

Московский Государственный Технический Университет  
им. Н.Э. Баумана

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА

**В ПРИМЕРАХ**

## Раздел 3 Бесконтактные измерения

Методические указания к НИРС  
по теории механизмов и машин

**Под общей редакцией  
А.А. Головина**

МГТУ, 2011

## От авторов

Работа не претендует на сколько-нибудь широкий охват экспериментальных методов и их систематическое изложение. Был просто предложен ряд задач, который интересовали нас, и главное, были решены в рамках НИРС совместно со студентами 3-го курса. Задачи и темы работ предложены профессором кафедры ТММ А.А. Головиным, доцентом кафедры «Робототехника» С.А. Воротниковым и ассистентом кафедры ТММ А.Ю. Вуколовым. Рассмотренные методы в элементарной форме показаны на фоне примеров и могут быть легко приложены к другим исследовательским задачам. Мы надеемся, что пособие послужит отправным пунктом к изучению и применению более сложных методов экспериментального исследования.

*Авторы*

## Введение

*Опыт – единственный источник истины: только опыт может научить нас чему-либо новому, только он может вооружить нас достоверностью. Но одних наблюдений недостаточно: ими надо пользоваться, а для этого необходимо их обобщать.*

Анри Пуанкаре

*Наука – баба весёлая и звериной серьёзности не терпит!*

Н.В. Тимофеев-Ресовский

*Не верьте мне! Испытайте меня!*

Алистер Кроули

Из множества определений понятия «эксперимент», наиболее подходящим нашему случаю мы считаем определение, данное в книге Г.Б. Жданова «Современный детерминизм. Законы природы» (М., «Наука», 1975 г.):

*Само по себе понятие «эксперимент» в физике означает действие, направленное на искусственное создание условий для осуществления того или иного физического явления и для наблюдения этого явления в условиях, по возможности наиболее чистых, то есть не осложняемых другими физическими явлениями.*

Говоря о классификации понятия эксперимента, можно рассуждать о двух его назначениях, и, соответственно, о двух типах эксперимента: **эксперимент-картинка** и **эксперимент-исследование**. *Первый* предполагает максимально наглядную демонстрацию смысла какого-либо понятия или идеи. К экспериментам этого типа

относится, например, [эксперимент Майкельсона-Морли](#), впервые проведенный как демонстрация существования гипотетической светопроводящей среды мирового эфира<sup>1</sup>, и ныне считающийся доказательством принципа инвариантности скорости света в теории относительности. *Второй* тип эксперимента применительно к данному ранее определению позволяет сформулировать три направления исследований:

- Подтверждение и дополнение положений учебного курса;
- Подтверждение теоретических выкладок;
- Поиск нового знания.

Здесь порой уже трудно выделить причину постановки задачи исследования, так как подчас оно может сочетать все три указанных направления.

\*\*\*

Рассмотрению в данном пособии подлежит понятие эксперимента применительно к курсу ТММ, что предполагает в качестве **объектов исследования** механические параметры тел:

- Размеры (геометрия);
- Масса (момент инерции);
- Положение точки/тела;
- Траектория;
- Время (тактовая величина);
- Скорость;
- Ускорение;

---

<sup>1</sup> **Мировой эфир** – гипотетическая волнопроницаемая среда, пронизывающая все мироздание, колебания которой воспринимаются как электромагнитные волны и видимый свет. Модели прохождения света в эфире описываются [уравнениями электродинамики Максвелла](#). До появления [теории относительности](#) гипотеза мирового эфира была весьма популярна в теоретической физике.

- Сила (момент);
- Работа;
- Мощность,

а в качестве **средств проведения эксперимента** –

- Аналитические методы, традиционные для ТММ;
- Средства диагностики и управления механическими и мехатронными системами;
- Современные технологические средства бесконтактного съема данных (фото-, видеокамеры, лазерные дальномеры, пространственные кинематические измерительные комплексы *Motion Capture*);
- Средства математического моделирования поведения механических систем различного класса.

### Персоналии и благодарности

Основные подразделы [примера 3.1](#) написаны А.А. Головиным, А.Ю. Вуколовым, А.И. Потаповой. [Подраздел 3.1.4.2](#) подготовлен А.А. Головиным, Е. Ю. Якушиной.

[Пример 3.2](#) написан А.А. Головиным, А.Ю. Вуколовым, Е. А. Гурьяновой, Н.Н. Лабановой, и Э.В. Харитоновым. [Видеосъемка](#) выполнена А.Ю. Вуколовым.

Текст [примера 3.3](#) подготовлен А.Ю. Вуколовым.

Научная редактура текста выполнена А.А. Головиным.

Верстка, литературная редакция текста, программирование электронной версии выполнено А.Ю. Вуколовым.

Авторы выражают искреннюю благодарность за активное участие в обсуждении материала и редактуре примеров [3.2](#) и [3.3](#). профессору, д.т.н. Умнову Н.В.

## Содержание

<b>От авторов .....</b>	<b>2</b>
<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
Персоналии и благодарности .....	5
<b>Содержание .....</b>	<b>6</b>
<b>Предисловие к разделу.....</b>	<b>8</b>
<b>Пример 3.1 Определение размеров плоской детали по результатам цифровой фотосъемки .....</b>	<b>10</b>
3.1.1 Особенности получения данных о геометрии по цифровому фотоизображению .....	10
3.1.2 Объект исследования и постановка задачи.....	13
3.1.3 Методика обработки экспериментальных данных .....	14
3.1.3.1 Определение фактического масштаба.....	14
3.1.3.2 Поиск центральной точки профиля кулачка.....	16
3.1.3.3 Восстановление конструктивного профиля кулачка .....	16
3.1.4 Анализ результатов и обработка ошибок .....	20
3.1.4.1 Теневой эффект .....	20
3.1.4.2 Геометрические искажения .....	22
3.1.5 Источники .....	25
<b>Пример 3.2 Восстановление закона движения механизма штамповочного прессы по данным цифровой видеосъемки .....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Особенности съема данных о движении с цифрового видеоизображения.....	26
3.2.1.1 Разрешение кадра и формат экрана .....	28
3.2.1.2 Чересстрочная развертка .....	29
3.2.1.3 Выдержка съемки единичного кадра.....	31
3.2.2 Постановка задачи.....	32
3.2.3 Методика обработки экспериментальных данных .....	33
3.2.4 Анализ результатов и обработка ошибок .....	41
3.2.5 Источники .....	44
<b>Пример 3.3 Кинематический анализ походки лошади методом высокоскоростной стробоскопической фотосъемки.....</b>	<b>45</b>
3.3.1 Особенности применения стробоскопической фотографии как экспериментального метода.....	45

3.3.2	Постановка задачи.....	47
3.3.3	Планирование и проведение эксперимента.....	48
3.3.4	Предварительная обработка фотоснимков.....	49
3.3.5	Качественный анализ кинематики и нагружения ног....	50
3.3.6	Некоторые выводы.....	52
3.3.7	Источники.....	54

## Предисловие к разделу

В данном разделе приведены три примера использования – в реальных исследованиях – простейших бесконтактных методов измерения параметров механических систем. Подобные методы находят применение в самых разных отраслях знания, как то:

- Военно-разведывательная деятельность и реверс-инженерия (восстановление по имеющимся съемкам структуры неизвестных механизмов, в том числе с изменяемой структурой, биологических и биомеханических систем);
- Робототехника (простая и малоресурсоёмкая реализация схемы распознавания препятствий и отслеживания движущихся объектов в поле зрения), в качестве замены специализированным программным пакетам распознавания образов;
- Медицина и спорт (оптимизация и выработка походок, рисунков движения, терапевтическая реализация схемы нейрозамещающего и нейроуправляемого протезирования).

В [примере 3.1](#) предлагается метод бесконтактного обмера плоских объектов с помощью цифровой фотосъемки, с учётом всех недостатков такого подхода. Показана возможность получать результаты необходимой точности с минимумом затрат (при использовании фототехники среднего класса и общего назначения). В процессе исследования с цифрового фотоснимка были получены размеры кулачкового механизма, на основе гипотезы о законе движения толкателя восстановлен исходный профиль кулачка в виде контура и развертки. В примере показана возможность использования любительской цифровой фотоаппаратуры для бесконтактного обмера элементов механических устройств. Предложена методика быстрого и точного руч-

ного определения фактического масштаба фотоизображения с компенсацией ошибок по внешнему эталону длины.

В [примере 3.2](#) описан процесс восстановления кинематики механизма вытяжки штамповочного прессы по результатам цифровой видеосъемки. Съемка проведена в производственных условиях на широко распространенном видеооборудовании общего назначения. При обработке результатов учтены и скомпенсированы ошибки, обусловленные сложными условиями съемок. Единственным достоверно известным параметром был ход ползуна прессы. В примере показана возможность применения видеосъемки для оценки состояния объектов промышленной механики.

[Пример 3.3](#) посвящен анализу кинематики передней ноги лошади при выполнении аллюра «шаг» по данным цифровой стробоскопической фотосъемки. Этот метод позволяет быстро получать в большом объеме данные о траекториях и скоростях точек и звеньев исследуемого объекта, при минимальном использовании специального оборудования. По полученным данным сделаны выводы об автоматизме походки, алгоритмах управления, реализуемых живой системой.

### **Пример 3.1 Определение размеров плоской детали по результатам цифровой фотосъемки**

Данный пример посвящен ручной реализации одного из методов бесконтактного измерения – определению геометрии плоской детали по ее цифровому фотоизображению. Этот метод широко применяется в различных системах распознавания образов, а также при решении задач диагностики деталей, которые, по причине габаритов или невозможности остановки технологического процесса недоступны для прямого обмера. Объектом исследования в данном примере является кулачок гибочного пресс-автомата – относительно высоконагруженной детали, требующей сохранения заданной при изготовлении геометрии с довольно высокой точностью.

В процессе проведения измерений на основе полученного фотоизображения определена геометрия кулачка и проведено ее сравнение с геометрией, заданной описанным в технической документации на пресс закону движения и выявлена степень изношенности кулачка.

#### **3.1.1 Особенности получения данных о геометрии по цифровому фотоизображению**

Цифровое фотоизображение является весьма удобным объектом для получения информации о геометрии запечатленного плоского объекта. Однако дискретная структура цифровых изображений, условия освещения и особенности оптических систем фотооборудования накладывают существенные ограничения как на процесс выполнения съемки, так и на обработку получаемых данных.

Следует иметь в виду, что разрешение цифровых фотоизображений, полученных с помощью современной техники весьма высоко, поэтому геометрия запечатленного

объекта может быть определена с довольно высокой точностью. Ограничения на этот процесс накладывают следующие факторы:

- Невозможность проводить измерения для объекта по контрастным границам, лежащим **на разном расстоянии от фокальной плоскости камеры** за счет наличия перспективных искажений, вносимых оптикой. Однако для перспективных искажений существует достаточно развитая техника математической компенсации, что делает возможным использование таких изображений для измерений при условии предварительной компьютерной обработки.
- **Наличие шумов и дефектов на изображении.** Данный фактор для фотографических изображений вносит весьма незначительную ошибку, компенсация которой выполняется тем же образом, что и для цифровых видеоизображений ([см. ниже](#)). В некоторых случаях наличие шумов усугубляется **сжатием информации** при записи фотоизображения на носитель;
- **Зависимость наблюдаемой на изображении геометрии от ориентации объекта относительно оптической оси фотокамеры.** При определенных обстоятельствах оно приводит к значительным искажениям получаемой информации. Оценка и компенсация геометрических искажений описана [ниже](#).
- **Дискретность фотоизображения** и квадратная форма пикселей ([рис. 1](#)). При измерении дискретное представление цифрового фотоизображения ограничивает точность получаемого результата. На выходных данных это отражается появлением *дробных значений масштаба в пикселях*, поддающихся уточнению лишь до определенного предела. Сама вели-

чина предельной точности результата оценивается в результате стандартной статистической обработки множественных измерений;

- **Теневой эффект**, заключающийся в наличии на наблюдаемых контрастных границах объекта - недостаточно освещенных участков. Визуально теневой эффект приводит к размыванию границы, и даже к невозможности ее четкого определения. Кроме того, отражение света от других освещенных поверхностей объекта может приводить к возникновению т.н. «воображаемых» или «фальшивых» границ объекта, отстоящих от реальных на достаточно большое расстояние (см. ниже). Компенсация вносимых таким образом ошибок возможна путем аппроксимации реальной контрастной границы объекта в зоне теневого эффекта на основе имеющихся представлений о ее возможной форме.

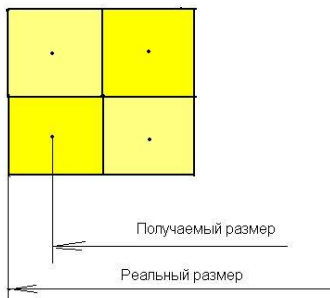


Рис. 1. Влияние дискретности цифрового изображения на процесс измерения размеров

Дополнительной проблемой при измерении геометрии объектов по цифровым фотоизображениям является **определение фактического масштаба**, так как его величина

зависит как от разрешения регистрирующего сенсора камеры и видимого размера объекта, так и от текущего фокусного расстояния оптической системы. При использовании цифровых фотокамер в составе автоматических систем распознавания образов фактический масштаб обычно приводят к заранее определенной величине изменением фокусного расстояния адаптивной оптики. В случае же ручной обработки определение фактического масштаба возможно осуществить помещением на поле кадра вместе с основным исследуемым объектом – некоторого эталонного объекта, размеры которого известны или измерены с максимально возможной точностью. При этом контрастные границы эталона на изображении крайне желательно иметь параллельными его краям. Это уменьшает погрешность, вносимую дискретностью ([см. выше](#)).

### 3.1.2 Объект исследования и постановка задачи

В качестве объекта исследований был выбран существенно изношенный кулачковый механизм гибочного пресс-автомата ([рис. 2](#)). 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, выходное (печатное) разрешение фотоизображения 240 dpi. Фотосъёмка проводилась в помещении с естественным рассеянным светом, без использования дополнительных осветительных приборов. Отклонение оптической оси камеры от перпендикуляра к плоскости кулачка сведено к минимуму путем установки камеры на штатив по угольнику. Кроме того, с целью облегчения определения фактического масштаба, на центровую шайбу кулачка была помещена стандартная концевая мера длины с основным размером 30 мм, выставленная горизонтально по уровню.



Рис. 2. Исследуемый кулачковый механизм и эталон длины

В результате обработки фотоснимка планируется получить следующие результаты:

- Конструктивный профиль кулачка в виде развертки, либо контура, восстановленный с максимально возможной точностью;
- Оценку величины возникающих ошибок;
- Закон движения толкателя.

### 3.1.3 Методика обработки экспериментальных данных

#### 3.1.3.1 Определение фактического масштаба

С целью определения фактического масштаба на фотоснимке был выделен участок, содержащий изображение эталона длины (рис. 3). Далее на увеличенном компьютерной системой до масштаба 100% (режим «пиксел к пикселу») изображении было выделено 14 строк сканиро-

вания<sup>2</sup>, на которых выделялись (по отличию цвета) контрастные границы изображения концевой меры длины.

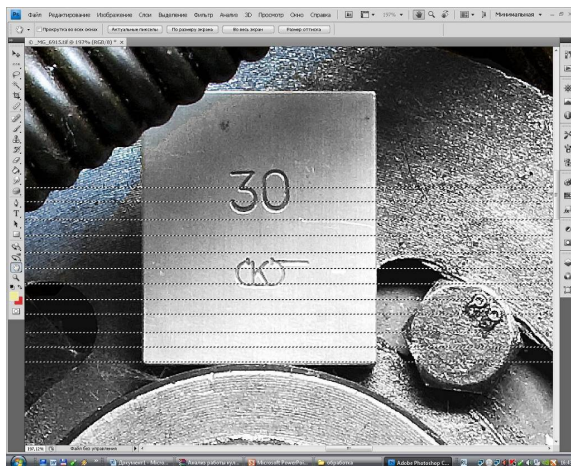


Рис. 3. Выделение строк сканирования

После осреднения полученных результатов (средняя протяженность изображения меры длины 264.054 пиксел) и статистической обработки их по стандартному алгоритму<sup>3</sup> была получена величина фактического масштаба изображения  $\mu_l = 8.80175 \pm 0.24735$  пикс/мм. Квадратная форма пиксела цифрового фотоизображения позволяет принять равными масштабы изображения по горизонтали и вертикали кадра без внесения существенной ошибки. Ширина

---

<sup>2</sup> **Строка сканирования (Scan Line)** – принятое в теории компьютерной обработки изображений название строки шириной в 1 пиксел, выделяемой в исходном изображении для определения фактического масштаба или выполнения статистической обработки цветов.

<sup>3</sup> К полученным данным можно применять любые имеющиеся в распоряжении методики осреднения и статистической обработки. В данном примере для определения доверительного интервала фактического масштаба был применен стандартный для экспериментальной физики метод с использованием коэффициентов Стьюдента.

доверительного интервала по длине в миллиметрах для обрабатываемого снимка получена равной 0.0562 мм.

### 3.1.3.2 Поиск центральной точки профиля кулачка

Описание профиля кулачка для последующего построения развертки или определения закона движения более целесообразно производить в полярной системе координат, для чего необходимо выполнить на фотоснимке (рис. 2) привязку по центральной точке.

Центровая точка профиля кулачка в данном примере была определена методом хорд. Для этого на изображении малой окружности кулачка (рис. 2) проводились три хорды любой длины, к которым восстанавливались серединные перпендикуляры. Точка их пересечения указывает на искомую центровую точку с весьма высокой точностью. Выполнить такой поиск возможно с помощью любой САПР. В данном случае нахождение центральной точки выполнялось по 12 измерениям, после чего с применением стандартного метода оценки погрешности по критерию Стьюдента была определена величина абсолютной погрешности, составившая 0.001 мм для 90% доверительной вероятности. Полученные координаты  $(X_c, Y_c)$  центральной точки в дальнейшем принимаются в качестве начала отсчета для восстановления профиля в полярной системе.

### 3.1.3.3 Восстановление конструктивного профиля кулачка

Координаты точек контрастной границы профиля кулачка определяются путем соединения их с центральной точкой, после чего по известному фактическому масштабу и расстояниям (в пикселах) от центральной точки по горизонтали и вертикали вычисляется длина радиус-вектора полярной системы из соотношения теоремы Пифагора:  $|\vec{r}| = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}$ , где  $\Delta X_i, \Delta Y_i$  - расстояния в пикселах от

выбранной точки профиля до центральной. Начало отсчета по углу  $\alpha$  в таком случае можно выбирать произвольно, от него будет зависеть лишь ориентация восстановленного профиля на рабочем поле САПР. После обсчета необходимого по требованиям точности количества точек контрастной границы получаем массив координат  $(\alpha, |\bar{r}|)$  с размерностью «пиксел». Путем умножения на этот массив ранее вычисленного фактического масштаба и с учетом доверительного интервала получаем представление реального профиля кулачка с оценкой точности в виде:

$$\|S\| = f(\alpha, |\bar{r}|) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & |\bar{r}_1| \pm \frac{\Delta_r}{2} \\ \alpha_2 & |\bar{r}_2| \pm \frac{\Delta_r}{2} \\ \dots & \dots \\ \alpha_n & |\bar{r}_n| \pm \frac{\Delta_r}{2} \end{bmatrix},$$

где  $n$  – количество точек профиля, подлежащих обсчету,  $\Delta_r$  – средняя ширина доверительного интервала по радиус-вектору. В данном примере восстановление профиля проводилось по 73 точкам, фрагмент полученного массива представлен в [табл. 1](#). Когда массив точек задан, можно предпринять попытку построения *контура конструктивного профиля кулачка* с помощью любой параметрической САПР или аналитического пакета. В данном примере для построения контура применялась параметрическая САПР общетехнического назначения Autodesk Inventor. На [рис. 4](#) представлен восстановленный профиль, наложенный на контур малой окружности кулачка. Заметные несовпадения могут быть объяснены как результат отклонения реального значения угла рабочего профиля от указанного в документации на пресс, а также износом кулачка в процессе эксплуатации.

Таблица 1. Фрагмент массива координат восстановленного профиля

№	$\alpha$ , град	$ r $ , пиксел	$ r $ , мм
1	0	721.68	81.9928±0.0769
2	5	719.78	81.7750±0.0750
3	10	714.77	81.2050±0.0750
4	15	709.66	80.6265±0.0755
5	20	705.79	80.1870±0.0750
6	25	700.75	79.6145±0.0745
7	30	700.08	79.5385±0.0745
...			
68	335	719.86	81.8180±0.1180
69	340	721.76	82.0335±0.1185
70	345	722.38	82.1040±0.1190
71	350	720.48	81.8900±0.1110
72	355	720.48	81.8900±0.1110
73	360	721.15	81.9645±0.1185

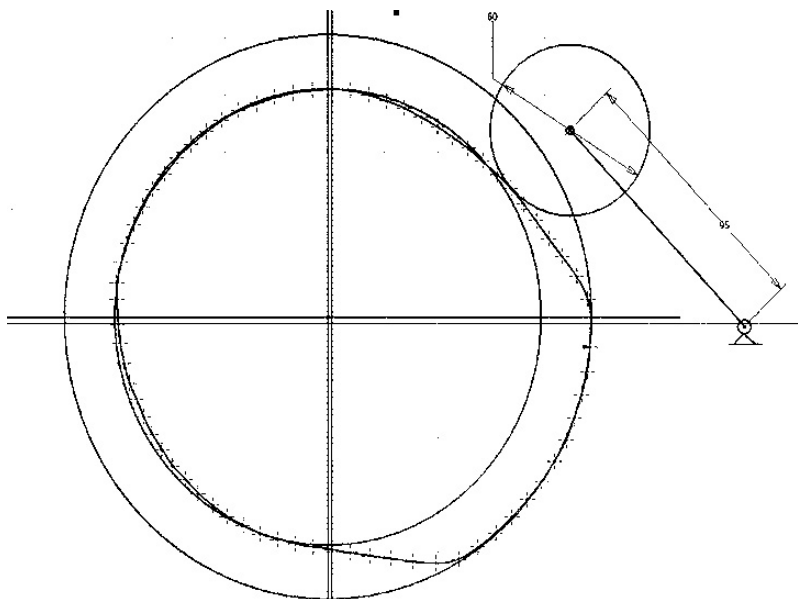


Рис. 4. Восстановленный профиль кулачка

По восстановленному профилю (рис. 4), проведя преобразование замкнутого контура в развертку, возможно получить закон перемещения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка  $S(\varphi)$ .

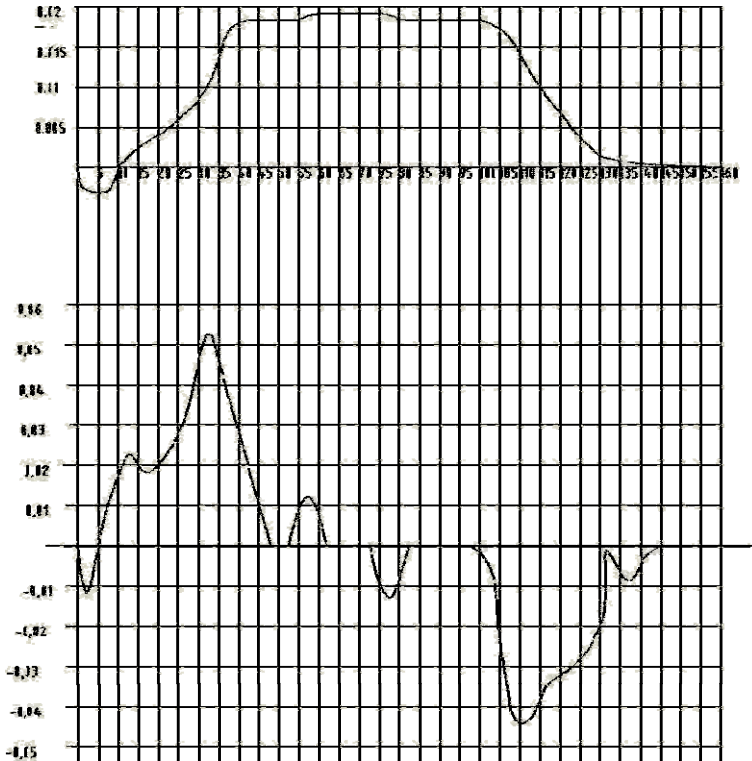


Рис. 5. Развертка кулачка и график аналога скорости толкателя  
*Вверху* – график развертки  $S(\varphi)$  профиля кулачка, *внизу* – график  $V_q(\varphi)$  аналога скорости толкателя

После того, как восстановлен профиль кулачка и его развертка получена в виде кривой  $S(\varphi)$  или массива точек в декартовых координатах  $(x, y)$  можно любым способом провести численное дифференцирование и получить зави-

симость  $V_q(\varphi)$ , представляющую собой аналог скорости толкателя кулачкового механизма. В данном примере обработка данных выполнялась процессором MATLAB, а полученные зависимости  $S(\varphi)$  и  $V_q(\varphi)$  представлены на [рис. 5](#). На графике зависимости  $V_q(\varphi)$  возможно наблюдать *искажение формы кривой аналога скорости*, обусловленное износом кулачка в процессе эксплуатации.

### 3.1.4 Анализ результатов и обработка ошибок

Полученные результаты согласно [рис. 5](#) позволяют провести *полное кинематическое исследование кулачкового механизма*, а при наличии описанного в базовой технической документации закона движения толкателя – сделать достаточно достоверные выводы о *техническом состоянии и текущем износе кулачка*. Обработка ошибок в данном примере сводится к оценке максимальной величины погрешности, вносимой геометрическими искажениями и теневым эффектом в зонах его наибольшего проявления ([рис. 2](#)).

#### 3.1.4.1 Теневой эффект

Влияние теневого эффекта на определение контрастных границ профиля кулачка представлено на [рис. 6](#). Можно различить 2-3 «фальшивых» границы с расстоянием от изображения контура в 1-2 пиксела. В местах наиболее сильного влияния теневого эффекта, где контрастная граница контура профиля кулачка практически неразличима ([рис. 2](#)) количество «фальшивых» границ может достигать до 5. Кроме того, в местах, где граница профиля имеет непрямолинейную форму, расстояние между изображениями «фальшивых» и истинных контрастных границ варьируется по полю кадра в пределах 2-6 пиксел, что тре-

бует дополнительной статистической обработки величины вносимой ошибки.

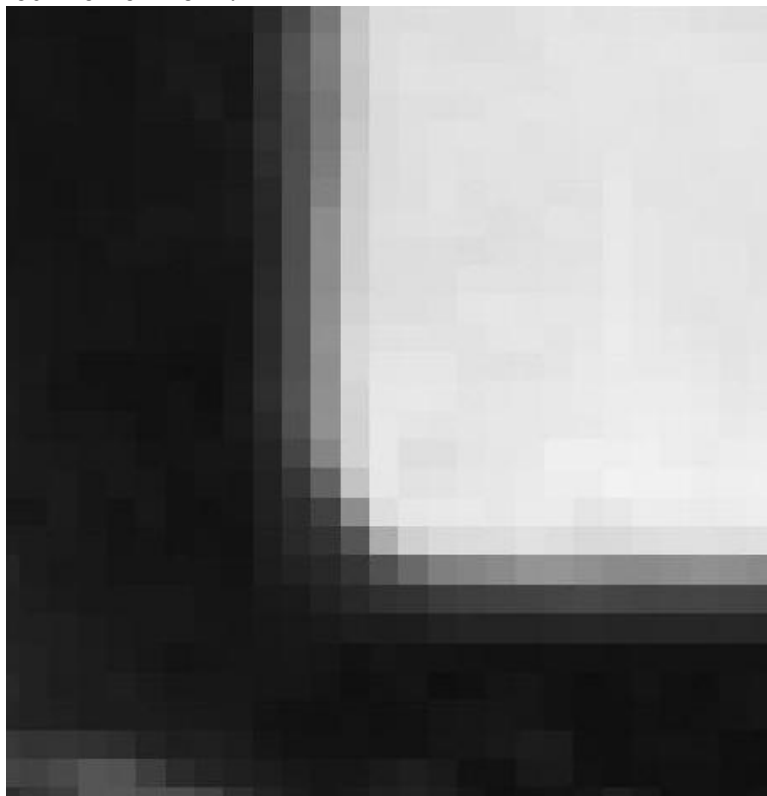


Рис. 6. Влияние теневого эффекта на определение контрастных границ профиля кулачка

Максимальное оцениваемое различие между реальным расположением контура и его видимым на фотоснимке расположением (согласно изложенному в [разделе 3.1.1](#)) составляет для данного примера **6.15 пиксел**. Это значение соответствует максимальной абсолютной погрешности определения размеров  **$0.7 \pm 0.0281$  мм**. Стоит отметить, что такая погрешность имеет место только в местах наиболее сильного влияния теневого эффекта.

### 3.1.4.2 Геометрические искажения

Как уже говорилось [выше](#), несоосность и непараллельность оси кулачка с оптической осью фотокамеры приводит к возникновению *перспективного искажения* запечатленной формы кулачка.

Расчетная схема<sup>4</sup> для оценки возникающих искажений представлена на [рис. 7](#).

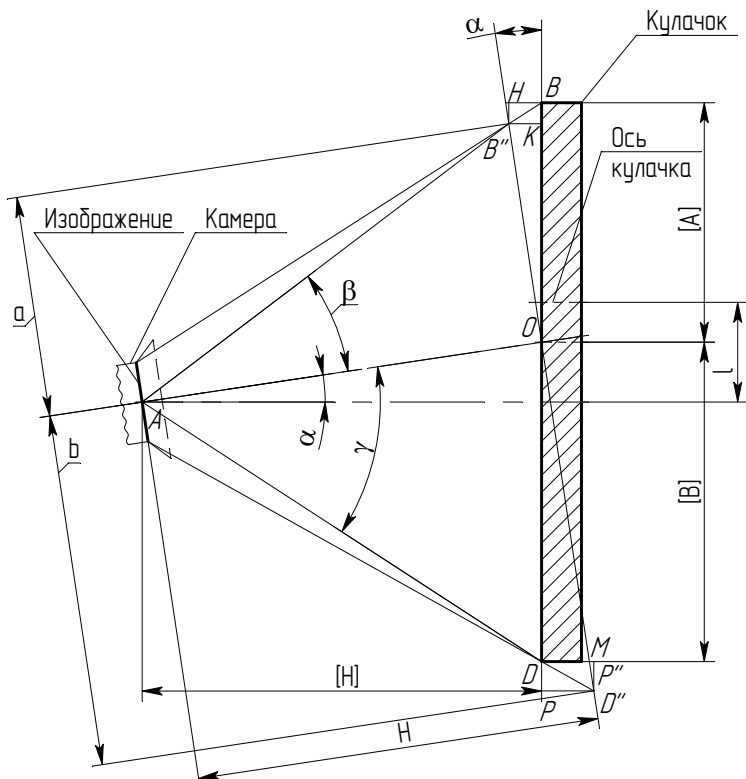


Рис. 7. Расчетная схема к оценке геометрических искажений

<sup>4</sup> Содержание данного раздела изложено по тексту работы: E. Yakushina. Place Function Definition Of The Cam Mechanism By The Digital Photography Method And Statistical Processing Of Measurements Results – Proceedings of Russian-Italian Students' Workshop "Problems in Robotics". – Kursk, KSTU, 2008.

Искажение вносится смещением  $l$  и углом  $\alpha$  отклонения оптической оси камеры от параллельности оси вращения кулачка. Здесь  $[A] + [B] = BO + OD$  - истинные размеры кулачка,  $a + b = B''O + OD''$  - наблюдаемые размеры кулачка с внесенными искажениями. В первом приближении оценка ошибки будет описываться коэффициентами  $k$  в уравнении:

$$BO + OD = k_1 \cdot B''O + k_2 OD''$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник  $OKB''$ :

$$\begin{cases} OK = B''O \cdot \cos(\alpha) \\ B''K = B''O \cdot \sin(\alpha) \end{cases}$$

Далее в треугольниках  $AOB''$  и  $AOD''$ :

$$\beta = \arctan(\angle B''AO) = \arctan(a/H)$$

$$\gamma = \arctan(\angle OAD'') = \arctan(b/H)$$

Рассмотрим зоны внесения наибольших искажений. В треугольнике  $BKB''$  имеем:

$$BK = B''K \cdot \tan(\alpha + \beta)$$

В то же время прямоугольный треугольник  $POD''$  характеризуется соотношениями:

$$\begin{cases} OP = b \cdot \cos(\alpha) \\ D''P = b \cdot \sin(\alpha) \end{cases}$$

Переходим к треугольнику  $PDD''$ :

$$DP = MP'' = D''P \cdot \tan(\gamma - \alpha) = b \cdot \sin(\alpha) \cdot \tan(\gamma - \alpha)$$

В треугольнике  $P''MD''$  имеем:

$$MD'' = \frac{DP}{\cos(\alpha)}$$

Отсюда:

$$OD = (b - MD'' \cdot \cos(\alpha)) = \left( b - \frac{DP}{\cos(\alpha)} \right) \cos(\alpha)$$

На выходе имеем:  $BK + KO + OD = \cos(\alpha) \times$

$$\times \left( B''O \cdot \sin(\alpha) \cdot \tan(\beta + \alpha) + B''O \cdot \cos(\alpha) + \left( b - \frac{DP}{\cos(\alpha)} \right) \cos(\alpha) \right),$$

что равносильно выражению:

$$BK + KO + OD = a \cdot \sin(\alpha) \cdot \tan(\beta + \alpha) + a \cdot \cos(\alpha) + \\ + (b - b \cdot \tan(\gamma - \alpha) \tan(\alpha)) \cos(\alpha)$$

Тогда:

$$B''O + OD'' = a + b =$$

$$= a(\sin(\alpha) \tan(\beta + \alpha) + \cos(\alpha)) + b \cdot \cos(\alpha)(1 - \tan(\gamma - \alpha) \tan(\alpha))$$

Искомые коэффициенты:

$$\begin{cases} k_1 = \sin(\alpha) \tan(\beta + \alpha) + \cos(\alpha) \\ k_2 = \cos(\alpha)(1 - \tan(\gamma - \alpha) \tan(\alpha)) \end{cases}$$

Оценим реальную величину внесенной ошибки: при достаточно малых (в пределах  $1-3^\circ$ )<sup>5</sup> значениях угла  $\alpha$  имеем:

$$\left. \begin{array}{l} \sin(\alpha) \sim 0.017 \\ \cos(\alpha) \sim 0.999 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} k_1 \sim 1 \\ k_2 \sim 1 \end{cases}$$

то есть геометрические искажения в данном примере можно положить несущественными.

---

<sup>5</sup> Визуально отследить перспективные искажения на поле видеоскатора фотокамеры возможно начиная с угла  $\alpha$ , составляющего  $3-5^\circ$ .

### 3.1.5 Источники

1. *A. Potapova, A. Vukolov, A. Golovin* – Peculiarities of Flat Cam Measurement by Results of Digital Photo Shooting – New Trends in Mechanism Science. Proceedings of EuCoMeS-2010 Conference. Doina Pislă et al. (editors), 2010, Springer. ISBN 978-90-481-9689-0. pp 269-276  
<http://www.springerlink.com/content/k1893006501460u1/>;
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  
<http://www.springerlink.com/content/k48420m75835n678/>;
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;

### **Пример 3.2 Восстановление закона движения механизма штамповочного прессы по данным цифровой видеосъемки**

Данный пример посвящен одной из методик анализа кинематики механизма – по видеосъемке, на кадрах которой отобразено движение его рабочих частей. Подобные методики применяются, например, при анализе отказов в сложных промышленных установках.

Процесс восстановления закона движения приведен для механизма вытяжки штамповочного прессы по результатам цифровой видеосъемки. Видео было снято со штатива во время нормального рабочего процесса, ошибки, обусловленные сложными условиями съемок – рассмотрены, должным образом обработаны и при возможности скомпенсированы. Единственный достоверно известный параметр - ход ползуна прессы.

#### **3.2.1 Особенности съема данных о движении с цифрового видеоизображения**

Прежде, чем переходить к рассмотрению примера, необходимо проанализировать ряд особенностей съема данных с цифрового или оцифрованного видеоизображения, обусловленных конструкцией регистрационного оборудования широкого применения (цифровых видеокамер), а также принятыми стандартами кодирования видеосигнала.

При использовании в качестве экспериментального оборудования видеокамер широкого применения чаще всего на выходе получается цифровой видеосигнал со следующими параметрами:

- Цветовой формат: **PAL**;

- Кодирование цвета по схеме **YUV2**<sup>6</sup> либо **RGB**<sup>7</sup>;
- Разрешение кадра: **720x576** (форматы носителей DVCAM/ВЕТАСАМ SD), **1366x720** (HDCAM 720) либо **1920x1080** (Full-HDCAM) пиксел при формате экрана **16:9** (Anamorphic) или **4:3** (Non-Anamorphic);
- Схема передачи кадра (развертка): **чересстрочная**<sup>8</sup> (Interlaced), либо **прогрессивная** (Progressive);
- Выдержка съемки единичного кадра: 1/25 – 1/200 сек, при общей частоте кадров 25 кадр/сек;
- Методика сжатия видеопотока: **DVSD**, **MPEG2** (для видеокамер на ленточных носителях), либо **MPEG4** (release H.263), **AVC** (release H.264 Embedded) для камер на твердотельных цифровых носителях.

Параметры цветовой схемы и формата практически не оказывают влияния на процедуры съема данных о движении. То же можно сказать и о методике сжатия видеопотока (при условии, что сжатие не осуществляется портативными устройствами с низкокачественной схемотехникой, например, мобильными коммутаторами). Ниже детально рассматривается влияние отдельных параметров

---

<sup>6</sup> **YUV** – схема цветового кодирования, где цвет элемента изображения представляется в виде сочетания его яркости (Y) и двух различных параметров цветности (U, V). Схема применяется в устаревших телевизионных системах. При обработке видеосигнала в компьютерных системах автоматически приводится к **RGB**.

<sup>7</sup> **RGB** – схема цветового кодирования, где информация о цвете представляется в виде сочетания трех основных цветов: красного (Red), зеленого (Green), синего (Blue).

<sup>8</sup> **Чересстрочная (Interlaced) развертка** – схема передачи кадра, при которой полный кадр разделяется на два полукадра (поля), содержащих соответственно четные и нечетные строки, причем передача полей идет по отдельным каналам, либо в паре смежных кадров передается только *по одному полю* из каждого кадра. **Прогрессивная** развертка такими особенностями не обладает.

оцифрованного видеосигнала на результаты измерения кинематических характеристик и методики компенсации возникающих ошибок.

### 3.2.1.1 Разрешение кадра и формат экрана

Особенности телевизионных стандартов кодирования видеосигнала приводят к тому, что пиксели телевизионного изображения имеют не квадратную, а прямоугольную форму, причем степень сжатия по вертикали зависит от формата экрана. При обработке видеосигнала компьютерными системами, использующими квадратные пиксели, размеры объектов, запечатленных на видео, подвергаются искажению по вертикали (рис. 1).



Рис. 1. Искажение размеров по вертикали при использовании квадратного и неквадратного пикселей.

Разрешение кадра 720x576 пиксел, формат экрана 16:9 (PAL Anamorphic), *слева* – представление изображения в компьютерной системе без дополнительной обработки, *справа* – на телевизионном экране.

Относительная величина *геометрических* искажений может достигать 20% при использовании видеосигнала для измерения кинематических характеристик без предварительной обработки. Компенсация вносимой данным фактором ошибки может быть достигнута пересчетом размеров изображения в процессе предварительной обработки. Параметры пересчета зависят от технических характери-

стик применяемой аппаратуры<sup>9</sup>. Однако следует помнить, что при корректной статистической обработке данных форма пиксела не оказывает почти никакого влияния на результаты измерения по видеопотоку *скоростных* характеристик движущегося объекта.

### 3.2.1.2 Чересстрочная развертка

Чересстрочная развертка – фактор, который отличается трудностью компенсации ошибок, вносимых в получаемые результаты. Связано это с тем, что подавляющее большинство видеорегистрирующих устройств, использующих чересстрочную развертку, фактически считывают четные и нечетные поля кадров для передачи на носитель – *в разное время*. Данное обстоятельство приводит к серьезному искажению информации о скоростях запечатленных движущихся объектов, так как при передаче видеосигнала в компьютерную систему для обработки возникает ситуация копирования полей (см. табл. 1).

Таблица 1. Копирование полей (*исходные* поля выделены **цветом**)

Видеолента/видеопоток до обработки				
Кадр	1	2	3	4
Четное поле	<b>Поле 1</b>	0	<b>Поле 3</b>	0
Нечетное поле	0	<b>Поле 2</b>	0	<b>Поле 4</b>

Видеопоток при обработке компьютерной системой				
Кадр	1	2	3	4
Полный кадр	<b>Поле 1</b>	<b>Поле 1</b>	<b>Поле 3</b>	<b>Поле 3</b>
	0	<b>Поле 2</b>	<b>Поле 2</b>	<b>Поле 4</b>

<sup>9</sup> Пересчет размеров изображения выполняется, например, алгоритмами, реализующими просмотрный вывод видеопотока с DVD или ленточного носителя на дисплеи компьютерных систем. Подобные алгоритмы также реализуют все известные программы редактирования видео, поддерживающие ввод/вывод на внешние устройства.

Как видно из табл. 1, при передаче видеопотока на обработку компьютерной системе, неизбежна ситуация, когда в каждом последующем кадре оказываются копии полей предыдущих кадров исходного потока, то есть *в одном кадре, передаваемом на обработку, присутствуют элементы изображений, снятых в разное время*. Визуально это приводит к эффекту «гребенки» (рис. 2), а при выполнении измерений – к внесению достаточно серьезной ошибки в определение скоростных характеристик запечатленного объекта.



Рис. 2. Эффект «гребенки»

Ситуация усугубляется тем, что величина вносимой ошибки сильно зависит от направления движения объекта относительно границ кадра (при движении параллельно горизонтальной оси кадра чересстрочная развертка не вносит ошибок), а также его скорости (величины смещения изображения объекта на одну пару кадров).

Компенсация чересстрочной развертки требует достаточно сложной статистической обработки видеопотока, которая зачастую выполняется с помощью специализированных программных средств, получающих доступ к кадрам до фактического начала их обработки любыми другими средствами. В данном примере в качестве средства компенсации чересстрочности выступила свободно распространяемая библиотека `TomsMoComp.dll`, выполняющаяся в связке с низкоуровневой средой обработки видеопотоков `AVISynth Frameserver`.

### 3.2.1.3 Выдержка съемки единичного кадра

Выдержка съемки кадра влияет на результаты измерений, поскольку вносит ошибки в определение скоростных характеристик запечатленного объекта. Наибольшие величины вносимой ошибки имеют место при съемке ярко освещенного объекта. Выдержка чтения кадра с сенсора устройства при этом отличается от частоты выдачи кадров на носитель (25 кадр/сек), причем момент начала выдачи очередного кадра в определенных пределах непредсказуем (неизвестно время окончания обработки и сжатия кадра во фреймбуфере устройства). Кроме того, чересстрочная развертка (см. [раздел 3.2.1.2](#)) сильно повышает величину ошибки, так как на непредсказуемость момента записи кадра на носитель накладывается разница во времени считывания четных и нечетных полей.

Компенсация ошибок, вносимых за счет выдержки съемки кадра, выполняется путем статистической обработки, а именно выделения в видеопотоке *групп кадров* относительно малой длины (3-7 кадров), внутри которых скоростные характеристики объекта *можно приближенно считать постоянными*. Выделяя такие группы, рассчитывают внутри них средние значения и доверительные интервалы измеряемых характеристик.

Значение выдержки ограничивает временное разрешение видеосъемки. В общем случае, получить достоверные значения кинематических характеристик запечатленного объекта возможно при частоте кадров выходной записи более чем  $2 \cdot f$ , где  $f$  - частота повторения исследуемого процесса или действия. На практике возможности видеокамер общего назначения еще более ограничены – достоверность получаемых данных возможно подтвердить при частоте повторения процесса не более  $\frac{1}{4} \dots \frac{1}{8}$  от частоты кадров получаемой записи.

### 3.2.2 Постановка задачи

В качестве объекта исследования выступил кривошипный штамповочный пресс, установленный в автоматической линии штамповочного цеха ЗИЛ. Непосредственно во время производственного процесса была выполнена видеозапись (ее характерный фрагмент представлен на [рис. 3](#)). Как видно на видеозаписи, наблюдать напрямую возможно только одно механическое движение пресса – движение выходной диады второй модификации (шатун-



Рис. 3. Видеозапись работы пресса

ползун). Длина хода ползуна известна из технической документации на пресс. Определению в данном примере подлежат:

- Цикловые и скоростные диаграммы движения ползуна и шатуна;
- Форма шатунной кривой прессы.

Эти данные в дальнейшем возможно будет применить для приближенного синтеза класса рычажных механизмов, реализующих кинематику, сходную с кинематикой исследуемого механизма прессы.

### 3.2.3 Методика обработки экспериментальных данных

Перед началом обработки следует проанализировать особенности исходной видеозаписи с тем, чтобы выделить неучтенные ранее факторы, вносящие ошибки в измерение кинематических характеристик. В данном случае видеозапись ([рис. 3](#)) отличается следующими особенностями:

- На выходе камеры видеопоток DVSD 4:3 PAL, чересстрочная развертка, со сжатием без потерь, разрешением 720x576 пиксел;
- Общий контраст изображения очень мал из-за плохих условий освещения рабочей зоны прессы. В связи с этим иногда даже визуально трудно локализовать границы движущихся объектов, что делает видеозапись непригодной для автоматизированной обработки средствами распознавания движения и образов;
- Малая освещенность вынуждает систему предварительной обработки изображения видеокамеры искусственно повышать яркость (поднимать коэффициент усиления), что приводит к значительному

усилению шумов (вплоть до зрительно распознаваемого точечного шума);

- При выполнении штамповки из-за больших усилий станина прессы проявляет податливость, что приводит к ощутимому смещению точки съемки, заметному по краям изображения. Данная ситуация требует внесения корректив в процесс измерения (автоматической или ручной компенсации смещения точки съемки).

*Первым шагом* обработки полученных данных является выделение в видеопотоке (обработанном средствами устранения чересстрочности) групп кадров, внутри которых значения кинематических характеристик движения ползуна и шатуна прессы можно принять постоянными (см. [раздел 3.2.1.3](#)). На [рис. 4](#) представлена одна из выделенных групп. Для ручной обработки предпочтительным методом будет выделение кадров в виде последовательностей отдельных изображений.



Рис. 4. Группа кадров, выделенная для обработки

Фактическая длина выделяемой последовательности зависит от требуемой точности и скорости движения ползуна на данном участке траектории. Длина последовательности по [рис. 4](#) составляет 5 кадров, другие последовательности в исследуемой видеозаписи выделялись с длиной от 3 до 10 кадров.

В каждой полученной последовательности кадров следует определить линейные и угловые смещения контуров, для чего на каждом кадре выделяют легко отслеживаемые *характерные точки* ([рис. 5](#)). В ряде случаев для

повышения контрастности изображения и облегчения визуального отслеживания движения – изображение преобразуется к представлению в градациях серого.

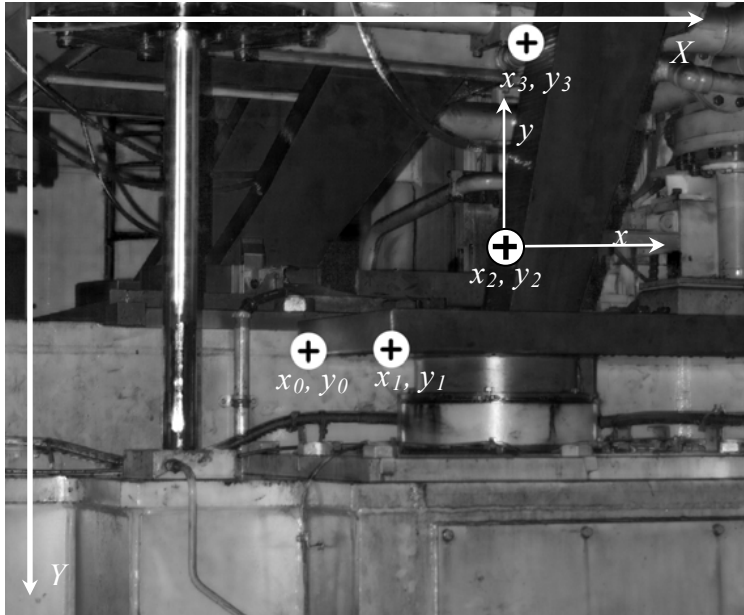


Рис. 5. Пример выделения характерных точек с выбором локальной системы координат на единичном кадре последовательности

Переходя от кадра к кадру внутри последовательности, отслеживают смещения характерных точек в пикселах, получая массивы положений:

$$\begin{cases} \overline{X}_j = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) \\ \overline{Y}_j = (Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_n) \end{cases}$$

где  $j$  - номер выбранной характерной точки,  $i$  - номер кадра в последовательности,  $n$  - длина последовательно-

сти в кадрах,  $X, Y$  - координаты характерных точек внутри кадра.

По набору положений точек в последовательности далее можно вычислить смещения характерных точек в координатах  $(X, Y)$ :

$$\begin{cases} \Delta X_i = X_{i+1} - X_i \\ \Delta Y_i = Y_{i+1} - Y_i \end{cases}$$

Осреднив<sup>10</sup> полученные данные по всей последовательности, получим значения смещений  $\overline{\Delta X}, \overline{\Delta Y}$ . Сравнивая эти значения в смежных последовательностях кадров, можно получить данные по скоростям, линейным и угловым смещениям видимых звеньев механизма.

Примечание. Поведение величин  $\Delta X_i, \Delta Y_i$  можно рассматривать как критерий для проверки правильности выбора *длины последовательности*, а именно: значения величин внутри последовательности должны быть *близки к постоянству*. Наличие *монотонного* возрастания или убывания этих величин внутри одной последовательности указывает на *недостоверность* полученного результата и необходимость **уменьшить длину** данной последовательности.

По полученным данным можно построить траектории движения характерных точек *в размерностях кадра*  $[X, Y]_j = f(i)$ , где номер кадра  $i$  играет роль дискретных значений времени, а также построить годографы векторных аналогов скоростей (так как направление смещения

<sup>10</sup> Осреднение данных о смещении характерных точек может выполняться с применением любых средств обработки массивов чисел (в данном примере использован процессор MathCAD), как с определением промежуточных доверительных интервалов, так и без такового.

каждой характерной точки внутри последовательности известно).

*Второй шаг* обработки заключается в определении *геометрического масштаба* изображения и оценке точности этого определения. Обычно масштаб изображения определяют, используя заранее измеренные с большой точностью размеры отдельных объектов, запечатленных на поле кадра:

$$\mu_l = \frac{l_{\text{граф}}}{l_r} = [\text{пикс}/\text{м}]$$

где  $l_{\text{граф}}$  - размер объекта на поле кадра, выраженный в пикселах,  $l_r$  - реальный измеренный размер объекта

Однако следует иметь в виду, что, учитывая изложенное в [разделе 3.2.1.1](#), масштабы изображения по горизонтальной и вертикальной осям могут отличаться (обычно не более чем на 2-4%). В таком случае следует выполнять расчеты, отдельно рассчитывая смещения, размеры и т.п. по каждой координатной оси.

В данном примере для определения геометрического масштаба изображения использована известная длина хода ползуна пресса.

Определение *временного масштаба* видеозаписи не представляет никаких трудностей, так как при известной частоте кадров исходной видеозаписи 25 кадр/сек можно принять  $\mu_t = 0.04$  сек/кадр, учитывая изложенное в [разделе 3.2.1.3](#). Зная временной масштаб, можно вычислить длину каждой последовательности кадров  $\tau_{\text{полз}}$  в секундах, а также полную продолжительность рабочего цикла исследуемой машины, если она была неизвестна.

Результатом выполнения описанных шагов является зависимость перемещения ползуна от времени, представленная в виде массива  $[S_1, S_2, \dots, S_n] = S(t_1, t_2, \dots, t_n)$ , а так-

же график зависимости скорости ползуна от времени, построенный по значениям  $v(t) = S_{\text{посл}} / \tau_{\text{посл}}$ , без учета доверительного интервала (рис. 6).

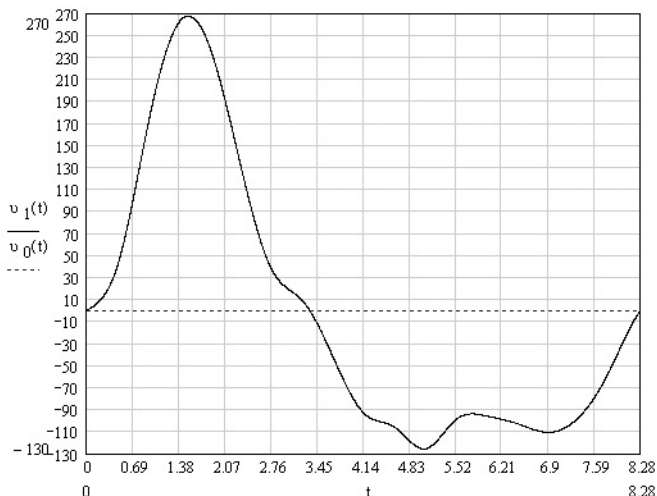


Рис. 6. Зависимость скорости ползуна от времени

Согласно рис. 5, характерные точки, выбранные для отслеживания, позволяют определить не только перемещения и скорости ползуна на различных участках траектории, но и углы отклонения шатуна  $\alpha_i(t_i)$  от горизонтальной оси кадра, так как при работе в обычной декартовой системе  $tg(\alpha_i) = |y_3 - y_2| / |x_3 - x_2|$ . Полученная экспериментальная зависимость угла отклонения шатуна от времени была дополнительно подвергнута численной аппроксимации<sup>11</sup> кубическим полиномом. Вторая, более гладкая полу-

<sup>11</sup> К получаемым кривым можно применять любые численные методы аппроксимации с целью облегчения дальнейших вычислений. В данном примере численная аппроксимация реализована средствами процессора MathCAD.

ченная кривая фактически является угловой функцией положения для шатуна пресса (рис. 5). Оба графика представлены на рис. 7.

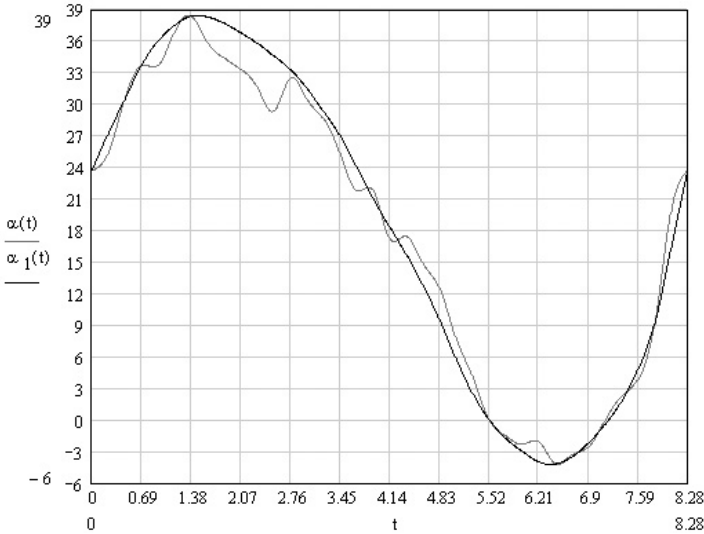


Рис. 7. Зависимость углового перемещения шатуна от времени

Третий шаг обработки включает определение траекторий и законов движения невидимых частей механизма (в данном случае невидим шарнир, которым шатун соединяется с остальным механизмом внутри корпуса пресса). Приняв началом отсчета точку с координатами  $(x_2, y_2)$  по рис. 5, имеем:

$$\left. \begin{aligned} x &= l \cdot \sin(\alpha); y = l \cdot \cos(\alpha) \\ \alpha &= \alpha(t); v(S) = \left\{ \begin{array}{l} S(t); t(S) = \int_s \frac{dS}{v(S)} \end{array} \right\} \end{aligned} \right\}$$

Здесь  $l$  – длина шатуна, определяемая приближенно внутри доверительного интервала по известному геометрическому масштабу изображения  $\mu$ , и длине наблюдаемой части ша-

туна на видеозаписи ([рис. 3](#));  $(x, y)$  - координаты невидимого шарнира в выбранной системе координат. Тогда область существования шатунной кривой определится в виде:

$$\oint_S \frac{dS}{\bar{v}(S)} = t(S) = \oint_S \frac{dS}{\underline{v}(S)},$$

где  $\bar{v}(S)$  и  $\underline{v}(S)$  - границы доверительного интервала определения скорости крайней видимой точки шатуна по видеозаписи<sup>12</sup>.

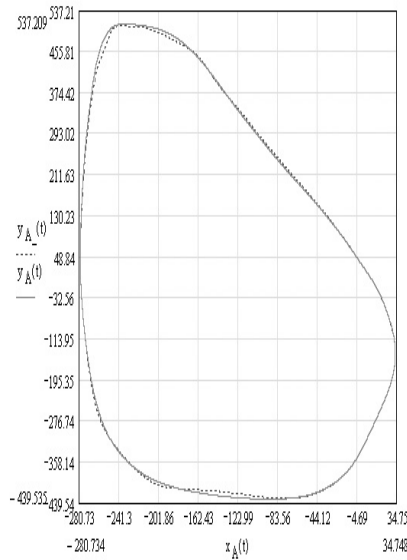


Рис. 8. Шатунная кривая

<sup>12</sup> Вместо определения границ доверительного интервала, в тех случаях, когда статистическая обработка данных представляет трудность, можно приближенно принять длину шатуна по изображению с учетом известного фактического масштаба, а идеализированную шатунную кривую получить повторным расчетом, подставляя в качестве подынтегральной идеализированную функцию  $\alpha(t)$  ([рис. 7](#)).

Проведя любым способом численное интегрирование по всем полученным массивам точек  $v(t)$ ,  $v(S)$ ,  $\alpha(t)$ , получим график шатунной кривой (рис. 8).

На полученном графике выведены две кривые: *сплошной линией* обозначен идеализированный график, полученный интегрированием идеализированной кривой  $\alpha(t)$ . *Штриховая линия* отображает шатунную кривую, полученную интегрированием «сырых» данных, полученных из последовательностей кадров видеозаписи.

Полученная шатунная кривая допускает переход к определению возможной схемы механизма, однако это определение выходит за рамки рассматриваемого примера.

### 3.2.4 Анализ результатов и обработка ошибок

Оценка возникших в процессе измерения ошибок в данном примере сводится к определению погрешностей, вносимых в получаемые данные следующими факторами:

- Чересстрочностью исходного видеопотока;
- Малой контрастностью и шумом на изображении;
- Податливостью станины прессы.

Чересстрочная развертка исходного видеопотока приводит при устранении к размыванию границ движущихся объектов. Оценка вносимой ею погрешности сводится к определению относительной величины этого размывания по сравнению с наблюдаемым поперечником объекта. Оценить эту величину нетрудно визуально для любой последовательности кадров (рис. 4). В данном случае из-за относительно малой скорости движения ползуна и шатуна вносимая погрешность не превышает 1%, прослеживается только по вертикальной оси кадра  $Y$  и достигает максимума при увеличении скорости ползуна в середине рабочего цикла. Шумы видеоизображения также приводят к размыванию видимых границ объектов, однако вносимая ими

погрешность поддается довольно точной оценке. Производится оценка погрешности таким образом:

- На одном или нескольких кадрах видеозаписи выделяется участок размерами не менее 16x16 пиксел (стандартный для алгоритмов предварительной обработки размер сжимаемого фрагмента кадра). На нем визуально выделяются фрагменты, характеризующие шум (неравномерности), оценивается их средний размер;
- После осреднения по 2-5 выделенным в разных (светлых и темных) областях кадра фрагментам можно получить средний размер шумового искажения в пикселах. Это значение фактически будет характеризовать *предельную* величину вносимой погрешности при выделении *практически неразличимой* границы объекта;
- После вычисления предельной оценки следует оценить контрастность границ отслеживаемых объектов в районе выбранных характерных точек ([рис. 5](#)), после чего сравнить контрастности шумовых искажений и границ объектов. Исходя из этого сравнения, можно дать оценку погрешности, вносимой шумом. Для данного примера оцениваемая средняя величина шумового искажения составила 3.7 пиксела на сжимаемый фрагмент кадра, что соответствует **2.5%** ошибки определения геометрических параметров.

Наиболее значимую ошибку в определении геометрических параметров в данном примере вносит смещение точки съемки за счет податливости станины пресса. Как можно видеть из [рис. 6](#), зависимость скорости ползуна от времени искажается волновым процессом в районе  $t = [4...7]$ . Учитывая большое усилие штамповки, скорее всего, это искажение обусловлено прохождением волн упругой деформации

ции при нагружении и разгрузке звеньев и станины пресса. Возникающие упругие волны искажают также форму функции углового положения шатуна (рис. 7) и шатунной кривой (рис. 8).

Компенсация возникающей ошибки практически невозможна без применения дополнительного оборудования, поставляющего данные о силовом нагружении деталей пресса, так как частоты возникающих волн, по визуальным оценкам, превышают 10 Гц, что затрудняет их регистрацию. Единственная мера, которую возможно применить для минимизации погрешности в данном примере – это компенсация смещения точки съемки. Для этого следует при определении смещения каждой характерной точки на поле кадра (рис. 5) вносить поправку на изменение положения точки съемки. Оно, в свою очередь, определяется по смещению внутри последовательности статических объектов, запечатленных на поле кадра. Полная величина ошибки, вносимой податливостью, составила 5% при определении геометрии, 1% при определении скоростей. Эта величина равняется средней относительной величине искажений по шатунной кривой.

Определение суммарной погрешности измерений после расчета величин ошибок, вносимых различными факторами, может выполняться с применением любой доступной методики. В данном примере погрешность была определена как среднее геометрическое по осям  $X$  и  $Y$  (так как видеокادر представляет собой двухмерную матрицу, и ошибки не обладают свойством накопления). Таким образом, величина суммарной погрешности измерений геометрических параметров механизма по видеозаписи составила **6.3%**, погрешность определения скоростных характеристик – **2.7%**.

### 3.2.5 Источники

1. Чересстрочная развертка. Статья Wikipedia Russian  
[http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%91%D1%80%D1%82%D0%BA%D0%B0](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%91%D1%80%D1%82%D0%BA%D0%B0)
2. Деинтерлейсинг. Статья Wikipedia Russian  
<http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B3>
3. *A. Vukolov and E. Kharitonov. Kinematical Analysis of Mechanical Systems by Results of Digital Video Recording // Proceedings of the 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines, held in Brasov, Romania, october 12-15, 2009* Visa, Ion (Ed.) – Springer – 2009. ISBN 978-90-481-3521-9  
<http://www.springerlink.com/content/p121414257108836/>
4. *Головин А.А. Проектирование сложных рычажных механизмов: Учеб. пособие по курсу «Теория механизмов и машин».* – М.: Изд-во МГТУ, 1995. – 76 с., ил.

### **Пример 3.3 Кинематический анализ походки лошади методом высокоскоростной стробоскопической фотосъемки**

Этот пример рассматривает решение довольно специфической задачи – получения информации о тех кратковременных стадиях лошадиного аллюра «шаг», которые невозможно наблюдать визуально. Подобные задачи анализа кинематики достаточно часто встречаются как в биологии, так и в технике и экспериментальной физике. Стробоскопические фотоснимки в качестве исходных данных для экспериментальных исследований отличает – при надлежащем качестве выполнения съемки – чрезвычайно высокая наглядность и пригодность для качественной оценки параметров движения запечатленных объектов без какой-либо дополнительной обработки.

Снимки, приведенные в качестве иллюстраций к примеру, были получены во время обычных тренировок наездников в манеже конноспортивного участка ВВЦ и использованы для качественного описания тех стадий аллюра «шаг», которые обойдены вниманием в многочисленных существующих работах по биомеханике лошади.

#### **3.3.1 Особенности применения стробоскопической фотографии как экспериментального метода**

Стробоскопическая фотография как техника получения изображения объединяет в себе черты фото- и видеосъемки. Поскольку в качестве регистрирующего устройства применяется фотокамера, к методике съема и обработки данных о движении с полученного снимка полностью применимы принципы, изложенные в [примере 3.1](#) (см. [раздел 3.1.1](#)). Однако, в отличие от традиционной фотографии, при стробоскопической съемке происходит мно-

гократное экспонирование на один и тот же кадр множества положений одного и того же объекта. Повторность экспонирования достигается подачей кратковременных импульсов света от специального устройства импульсного фотоосвещения (ИФО), или *стробоскопа*. В качестве стробоскопа при натуральных экспериментах обычно выступает мощная фотовспышка, имеющая режим стробирования. Учитывая специфику современного оборудования для фотосъемки и генерации стробоскопического света, можно приближенно перечислить основные особенности стробоскопической фотографии как экспериментального метода:

- **Длительность импульса** стробоскопа составляет величину порядка  $10^{-4}$  сек, что позволяет выполнять (при достаточно совершенной системе синхронизации срабатывания затвора фотокамеры) отслеживание кинематики быстро движущихся объектов;
- **Чрезвычайно высокая точность выдерживания наперед заданных интервалов между импульсами.** Погрешность, вносимая схмотехникой стробоскопа, зачастую не превышает величины порядка длительности импульса, что приводит к существенному повышению точности измерений;
- **Возможность весьма точной установки и подбора длины пакета импульсов и интервалов между ними,** что позволяет произвольно выбирать длину выдержки на фотокамере и в широких пределах варьировать временное разрешение в эксперименте;
- **Частота срабатывания** современных фотографических стробоскопов может достигать **200 Гц** (и до десятков килогерц в случае применения систем класса Rapid) при длине пакета до **128 импульсов за серию** (чаще всего при экспериментальных исследованиях длина пакета устанавливается равной 4-8 импульсам).

В то же время, как и для любого метода покадрового экспонирования, для стробоскопической фотографии справедливы ограничения, изложенные в [разделе 3.2.1.3](#).

### 3.3.2 Постановка задачи

Задача качественного анализа кинематики и нагруженного состояния передней ноги лошади на аллюре «шаг» возникла в процессе исследования управления устойчивостью в биологических системах. Существующие работы, в частности циклограммы аллюра «шаг» ([рис. 1](#)), построенные на основе [фотосерий Э. Майбриджа](#) российским биомехаником В.Б. Сухановым – не давали должного представления о траекториях движения и нагружении отдельных частей ноги между стадиями постановки копыт.

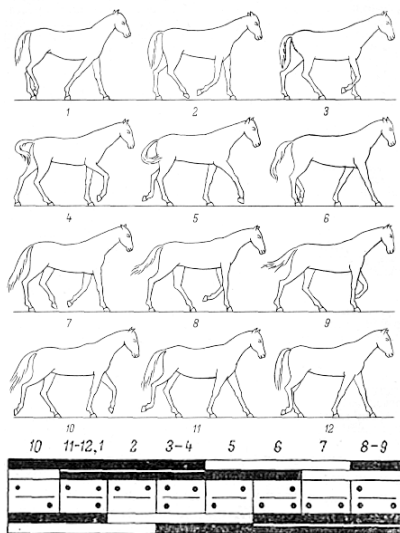


Рис. 1. Циклограмма аллюра «шаг» (по В.Б. Суханову)

*Цифры отражают индекс положения на рисунках, черные полосы и точки в таблице соответствуют периодам постановки ног на опорную поверхность. Наружные от горизонтальной оси полосы соответствуют задним ногам, внутренние – передним.*

Задачи экспериментального исследования в данном примере можно сформулировать следующим образом:

- Получить стробоскопические снимки движения ног лошади на аллюре «шаг»;
- Провести качественный анализ траектории движения отдельных суставов и частей ног;
- Рассмотреть движение ног в привязке к автоматизму походки, обратной связи с рельефом опорной поверхности.

### 3.3.3 Планирование и проведение эксперимента

Съемка производилась в крытом тренировочном манеже конноспортивного участка ВВЦ в середине одного из тренировочных пробегов, после предварительной разминки в течение 5-7 мин, что позволяло добиться высокой воспроизводимости походки. Беговая дорожка имела гаревое покрытие с высотой неровностей, соразмерной высоте копыта. В качестве основного регистрирующего устройства применялась фотокамера Canon EOS 400D, оснащенная оптической системой переменного фокусного расстояния 18-50 мм, с углом охвата до 150°. Стробирование обеспечивала фотовспышка Sigma EF-530DGS с эффективной длительностью импульса  $2 \cdot 10^{-4}$  сек, частотой срабатывания до 100 Гц и длиной пакета до 64 импульсов. *Фактическая длина пакета составляла 4-6 импульсов на кадр, частота срабатывания – 30 Гц.* Камера была размещена на расстоянии 0.4 – 0.7 м от края беговой дорожки манежа, на прямолинейном участке. Положение оптической оси устанавливалось параллельно опорной поверхности, перпендикулярно траектории следования лошади. Для облегчения анализа траекторий по снимкам на передних ногах лошади были помещены предохранительные щитки светло-серого цвета. Вспышка устанавливалась непосред-

венно на корпусе фотокамеры и излучала направленный пучок света с угловой апертурой по горизонтали 25 - 100°, по вертикали 10 - 45°. Выдержка экспозиции кадра на фотокамере привязывалась к суммарной длине пакета импульсов. Синхронизация начала экспозиции – ручная. По причине сильной загрязненности дорожки съемка производилась без применения светопоглощающего фона, а на передних ногах лошадей были размещены светоотражающие щитки.

### 3.3.4 Предварительная обработка фотоснимков

По окончании фотосъемки из полученных серий были выделены фотоснимки, соответствующие положениям передних ног лошади, представляющим особый интерес в контексте управления устойчивостью. По [рис. 1](#) это соответствует позициям 10-12. На выделенных фотоснимках (см. [рис. 2](#), [рис. 3](#)), для облегчения анализа кинематики и нагружения, прорисованы траектории движения суставов ноги и на [рис. 3](#) – корпуса лошади.

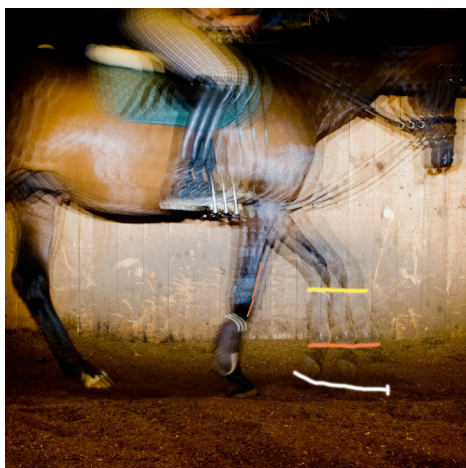


Рис. 2. Стробоскопический фотоснимок поз. 10-11 по [рис. 1](#)



Рис. 3. Стробоскопический фотоснимок поз. 11-12 по [рис. 1](#)

### 3.3.5 Качественный анализ кинематики и нагружения ног

Как можно отчетливо видеть на снимке ([рис. 2](#)), траектории движения плечевого (локтевого) и коленного сустава передней ноги при подходе к опоре – *практически прямолинейны*. Как свидетельствует опыт, это является отличительной особенностью аллюра «шаг» и не реализуется на более скоростных аллюрах. Одновременно мускулами ноги придается сложное движение копыту, так, что траектория движения конца копыта имеет форму кривой с радиусом кривизны, монотонно увеличивающимся по мере

приближения к поверхности земли. Такое движение обеспечивает плавное касание копытом опорной поверхности при подходе к точке постановки. Уменьшение относительной скорости копыта при подходе к земле – уменьшает удар при касании и подготовить ногу к переводу в положение приема нагрузки. Этому же способствует расположение суставов и форма костей, создающие при нарастании нагрузки на ногу дополнительный крутящий момент на путовом суставе ([рис. 2](#)). Наличие дополнительного момента дает надежное *силовое «закрывание» локтевого сустава* в положении полного вытяжения ноги ([рис. 3](#)).

Дополнительно, если проанализировать траекторию движения суставов копыта на [рис. 3](#), можно выявить, что оно при переносе нагрузки в процессе выполнения шага с одной ноги на другую работает как *упругий элемент* с достаточно большим ходом. Такая работа копыта характерна в гораздо большей степени для передних ног лошади, чем для задних. Она обеспечивает гашение динамических нагрузок, а также тактильную обратную связь нервной системы животного с опорной поверхностью.

Так как частоту выдачи импульсов стробоскопом в процессе съемки можно принять строго постоянной, то, измеряя и сравнивая между собой смещения объектов на одном снимке, можно судить о возрастании или убывании скорости их движения<sup>13</sup>. На основании этих данных и [рис. 1](#) была построена качественная цикловая диаграмма относительных скоростей копыта и путового сустава. За базовую систему отсчета при этом была принята система, свя-

---

<sup>13</sup> Данный пример предполагает отсутствие автоматизированной обработки фотоснимков и чисто качественный анализ кинематики, так что здесь можно обойтись без определения масштаба изображения. В случае же, если такая необходимость возникла, фактический геометрический масштаб изображения легко определить, пользуясь методикой, аналогичной описанной в [разделе 3.1.3.1](#).

занная с корпусом лошади. Для повышения наглядности представления полученная диаграмма (рис. 4) была связана с фрагментом стробоскопического фотоснимка, на котором прорисована структура кинематической цепи ноги в запечатленных положениях. Из показанного на рис. 4 можно видеть, что работа копыта в данных положениях не представлена на рис. 1.

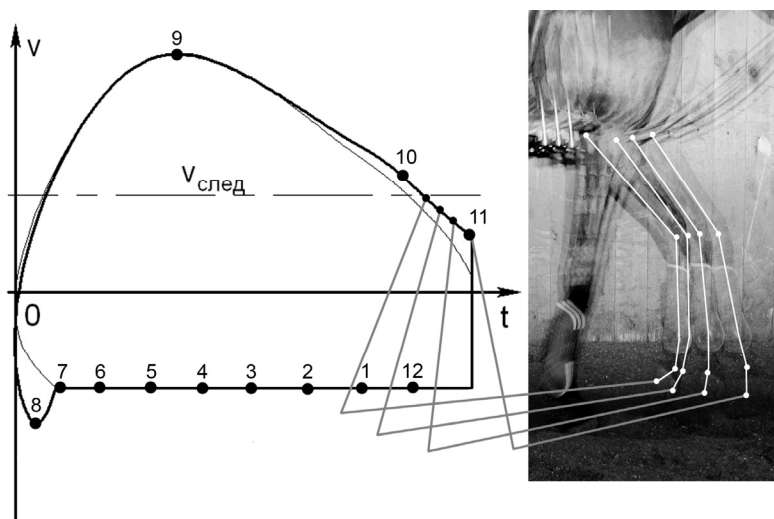


Рис. 4. Цикловая диаграмма относительной скорости копыта и путового сустава

Цифры соответствуют нумерации фаз шагового цикла по рис. 1.

$V_{след}$  – скорость следования по основной траектории.

Тонкой линией прорисована диаграмма скорости центра путового сустава относительно корпуса лошади.

### 3.3.6 Некоторые выводы

На рис. 4 дополнительно прорисована диаграмма скорости центра путового сустава относительно корпуса лошади. Как можно видеть из ее участка, соответствующего пронумерованному на рис. 1 фазами 10-11 – эта ско-

рость при подходе копыта к опорной поверхности – *близка к нулю*, что соответствует *приближению абсолютной скорости путового сустава к скорости следования*. Такое соотношение скоростей существенно уменьшает динамические нагрузки в путовом и локтевом суставах. Кроме того, наблюдаемая работа копыта позволяет сделать вывод о том, при выполнении переноса нагрузки передняя нога, не находящаяся в контакте с опорной поверхностью – работает в качестве *порогового датчика*, обеспечивая в момент касания быстрый переход в положение, позволяющее принять массу тела без значительного напряжения мускулатуры (полное вытяжение ноги с установкой путового сустава в положение  $180^{\circ+3}$ ). Это положение обеспечивает фактическое изменение структуры ноги с *исключением кинематической пары в районе путового сустава*. Таким образом, происходит плавный (с демпфированием) перенос нагрузки от силы тяжести тела на следующую переднюю опорную ногу, *находящуюся в уже подготовленном состоянии*, что позволяет избежать ударов при повторении шагового цикла. Продолжительность же самого процесса переноса, согласно [рис. 4](#), довольно велика и может составлять до  $1/6$  полного времени цикла.

### 3.3.7 Источники

1. *Суханов В.Б.* Общая система симметричной локомоции наземных позвоночных и особенности передвижения низших тетрапод. Л., изд-во «Наука», Ленинградское отд., 1986.
2. *Брем А. Э.* Жизнь животных, т. I. Млекопитающие. М., 1939.
3. *Lothar Seyfert.* Praktisches Reiten, - Neumann Verlag, Westberlin, 1968.
4. *Hildebrand M.* Motions of the running cheetah and horse. J. Mammal, 1959, №40, 4: 481—495.
5. *Защюрский В.М., Аруин А.С., Селуянов В.Н.* Биомеханика двигательного аппарата человека. М.: Физкультура и спорт, 1981.
6. *Касьяненко В. Г.* Аппарат движения и опоры лошади (функциональный анализ). Киев, 1947.
7. *Vukolov A., Golovin A., Umnov N.* Horse Gait Exploration on “Step” Allure by Results of High Speed Strobe-light Photography – New Trends in Mechanism Science. Proceedings of EuCoMeS-2010 Conference. Doina Pislă et al. (editors), 2010, Springer. ISBN 978-90-481-9689-0. pp 361-368  
<http://www.springerlink.com/content/nl50h66261m52133/>.