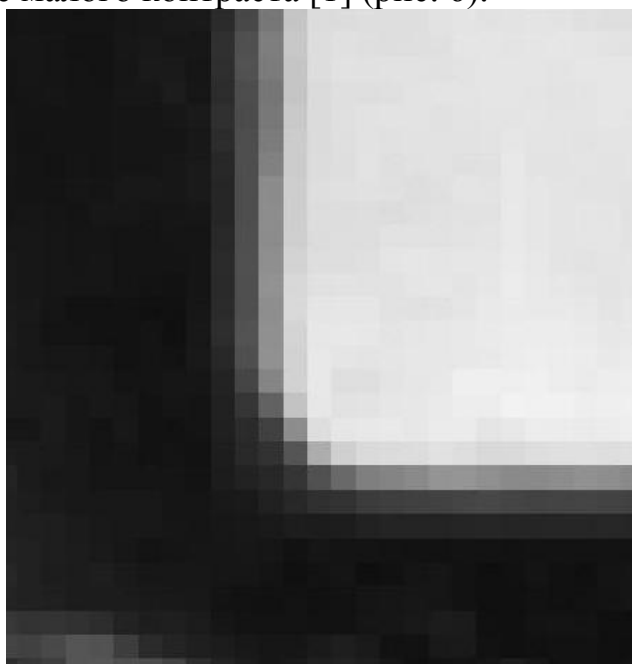


Рис. 6. Возникновение ошибок дискретизации

Результатом компенсации ошибок дискретизации является выражение размеров в пикселах дробными числами, как описано выше.

### **Результаты обработки данных. Закон движения толкателя**

На рис. 7 представлен конструктивный профиль кулачка, построенный с помощью комплекта параметрических средств САПР. О величине доверительного интервала дает представление табл. 2. На рис. 8 показаны графики перемещения и скорости (первой производной перемещения) толкателя, дающие представление о законе движения.



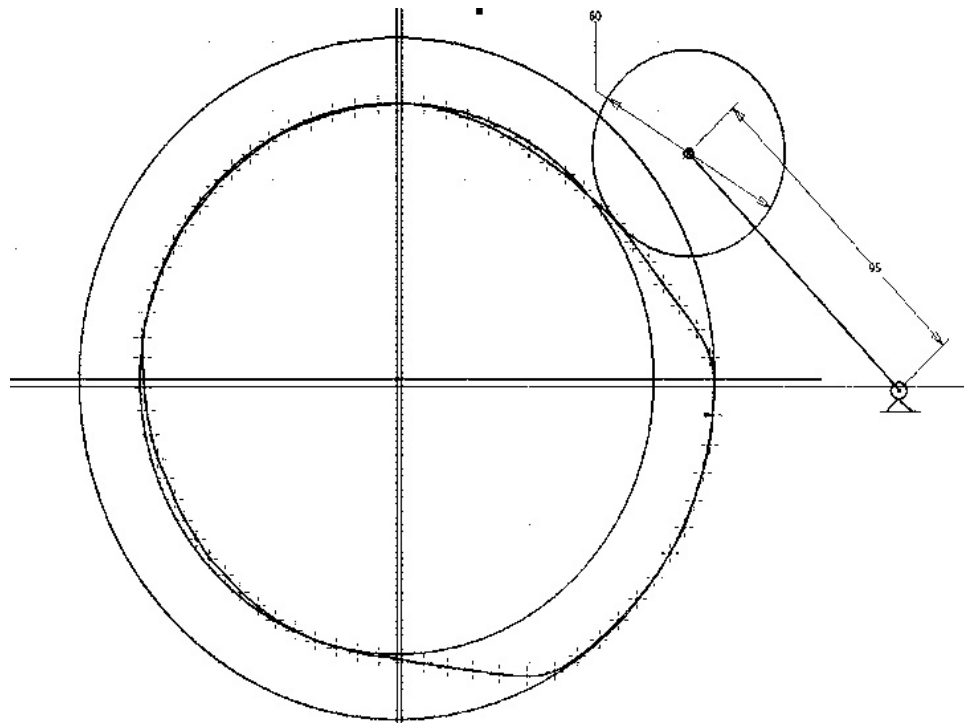


Рис. 7. Конструктивный профиль кулачка

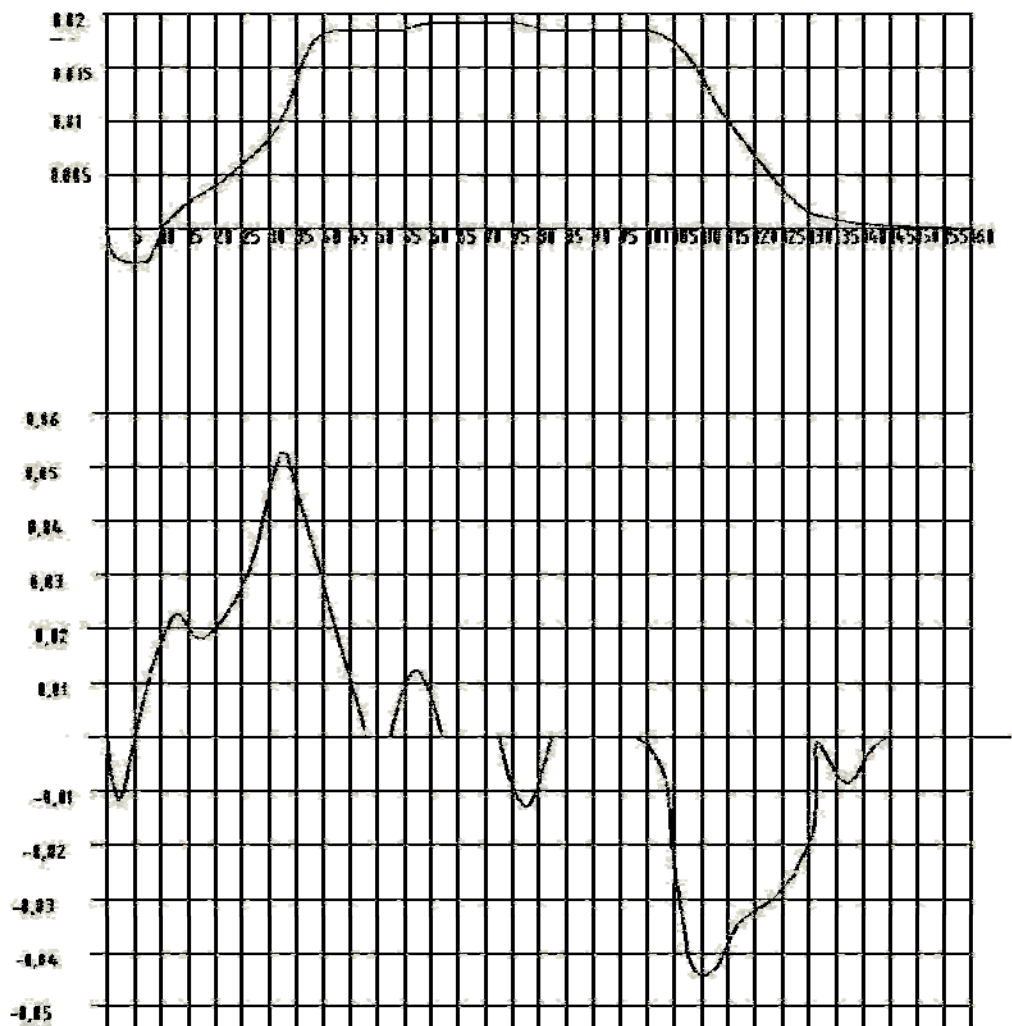


Рис. 8. Закон движения толкателя

## Выводы

1. Показана возможность использования цифровой фотоаппаратуры для бесконтактного обмера объектов промышленной механики;
2. Предложена методика быстрого и эффективного определения фактического масштаба с компенсацией ошибок по внешнему эталону;
3. Описанные методики опробованы на реальной системе, показана их применимость и приемлемая точность;
4. Существуют перспективы применения описанных методов для удаленной, в том числе автоматизированной, диагностики реальных устройств промышленной механики.

## Литература

1. *A. Vukolov, A. Golovin, N. Umnov.* Horse Gait Exploration on “Step” Allure by Results of High Speed Strobelight Photography. Proceedings of EuCoMeS-2010 Conference.
2. *A. Golovin, A. Lafitsky, A. Simuskhin.* Experimental And Theoretical Research Of Cams Wearing Of Cams Mechanism. Proceeding of 2nd International Conference EuCoMeS-2008 /Edited by Marco Ceccarelli. – Springer. – 2008. – Pp. 107-119.
3. *В.Б. Горяинов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др.* Математическая статистика. Учебник для ВУЗов. Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. ISBN 5-7038-1270-4 М. – Изд.-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
4. *A. Vukolov, A. Kharitonov.* Kinematical Analysis of Mechanical Systems by Results of Digital Video Recording. Proceeding of The 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines SYROM 2009/Edited by Ion Visa. – Springer. – 2009. Pp. 457-464.