



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 40 за 2014 г.](#)



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

[Соколов С. М.](#), [Сазонов В. В.](#),
[Богуславский А. А.](#),
[Трифонов О. В.](#)

Стенд для испытания
акселерометров

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Стенд для испытания акселерометров / С.М.Соколов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 40. 22 с.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-40>

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
им. М.В. Келдыша**

**С.М. Соколов, В.В. Сазонов
А.А. Богуславский, О.В. Трифонов**

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Москва – 2014

Аннотация

Построена математическая модель стенда натуральных динамических испытаний систем акселерометров. Стенд имеет подвижную платформу с одной степенью свободы. Платформа может вращаться вокруг неподвижной оси, направление которой в пространстве устанавливается вертикально. К платформе жестко крепятся тестируемые блоки акселерометров, и ей придается варьируемое в широких пределах вращение. Фактическое изменение угла поворота платформы реконструируется а posteriori по видеоизображению, получаемому с помощью системы технического зрения. Реконструкция выполняется в цифровом виде, что позволяет рассчитать реальные ускорения, испытываемые акселерометрами. Рассчитанные ускорения сравниваются с цифровыми данными измерений. По результатам сравнения выполняются тестирование и калибровка чувствительных элементов акселерометров, электронных блоков и т.п.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-01-00967, 11-08-01045, 12-08-12030-офи-м-2012.

Ключевые слова: стенд испытания акселерометров, система технического зрения, обработка данных измерений, реконструкция движения по видеоизображению, определение параметров системы акселерометров.

S.M.Sokolov, A.A.Boguslavsky, O.V.Trifonov, V.V.Sazonov. Testbed for accelerometer trials. We developed the mathematical model of the dynamical testbed assigned for testing accelerometer assemblies. The testbed had a movable platform with one degree of freedom. It can rotate about the axis fixed in a prescribed direction. Tested accelerometer assemblies are placed in the platform that rotates in arbitrary way. Its real motion is reconstructed a posteriori by measurements of vision system. The reconstruction is carried out in digital form and allows to calculate real accelerations felt by the assemblies. The calculated accelerations are compared with measured ones. The comparison results are used in testing and calibration of sensors, electronic units, etc.

The work has been performed with the financial support of grants RFFI No. 11-01-00967, 11-08-01045, 12-08-12030-офи-м-2012.

Keywords: Testbed for accelerometer, computer vision system, measurements processing, estimating motion by video, estimation parameters of the accelerometers system.

1. Введение

При решении навигационной задачи наземными транспортными средствами с повышенной степенью автономности (в идеале – без участия человека) возникает ряд сложностей. В условиях городов это необходимость определять ориентацию транспортного средства при большом количестве остановок и наличии мест, в которых нет приёма сигнала от спутников навигационных систем. Высокая маневренность перемещений по городам делает затруднительным и применение традиционных инерциальных навигационных систем. Дополнительные ограничения накладывает стремление решать навигационные задачи дешевыми средствами. Вместе с тем, ряд обстоятельств позволяет рассмотреть новые возможности в обеспечении бортовой навигации.

Во-первых, результаты исследований автономных инерциальных навигационных систем [1, 2] показывают возможность решения задачи определения координат и ориентации объекта с помощью систем акселерометров, без использования гироскопов. В частности, для случая сферического поля тяготения Земли, с привлечением данных о знаке проекции угловой скорости объекта на какую-либо ось возможно определение координат и ориентации объекта с помощью решения системы алгебраических уравнений [2].

Во-вторых, современный уровень развития сенсорных систем и вычислительной техники позволяет использовать в составе информационных систем системы технического зрения и эффективно комплексовать разнородные сенсорные подсистемы [3 – 9]. При этом совокупная стоимость информационной системы остаётся достаточно дешевой.

В работе описывается первый этап исследований, оценивающих возможности определения координат и ориентации подвижного объекта по измерениям системы недорогих акселерометров и системы технического зрения (СТЗ). Создан лабораторный стенд для натуральных динамических испытаний акселерометров (рис. 1). Стенд имеет подвижную платформу с одной степенью свободы. Платформа может вращаться вокруг неподвижной вертикальной оси. К платформе жестко крепятся тестируемые блоки акселерометров, и ей придается варьируемое в широких пределах вращение. Движение платформы реконструируется по видеоинформации, получаемой от цифровой видеокамеры, расположенной на высоте около 2 м над подвижной платформой и снимающей движение двух цветных маркеров – красного и синего светодиодов на концах платформы.

Построена математическая модель такого стенда, которая позволяет реконструировать движение платформы и рассчитать реальные ускорения, испытываемые акселерометрами. Рассчитанные ускорения сравниваются с данными измерений акселерометров. По результатам сравнения выполняются тестирова-

ние и калибровка чувствительных элементов акселерометров, электронных блоков и т. п. Ниже приводится описание математической модели стенда и методики обработки полученных на нем измерений, приведены примеры тестирования акселерометров.

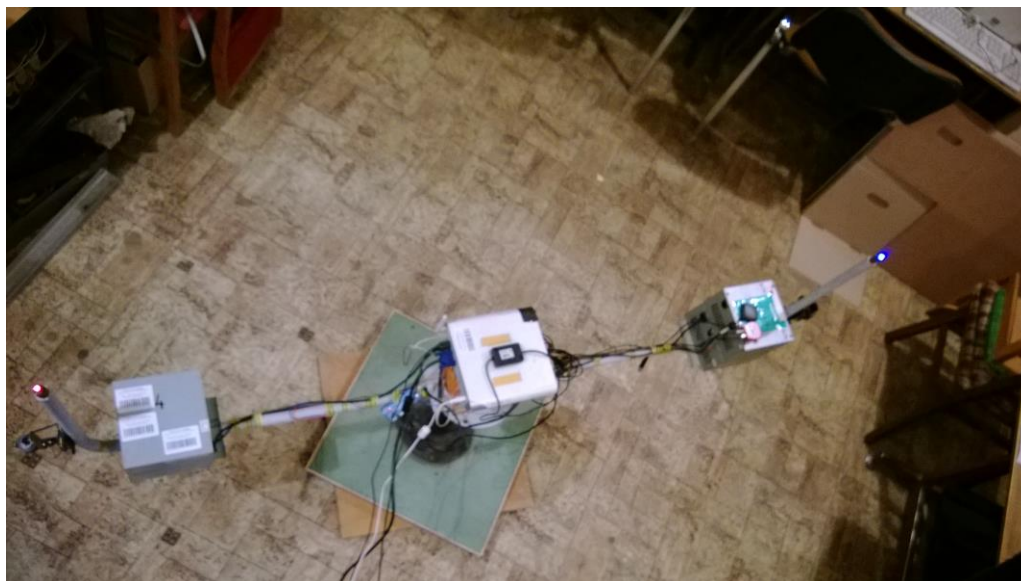


Рис. 1. Стенд натуральных динамических испытаний систем акселерометров; поле зрения СТЗ, наблюдающей движение стенда.

2. Обработка видеоинформации

Полагаем, что подвижная платформа стенда представляет собой твердое тело. С платформой жестко свяжем систему координат $Oxuz$. Ось Oz неподвижна и является осью вращения платформы. Ее направление по вертикали вниз реализовано настолько точно, насколько это можно обеспечить с помощью пузырькового уровня. Движение платформы реконструируется по видеоинформации, получаемой от цифровой видеокамеры; камера неподвижна и расположена на высоте около 2 м над плоскостью Oxy вблизи оси Oz . Плоскость ПЗС матрицы практически параллельна плоскости Oxy . В этой плоскости введем систему координат SXY . Точка в плоскости Oxy с координатами (x, y) изображается на плоскости SXY как точка с координатами

$$X = X_O + x \cos \varphi - y \sin \varphi, \quad Y = Y_O + x \sin \varphi + y \cos \varphi,$$

где φ – угол поворота платформы вокруг оси Oz , отсчитываемый от проекции оси SX на плоскость Oxy .

На платформе в плоскости Oxy расположены два цветных маркера – красный и синий. Длина соединяющего маркеры отрезка прямой составляет примерно 1.5 м, а середина этого отрезка находится на расстоянии нескольких сантиметров от точки O . Координаты геометрических центров тяжести изоб-

ражений этих маркеров в плоскости CXY обозначим соответственно (X_r, Y_r) и (X_b, Y_b) . Эти координаты выражаются в пикселах.

При испытаниях акселерометров платформа движется произвольным образом – на некоторых отрезках времени ее вращают вручную, в промежутках между этими отрезками она движется по инерции. Во время движения координаты изображений маркеров определяются с помощью алгоритмов слежения за малоразмерными целями [10]. Координаты выдаются в дискретные моменты времени t с переменным шагом, значения которого близки 0.08 с. В результате получается последовательность чисел

$$t_n, X_{r,n}, Y_{r,n}, X_{b,n}, Y_{b,n} \quad (n=1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

где $t_n < t_{n+1}$, $X_{r,n} \approx X_r(t_n)$, $Y_{r,n} \approx Y_r(t_n)$, $X_{b,n} \approx X_b(t_n)$, $Y_{b,n} \approx Y_b(t_n)$. Статистическая обработка данных измерений (1) позволяет реконструировать движение платформы и получить расчетные аналоги измерений расположенных на платформе акселерометров. Сравнение расчетных аналогов с соответствующими данными измерений позволяет судить о точности акселерометров.

Обработка данных измерений (1) выполняется в несколько этапов. Сначала оценивается точность этих данных. Оценка основана на том факте, что точки $(X_{r,n}, Y_{r,n})$ должны лежать на окружности радиуса R_r с центром в точке (X_O, Y_O) ; точки $(X_{b,n}, Y_{b,n})$ должны лежать на окружности с тем же центром и несколько отличным радиусом R_b . Чтобы проверить, насколько точно выполняется это условие, уравнения

$$\sqrt{(X_{r,n} - X_O)^2 + (Y_{r,n} - Y_O)^2} = R_r, \quad (2)$$

$$\sqrt{(X_{b,n} - X_O)^2 + (Y_{b,n} - Y_O)^2} = R_b \quad (n=1, 2, \dots, N)$$

решаются методом наименьших квадратов относительно X_O, Y_O, R_r, R_b . Используется метод Гаусса–Ньютона. Первым приближением служат величины

$$X_O = \frac{1}{2} \text{med}\{X_{r,n} + X_{b,n}\}, \quad Y_O = \frac{1}{2} \text{med}\{Y_{r,n} + Y_{b,n}\},$$

$$R_r = R_b = \frac{1}{2} \text{med}\left\{\sqrt{(X_{r,n} - X_{b,n})^2 + (Y_{r,n} - Y_{b,n})^2}\right\}.$$

Здесь $\text{med}\{a_n\}$ обозначает медиану множества $\{a_n\}$.

Пример движения платформы приведен на рис. 2. Изображенные здесь графики представляют собой ломаные, звенья которых соединяют соседние по времени точки $(t_n, X_{b,n})$, $(t_n, Y_{b,n})$ и т. д. в плоскостях (t, X_b) , $(t, Y_b), \dots$ В данном случае $N = 2135$. В качестве начального момента времени принят момент t_1 . Оценки искомым параметров:

$$X_O = 686.38 (0.033), \quad Y_O = 631.16 (0.032),$$

$$R_b = 553.74 (0.032), \quad R_r = 552.11 (0.032).$$

В скобках указаны стандартные отклонения. Стандартное отклонение ошибок выполнения условий (2) $\sigma = 1.50$. Здесь величины X_O, Y_O, R_r, R_b и стандартные отклонения выражены в пикселах.

После того, как параметры X_O, Y_O, R_r, R_b найдены, на основании данных (1) по формулам

$$\begin{aligned} \cos \Phi_{r,n} &= \frac{X_{r,n} - X_O}{R_r}, & \sin \Phi_{r,n} &= \frac{Y_{r,n} - Y_O}{R_r}, \\ \cos \Phi_{b,n} &= \frac{X_{b,n} - X_O}{R_b}, & \sin \Phi_{b,n} &= \frac{Y_{b,n} - Y_O}{R_b}, \end{aligned}$$

рассчитываются углы $\Phi_{r,n}$ и $\Phi_{b,n}$ ($n=1, 2, \dots, N$). Расчет выполняется так, чтобы величины $|\Phi_{r,n+1} - \Phi_{r,n}|$ и $|\Phi_{b,n+1} - \Phi_{b,n}|$ не превышали нескольких градусов. В результате получаем последовательности чисел

$$t_n, \Phi_{r,n}, \Phi_{b,n} \quad (n=1, 2, \dots, N). \quad (3)$$

Полагаем, что $\Phi_{r,n} \approx \Phi_r(t_n)$, $\Phi_{b,n} \approx \Phi_b(t_n)$. Здесь Φ_r и Φ_b – углы между проекцией оси CX на плоскость Oxy и лучами, проведенным из точки O в красный и синий маркеры соответственно.

Последовательности чисел (1) и (3) сгладим тригонометрическими выражениями вида

$$a_{M+1} + a_{M+2}(t - t_1) + \sum_{m=1}^M a_m \sin \frac{\pi m(t - t_1)}{t_N - t_1}.$$

Каждое выражение – сумма линейной функции и отрезка ряда Фурье по синусам. Выражения такого вида удобно использовать для аппроксимации произвольных гладких функций, заданных на отрезке $t_1 \leq t \leq t_N$ [11]. Коэффициенты этих выражений находятся по данным (1) и (3) методом наименьших квадратов. Сглаживающим выражениям припишем индекс sm , например $X_{r,sm}(t)$, $Y_{r,sm}(t)$ и т.д.

Примеры сглаживающих выражений приведены на рис. 2, 3. Сглаживающие выражения построены для части данных, приведенных на рис. 1 (см. диапазон изменения времени). В данном случае $N = 500$, $M = 60$. В левых частях рис. 3 и 4 приведены графики сглаживающих выражений $X_{r,sm}(t)$, $Y_{r,sm}(t)$ и т. п. правых частях – графики ошибок аппроксимации. График ошибок аппроксимации данных $\{(t_n, X_{r,n})\}$ представляет собой ломаную с вершинами в точках $(t_n, \Delta X_{r,n})$, где $\Delta X_{r,n} = X_{r,n} - X_{r,sm}(t_n)$. Аналогично устроены графики ошибок остальных данных. Нижний график в левой части рис. 4 – это график разности $\Phi_{b,sm}(t) - \Phi_{r,sm}(t) - \pi$. В случае абсолютно точных данных и абсолютно точ-

ной аппроксимации эта разность должна быть постоянной. Как видим, это не так, причем определяющий вклад в имеющуюся ошибку вносят ошибки в данных (3). График разности $\Phi_{b,sm}(t) - \Phi_{r,sm}(t) - \pi$ служит одним из показателей качества данных (1). Заметим, что во всех экспериментах на стенде эта разность вела себя примерно так же, как на рис. 4.

Построенные сглаживающие выражения позволяют рассчитать реальные скорости и ускорения точек платформы. В этих расчетах пересчет величин, выраженных в пикселях, в обычные единицы длины выполняется из условия $R_r + R_b = 155.3$ см.

Каждая фиксированная точка платформы, смещенная относительно точки O , движется по окружности постоянного радиуса. Чтобы найти касательные и центростремительные компоненты скорости и ускорения такой точки достаточно знать радиус окружности R и угловые скорость и ускорение платформы $\dot{\phi}$ и $\ddot{\phi}$. Касательные компоненты скорости и ускорения имеют вид $v_\phi = R\dot{\phi}$, $w_\phi = R\ddot{\phi}$, их центростремительные компоненты $v_R = 0$, $w_R = R\dot{\phi}^2$. В качестве оценки $\dot{\phi}$ можно принять величины $\dot{\Phi}_{r,sm}$, $\dot{\Phi}_{b,sm}$ или $(\dot{\Phi}_{r,sm} + \dot{\Phi}_{b,sm})/2$, оценкой $\ddot{\phi}$ могут быть $\ddot{\Phi}_{r,sm}$, $\ddot{\Phi}_{b,sm}$, $(\ddot{\Phi}_{r,sm} + \ddot{\Phi}_{b,sm})/2$.

В качестве примера приведем результаты расчета скоростей и ускорений маркеров. Расчет проведем двумя способами. Степень близости их результатов характеризует и точность исходных данных (1), и точность построения сглаживающих выражений. Расчетные формулы выпишем только для красного маркера, формулы для синего маркера получаются из выписанных заменой индекса r на индекс b . Первый способ расчета компонент скорости и ускорения маркера в системе координат CXY :

$$v_{r,X} = \dot{X}_{r,sm}, \quad v_{r,Y} = \dot{Y}_{r,sm}, \quad w_{r,X} = \ddot{X}_{r,sm}, \quad w_{r,Y} = \ddot{Y}_{r,sm}.$$

Второй способ:

$$\begin{aligned} v_{r,X} &= -v_{r,\phi} \sin \Phi_{r,sm} & v_{r,Y} &= v_{r,\phi} \cos \Phi_{r,sm}, & v_{r,\phi} &= R_r \dot{\Phi}_{r,sm}, \\ w_{r,X} &= -w_{r,\phi} \sin \Phi_{r,sm} - w_{r,R} \cos \Phi_{r,sm}, & w_{r,Y} &= w_{r,\phi} \cos \Phi_{r,sm} - w_{r,R} \sin \Phi_{r,sm}, \\ w_{r,R} &= R_r \ddot{\Phi}_{r,sm}, & w_{r,\phi} &= R_r \dot{\Phi}_{r,sm}^2. \end{aligned}$$

Касательные и центростремительные компоненты скоростей и ускорений маркеров также можно рассчитать двумя способами. Первый способ – использовать указанные только что формулы для $v_{r,R}$, $w_{r,\phi}$. Второй способ:

$$\begin{aligned} v_{r,\phi} &= \frac{X_{r,sm} \dot{Y}_{r,sm} - Y_{r,sm} \dot{X}_{r,sm}}{\sqrt{X_{r,sm}^2 + Y_{r,sm}^2}}, & w_{r,R} &= -\frac{X_{r,sm} \ddot{X}_{r,sm} + Y_{r,sm} \ddot{Y}_{r,sm}}{\sqrt{X_{r,sm}^2 + Y_{r,sm}^2}}, \\ w_{r,\phi} &= \frac{X_{r,sm} \ddot{Y}_{r,sm} - Y_{r,sm} \ddot{X}_{r,sm}}{\sqrt{X_{r,sm}^2 + Y_{r,sm}^2}}. \end{aligned}$$

Результаты расчетов по приведенным формулам представлены на рис. 5, 6. Рис. 5 иллюстрирует движение синего маркера, рис. 6 – красного. На левых графиках этих рисунков приведены результаты расчетов скорости. Два верхних графика – это компоненты скорости в системе CXY . Здесь в каждой системе координат приведены две кривые, одна из них получена первым способом, другая – вторым. При выбранном масштабе рисунков кривые неразличимы. Разности функций, задаваемых этими кривыми (первая минус вторая), приведены на двух нижних графиках. На средних графиках рис. 5, 6 приведены результаты расчетов компонент ускорений маркеров в системе CXY . Эти графики устроены аналогично левым графикам – в двух верхних системах координат приведены по два графика. Один из них получен первым способом, другой – вторым. Разности функций, построенных разными способами, приведены в двух нижних системах координат. В правой части рис.5, 6 приведены графики касательных и центростремительных компонент скоростей и ускорений маркеров. Эти графики устроены аналогично левым и средним. Полученную близость результатов, полученных разными способами, можно считать приемлемой.

3. Обработка данных измерений акселерометров

В этом разделе компоненты векторов и координаты точек указываются в системе $Oxyz$. Рассмотрим точку P с координатами (x_P, y_P, z_P) . При вращении платформы эта точка имеет ускорение $\mathbf{w} = (-\ddot{\varphi}y_P - \dot{\varphi}^2x_P, \ddot{\varphi}x_P - \dot{\varphi}^2y_P, 0)$. Если в точке P установить акселерометр, то он будет измерять кажущее ускорение $\mathbf{a} = \mathbf{w} - \mathbf{g}$, где \mathbf{g} – ускорение свободного падения на поверхности Земли. Ускорение \mathbf{g} представим в виде: $\mathbf{g} = g\boldsymbol{\gamma}$, где $g = |\mathbf{g}|$, $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z)$ – орт местной вертикали. Уравнения Пуассона для компонент $\boldsymbol{\gamma}$ с учетом устройства платформы записываются следующим образом:

$$\dot{\gamma}_x - \dot{\varphi}\gamma_y = 0, \quad \dot{\gamma}_y + \dot{\varphi}\gamma_x = 0, \quad \dot{\gamma}_z = 0.$$

Их решение

$$\gamma_x = c_1 \cos \varphi + c_2 \sin \varphi, \quad \gamma_y = -c_1 \sin \varphi + c_2 \cos \varphi, \quad \gamma_z = \sqrt{1 - c_1^2 - c_2^2},$$

где c_1 и c_2 – постоянные интегрирования. Согласно определению системы $Oxyz$ имеют место соотношения $|c_1| + |c_2| \ll 1$. Теперь компоненты кажущегося ускорения $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ можно записать в виде:

$$a_x = -\ddot{\varphi}y_P - \dot{\varphi}^2x_P - g(c_1 \cos \varphi + c_2 \sin \varphi),$$

$$a_y = \ddot{\varphi}x_P - \dot{\varphi}^2y_P + g(c_1 \sin \varphi - c_2 \cos \varphi), \quad a_z = -g\sqrt{1 - c_1^2 - c_2^2}.$$

Оси чувствительности акселерометра обозначим x' , y' и z' , а измерения по этим осям – соответственно $a_{x'}$, $a_{y'}$ и $a_{z'}$. Акселерометры на платформе устанавливаются так, чтобы оси x' , y' и z' были по возможности параллельны осям Ox , Oy , Oz и направлены одинаково с ними (на самом деле названия осей и их направления в ряде случаев были другие, но здесь они изменены для удоб-

ства изложения). На стенде проверяются измерения по осям x' и y' . Предположим сначала, что эти оси в точности параллельны осям Ox , Oy . Тогда расчетными аналогами измерений $a_{x'}$ и $a_{y'}$ будут выражения a_x и a_y . Однако величины x_p , y_p не известны с необходимой точностью, а c_1 и c_2 вообще неизвестны. В такой ситуации имеет смысл свести проверку измерений к решению регрессионной задачи с использованием математической модели

$$\begin{aligned} a_{x'}(t) &= A_0 + A_1 \cos\varphi(t) + A_2 \sin\varphi(t) + A_3\ddot{\varphi}(t) + A_4\dot{\varphi}^2(t), \\ a_{y'}(t) &= B_0 + B_1 \cos\varphi(t) + B_2 \sin\varphi(t) + B_3\ddot{\varphi}(t) + B_4\dot{\varphi}^2(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\varphi(t)$ – угол поворота платформы, реконструируемый по видеоинформации, A_k и B_k – неизвестные параметры, A_0 и B_0 введены для компенсации постоянных смещений в измерениях. Соотношения (4) рассматриваются для тех моментов времени, для которых имеются измерения ускорения; таких моментов намного больше пяти – шаг по времени измерений ускорений составляет примерно 0.06 с. Совокупность этих соотношений рассматривается как две переопределенные системы уравнений, одна система – относительно A_k , другая – относительно B_k . Обе решаются методом наименьших квадратов. Если среднеквадратичная ошибка выполнения соотношений (4) на найденном решении достаточно мала, параметры A_k и B_k удовлетворяют соотношениям

$$\begin{aligned} A_1 \approx -B_2, \quad A_2 = B_1, \quad A_3 \approx B_4 \approx -y_p, \quad A_4 \approx -B_3 \approx -x_p, \\ |A_1| + |A_2| \ll g, \quad |B_1| + |B_2| \ll g, \end{aligned} \quad (5)$$

то измерения можно считать приемлемыми. От параметров A_0 и B_0 требуется только стабильность.

Выше предполагалось, что оси чувствительности акселерометра параллельны осям системы $Oxuz$. На самом деле это условие выполнено приближенно. Тем не менее, даже при учете ошибок ориентации осей акселерометра математическая модель (4) остается справедливой; точность выполнения связей (5) между коэффициентами A_k и B_k ухудшается.

На стенде проверялись 4 трехосных акселерометра, точнее, 4 блока, составленных из трех одноосных акселерометров. Пример данных измерений акселерометра 3 приведен на рис. 7. В левой части рисунка приведены данные, полученные в течение всего эксперимента. Это – тот самый эксперимент, данные по результатам обработки видеоинформации по которому представлена на рис. 2. В правой части рис. 7 приведен фрагмент измерений акселерометра, относящийся к отрезку времени, представленному на рис. 3 – 6. Решение регрессионной задачи с моделью (4) для этого фрагмента представлено на рис. 8.

Левые и правые графики на этом рисунке получены с использованием разных способов расчета функций $\ddot{\varphi}(t)$, $\dot{\varphi}^2(t)$, $\cos\varphi(t)$ и $\sin\varphi(t)$. Левые графики получены при $\varphi = \Phi_{b,sm}(t)$. Дело в том, что акселерометры располагались вблизи маркеров – на расстоянии около 10 см. В такой ситуации движение

платформы целесообразно восстанавливать по ближайшему маркеру. В случае блока 3 – по синему маркеру. Графики в правой части получены для функций

$$\cos\varphi = \frac{X_{b,sm}(t) - X_O}{R_b}, \quad \sin\varphi = \frac{Y_{b,sm}(t) - Y_O}{R_b},$$

$$\dot{\varphi}^2 = \frac{\dot{X}_{b,sm}^2(t) + \dot{Y}_{b,sm}^2(t)}{R_b^2}, \quad \ddot{\varphi} = \frac{X_{b,sm}(t)\ddot{Y}_{b,sm}(t) - Y_{b,sm}(t)\ddot{X}_{b,sm}(t)}{R_b^2}.$$

В верхней части рис. 8 в единых системах координат приведены графики данных измерений и их расчетных аналогов, полученных в результате решения регрессионной задачи. В нижней части рис. 8 приведены графики разностей данных измерений и их расчетных аналогов.

Результаты решения регрессионной задачи, использованные при построении левых графиков:

$$\sigma_{x'} = 11.8 \text{ см/с}^2, \quad A_0 = -107.3(0.86) \text{ см/с}^2, \quad A_1 = -25.3(0.65) \text{ см/с}^2,$$

$$A_2 = -8.7(0.75) \text{ см/с}^2, \quad A_3 = 63.9(1.0) \text{ см}, \quad A_4 = 2.4(0.71) \text{ см};$$

$$\sigma_{y'} = 5.31 \text{ см/с}^2, \quad B_0 = -109.2(0.38) \text{ см/с}^2, \quad B_1 = -3.6(0.29) \text{ см/с}^2,$$

$$B_2 = 29.8(0.34) \text{ см/с}^2, \quad B_3 = -7.7(0.45) \text{ см}, \quad B_4 = 64.7(0.32) \text{ см}.$$

Результаты решения регрессионной задачи, использованные при построении правых графиков:

$$\sigma_{x'} = 11.2 \text{ см/с}^2, \quad A_0 = -107.5(0.81) \text{ см/с}^2, \quad A_1 = -25.3(0.62) \text{ см/с}^2,$$

$$A_2 = -8.8(0.72) \text{ см/с}^2, \quad A_3 = 67.3(1.0) \text{ см}, \quad A_4 = 2.6(0.67) \text{ см};$$

$$\sigma_{y'} = 4.64 \text{ см/с}^2, \quad B_0 = -129.7(0.81) \text{ см/с}^2, \quad B_1 = -3.8(0.26) \text{ см/с}^2,$$

$$B_2 = 30.4(0.30) \text{ см/с}^2, \quad B_3 = -7.6(0.41) \text{ см}, \quad B_4 = 65.3(0.28) \text{ см}.$$

Как видим, полученные результаты близки. Соотношения (5) выполнены с приемлемой точностью.

4. Использование измерений акселерометров для реконструкции движения платформы.

В соотношениях (4) члены с коэффициентами A_3 , A_4 и B_3 , B_4 можно считать полезным сигналом – они дают информацию об ускорении маркеров в плоском движении; остальные члены представляют собой по существу систематическую ошибку. Исследуем возможность использования такого полезного сигнала для реконструкции движения платформы только по измерениям ускорений. Уравнения движения точки, отмеченной маркером, запишем в виде (для определенности рассмотрим синий маркер)

$$\dot{X}_b = -\dot{\varphi}(Y_b - Y_O), \quad \dot{Y}_b = \dot{\varphi}(X_b - X_O), \quad \dot{\varphi} = \omega, \quad (6)$$

$$\dot{\omega} = \frac{B_4(a_{x'} - A_0) - A_4(a_{y'} - BA_0)}{A_3B_4 - A_4B_3}.$$

Здесь $X_b, Y_b, \varphi, \omega$ – фазовые переменные, $a_{x'}, a_{y'}$ – измеренные ускорения, $A_0, A_3, A_4, B_0, B_3, B_4$ – постоянные параметры, определенные калибровкой (см. предыдущий раздел). Последнее уравнение (6) получено исключением ω^2 из системы

$$a_{x'} = A_0 + A_3\dot{\omega} + A_4\omega^2, \quad a_{y'} = B_0 + B_3\dot{\omega} + B_4\omega^2.$$

Систематическая ошибка в измерениях, обусловленная отклонением осей чувствительности акселерометров осей x' и y' от вертикали, не учитывается. Уравнения (6) интегрируются численно на временной сетке $\{t'_n\}$, $n = 0, 1, 2, \dots$, на которой заданы измерения ускорений. Если эти уравнения записать в векторном виде $\dot{u} = F(t, u)$, $u = (X_b, Y_b, \varphi, \omega)$ и обозначить $u_n = u(t'_n)$, то используемую разностную схему можно записать в виде

$$u_{n+1} = u_n + \frac{h(k_1 + k_2)}{2}, \quad k_1 = F(t'_n, u_n), \quad k_2 = F(t'_{n+1}, u_n + hk_1).$$

Точности этой схемы в рассматриваемой задаче оценивалась посредством интегрирования уравнений

$$\begin{aligned} \dot{X}_b &= -V \cos \varphi, & \dot{Y}_b &= V \sin \varphi, & \dot{\varphi} &= \frac{V}{R_b}, \\ \dot{V} &= w_{b,Y} \cos \varphi - w_{b,X} \sin \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

где $w_{b,X}(t)$ и $w_{b,Y}(t)$ были рассчитаны по функциям $X_{b,sm}(t)$, $Y_{b,sm}(t)$. Система (7) эквивалентна системе (6), если отсутствуют ошибки в измерениях обоих видов и ошибки аппроксимации видеоданных, а также согласованы параметры обеих систем. Интегрирование выполнялось на временной сетке $\{t_n\}$, на которой задавались измерения координат маркеров. Рассмотрим реконструкцию движения платформы с помощью системы (7) по данным, представленным на рис. 9. Здесь слева изображены графики зависимости от времени измерений координат маркеров (выражены в пикселях, ср. рис. 1), справа приведены результаты сглаживания этих измерений (ср. рис. 3 – 6). Рассчитанные таким образом функции $X_b(t), Y_b(t), \varphi(t), V(t)$ сравнивались с решением системы (7), начальные условия которого в левой точке рассматриваемого отрезка времени совпадали со значениями этих функций. Результаты интегрирования системы (7) приведены на рис. 10. Время здесь отсчитывается от начальной точки отрезка интегрирования. В левой части рис. 10 графики решения системы (7) и аппроксимирующих функций построены в единых координатных осях. Графики практически сливаются, поэтому в правой части рисунка приведены разности одноименных функций – решение минус аппроксимация. Как видно из графиков, ошибка определения координат на выбранном отрезке не превышает 5 см. В те-

чение первых 10 с она не превышает 1 см. Принятая в данной задаче разностная схема оказалась приемлемой по точности.

В левой части рис. 11 приведены графики данных измерений ускорений на рассматриваемом отрезке времени. В правой части этого рисунка приведены результаты аппроксимации этих данных выражениями (4) и аналогичным выражением для компоненты $a_{z'}$. В данном случае

$$\sigma_{x'} = 19.2 \text{ см/с}^2, A_0 = -109.4(1.4) \text{ см/с}^2, A_3 = 69.3(1.2) \text{ см}, A_4 = 7.0(0.80) \text{ см};$$

$$\sigma_{y'} = 8.00 \text{ см/с}^2, B_0 = -125.9(0.60) \text{ см/с}^2, B_3 = -7.1(0.49) \text{ см/с}^2, B_4 = 63.0(0.33) \text{ см}.$$

Результат интегрирования системы (6) с указанными параметрами приведен на рис. 12. В качестве начальных условий взяты значения аппроксимирующих выражений для X_b , Y_b , φ и $\dot{\varphi}$, построенных по видеоданным. Этот рисунок организован аналогично рис. 10. В данном случае более или менее удовлетворительное согласие результатов интегрирования и аппроксимации по видеоинформации имеет место только в течение первых 5с. Рассогласование обусловлено, по-видимому, указанными выше систематическими ошибками.

5. Заключение

Проведённые исследования показали, что при установке подобных блоков акселерометров на автомобиле или другом наземном транспортном средстве, в их показаниях будут доминировать систематические ошибки. Чтобы получить приемлемую по точности навигационную систему, составляющие показаний акселерометров, которые в разделе 3 были обозначены $g\gamma_x$ и $g\gamma_y$, следует оценивать специальным образом. Иными словами, надо оценивать направление местной вертикали в собственной системе координат блока акселерометров. Эту задачу предполагается решить без использования сложных и дорогих механических устройств, на базе измерительных средств MEMS и микропроцессоров. Возможный и теоретически достаточно простой способ решения этой задачи – измерять угловую скорость блока и интегрировать уравнение Пуассона для орта γ . Угловую скорость можно измерять с помощью трехосного датчика угловой скорости (при наличии подходящего датчика – наиболее простой и точный способ) или с использованием других датчиков, например, 6 одноосных акселерометров, расположенных в одном блоке и нужным образом ориентированных. Реализация указанных подходов составит направление дальнейших исследований.

Литература

1. Андреев В. Д., Девянин Е. А., Демьяновский А. П. К теории инерциальных систем, не содержащих гироскопических чувствительных элементов, АН СССР, Инженерный журнал, Механика твердого тела, № 1, 1966.
2. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М., Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1966.

3. Богуславский А.А., Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М., Трифонов О.В., Ярошевский В.С. Построение описания внешней среды в системах информационного обеспечения мобильных робототехнических комплексов. // Мехатроника, автоматизация, управление, № 12, 2008, с. 50, приложение с.15-24.
4. Платонов А.К., Соколов С.М., Богуславский А.А., Трифонов О.В. многофункциональная система информационного обеспечения транспортных средств. // Сборник материалов международной конференции «Прогресс транспортных средств и систем-2009», Волгоград, 13-15 октября 2009, с. 95-96.
5. Платонов А.К., Богуславский А.А., Сазонов В.В., Соколов С.М., Трифонов О.В., Куфтин Ф.А., Васильев А.И., Моксин К.А. Программно-аппаратный комплекс средств навигации мобильных систем // Сборник материалов IV-й всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», Домбай, 6-10 апреля 2009.
6. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A. Intellectual Images Processing for a Realtime Recognition Problem. // Proc. The 2nd Intern. Multi-Conf. on Complexity, Informatics and Cybernetics (IMCIC2011), Orlando, Florida, USA, March 27th-30th, 2011, Orlando, Florida, USA, Vol. II, pg.406-411.
7. Соколов С.М., Богуславский А.А., Васильев А.И., Трифонов О.В., Назаров В.Г., Фролов Р.С. Мобильный комплекс для оперативного создания и обновления навигационных карт. // Известия ЮФУ. Технические науки, № 3, март 2011, ISSN 1999-9429с. 157-166.
8. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Kuftin F.A. Vision System for Relative Motion Estimation from Optical Flow. // Proc. 13th Intern. Conf on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2009), Orlando, Florida, USA, July 10-13, 2009.
9. Платонов А.К., Соколов С.М., Сазонов В.В., Богуславский А.А., Трифонов О.В., Куфтин Ф.А., Васильев А.И., Моксин К.А. Программно-аппаратный комплекс средств навигации мобильных систем // Вопросы оборонной техники. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы, 2010, №1-2, с. 47-55.
10. Boguslavsky A.A., Sokolov S.M. The real time Vision System for small-sized target tracking. // Int. J. Computing Science and Mathematics, Vol. 1, No. 1, 2007, pp.115-127.
11. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М., Физматгиз, 1961.

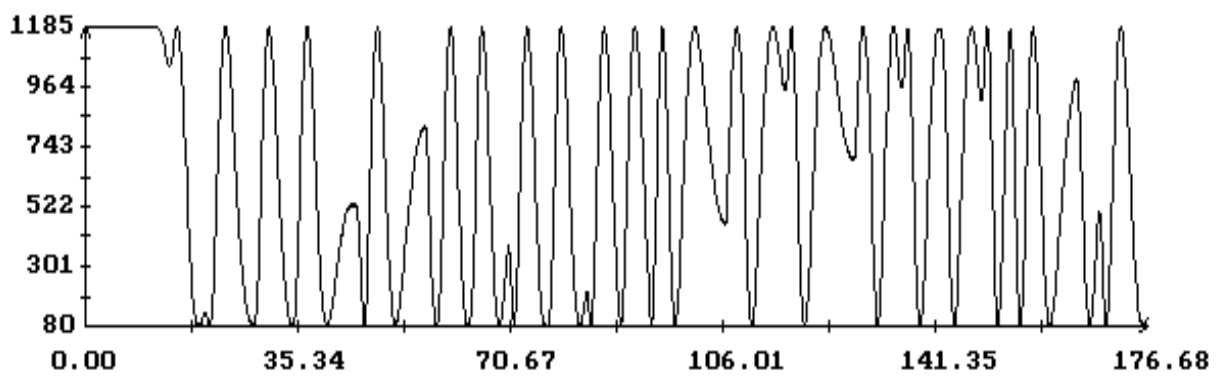
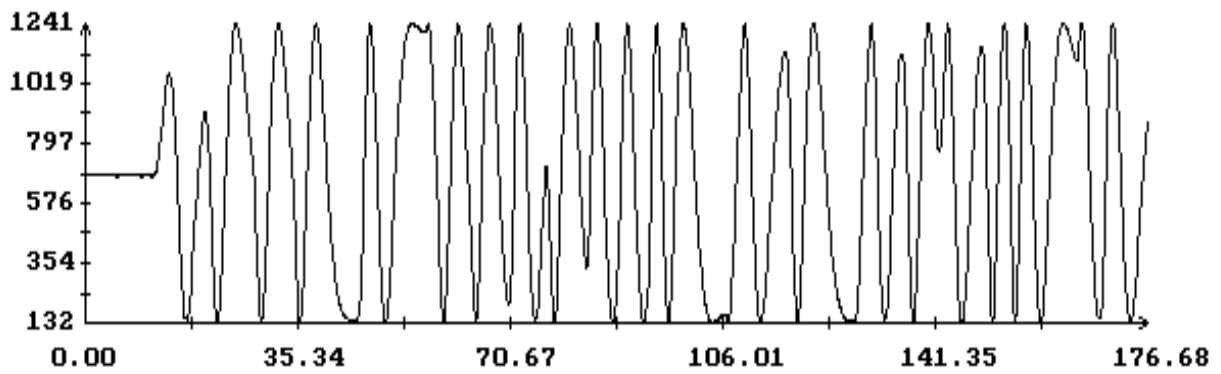
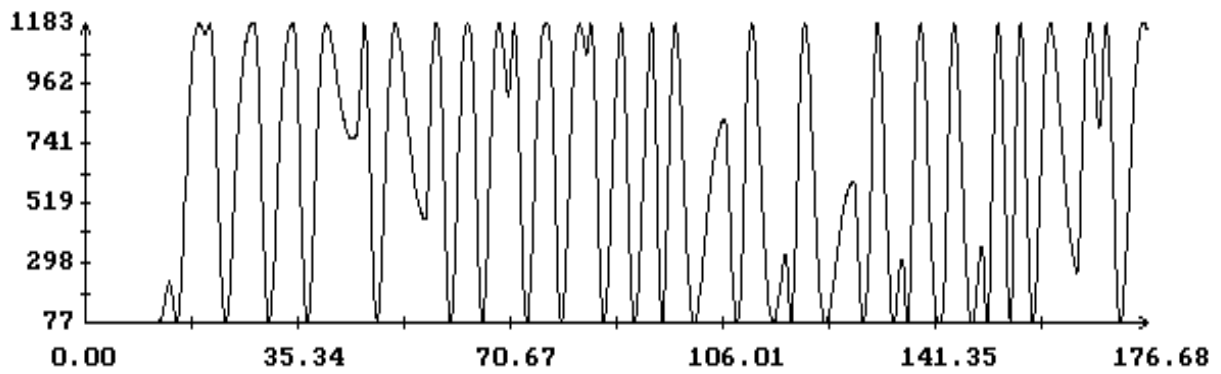
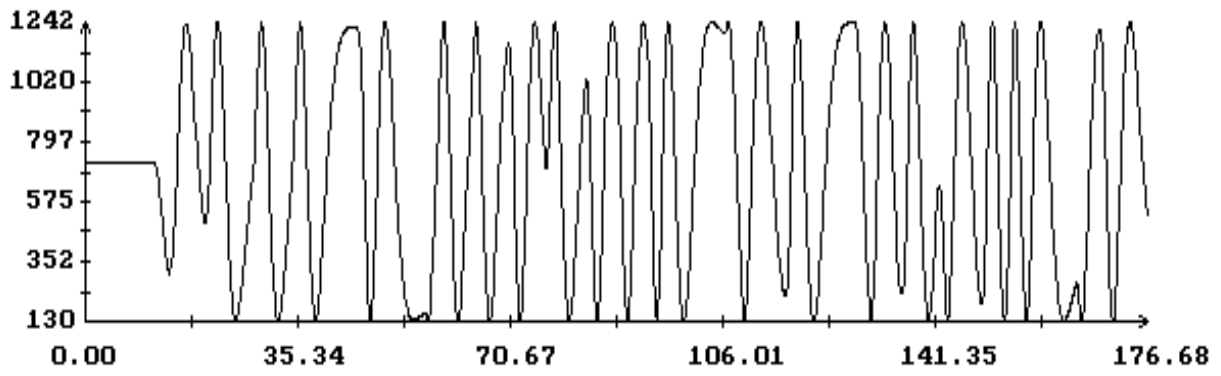
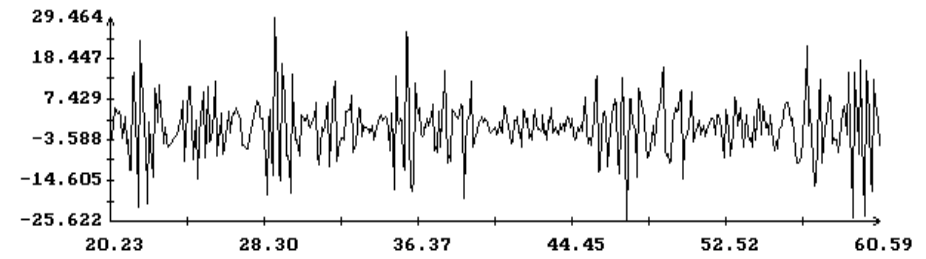
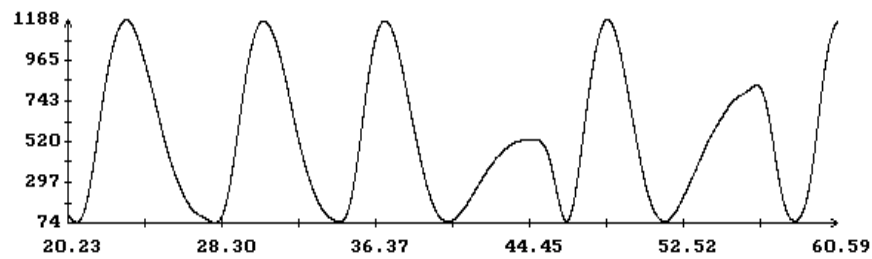
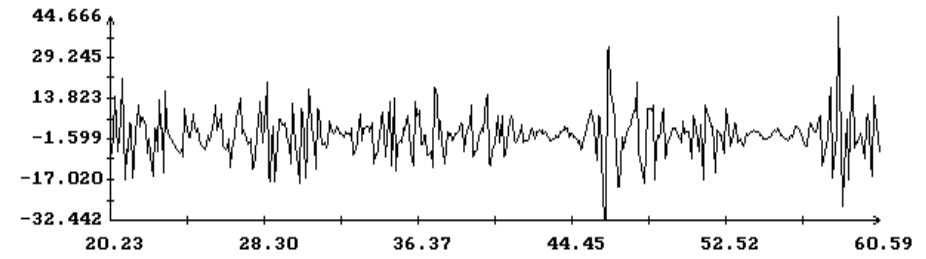
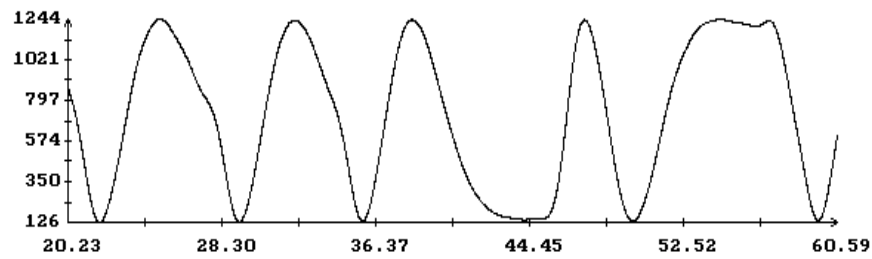
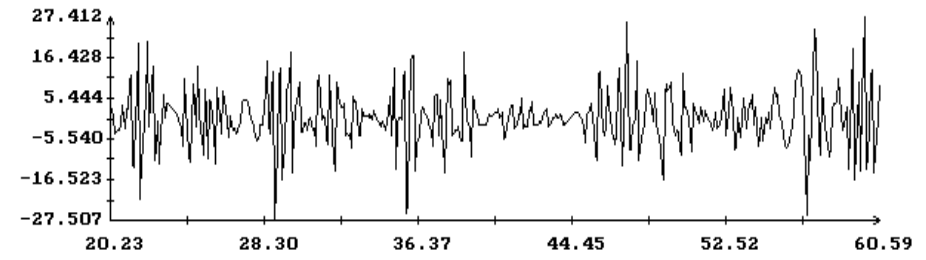
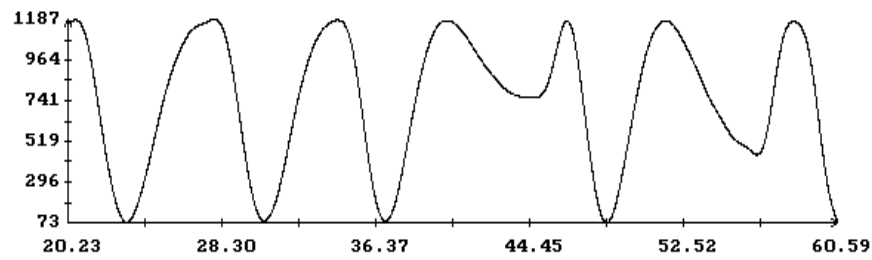
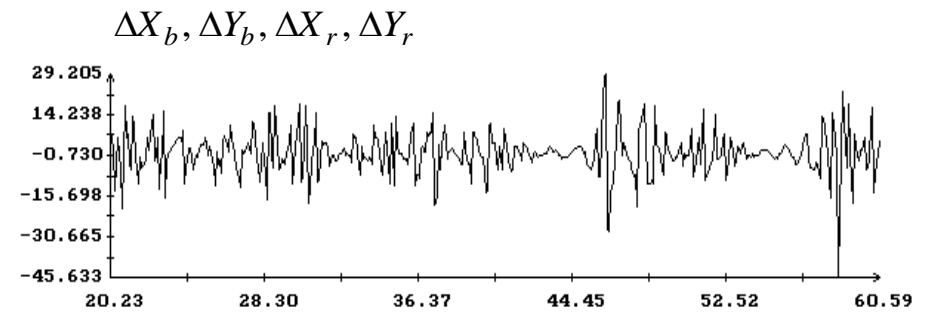
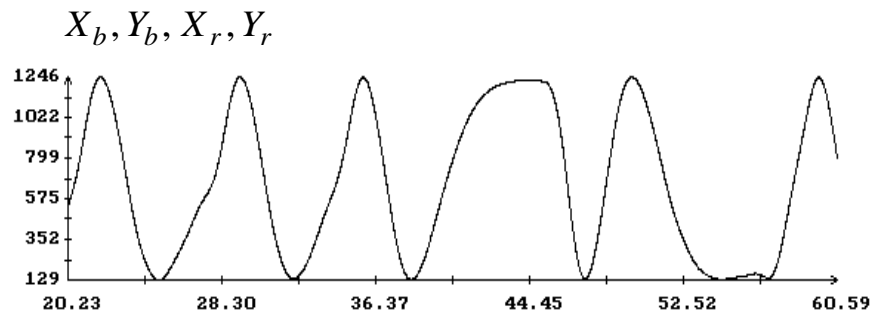
X_b, Y_b, X_r, Y_r

 $t(c)$

Рис. 2. Пример движения платформы станда.



$t(c)$

$t(c)$

Рис. 3. Слева – аппроксимация движения платформы, справа – ошибки аппроксимации.

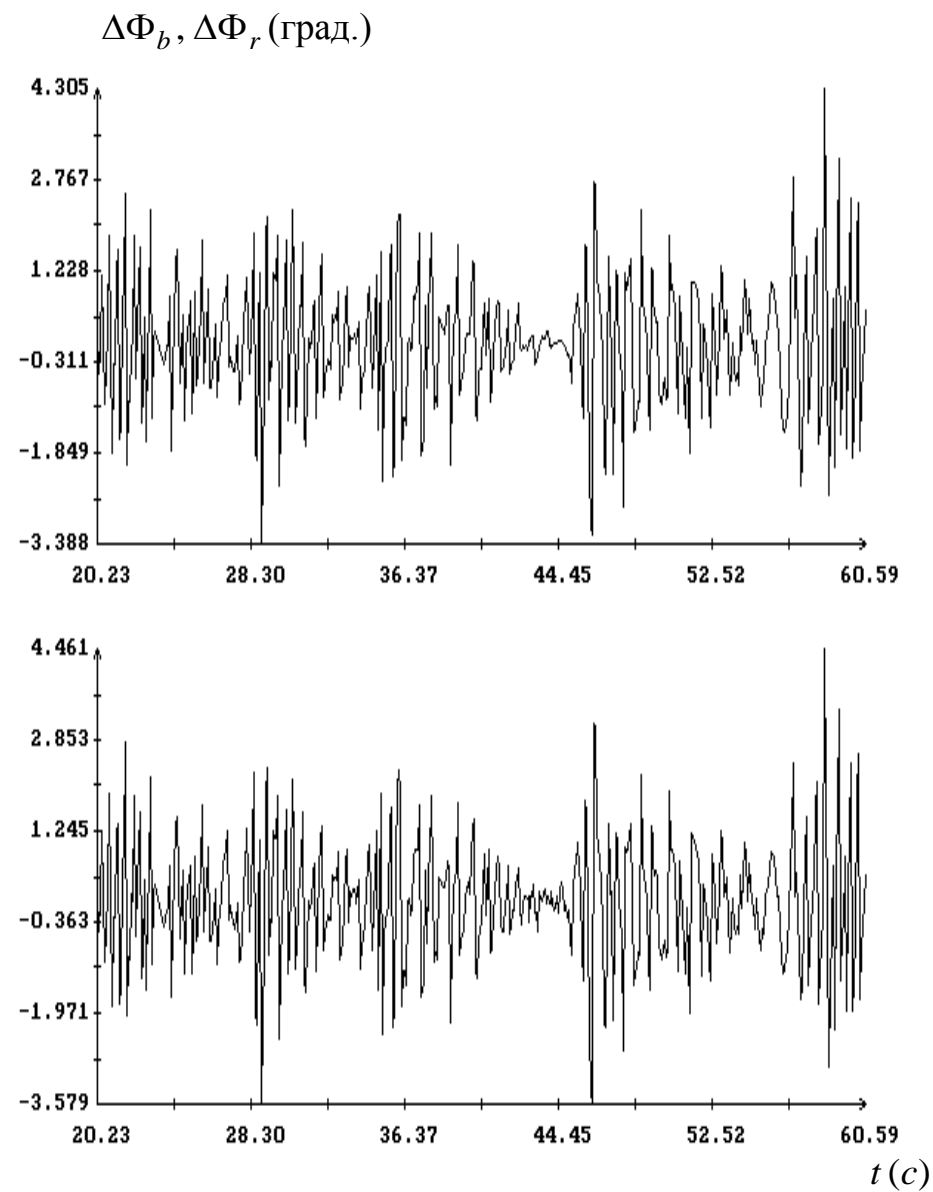
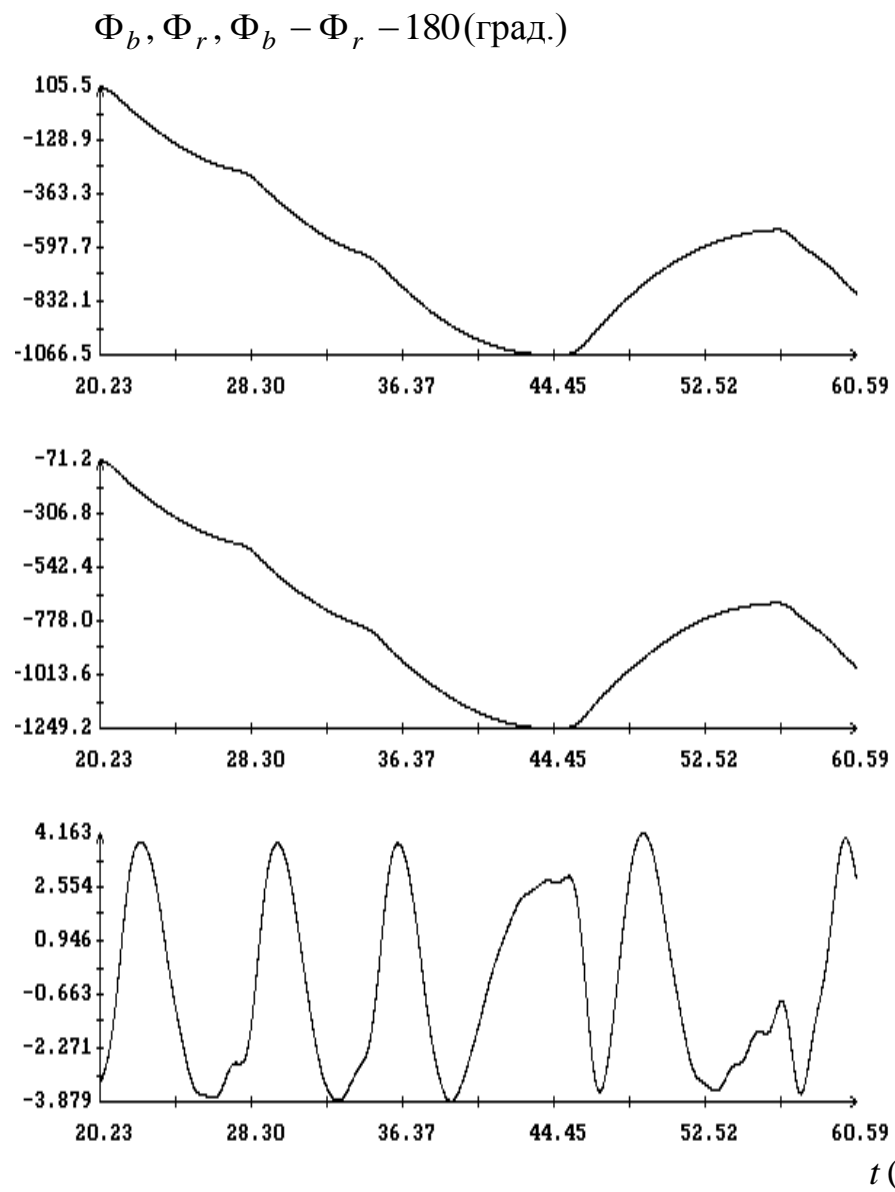


Рис. 4. Слева – аппроксимация движения платформы, справа – ошибки аппроксимации.

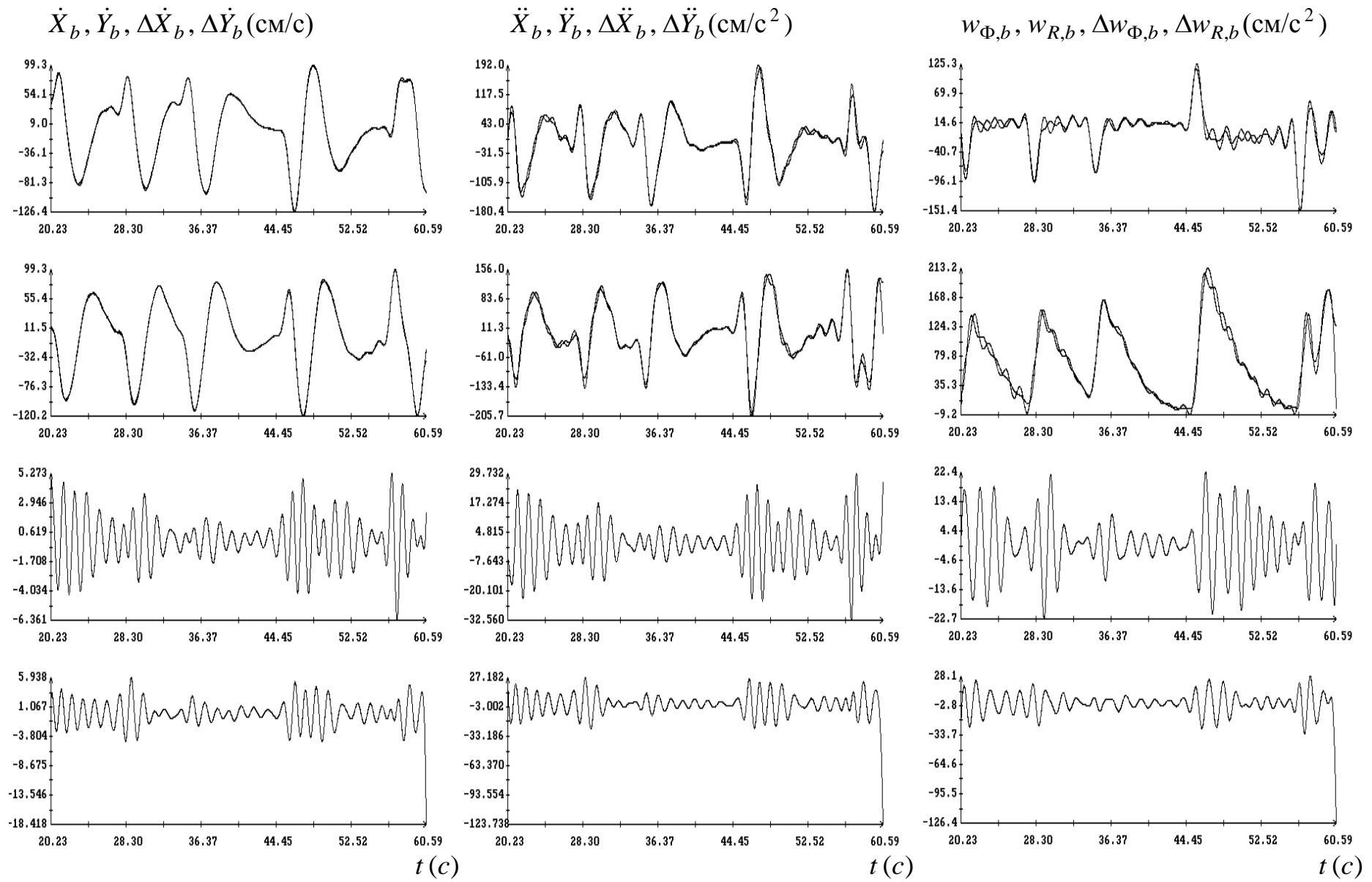


Рис. 5. Скорость и ускорение синего маркера, найденные по видеоинформации.

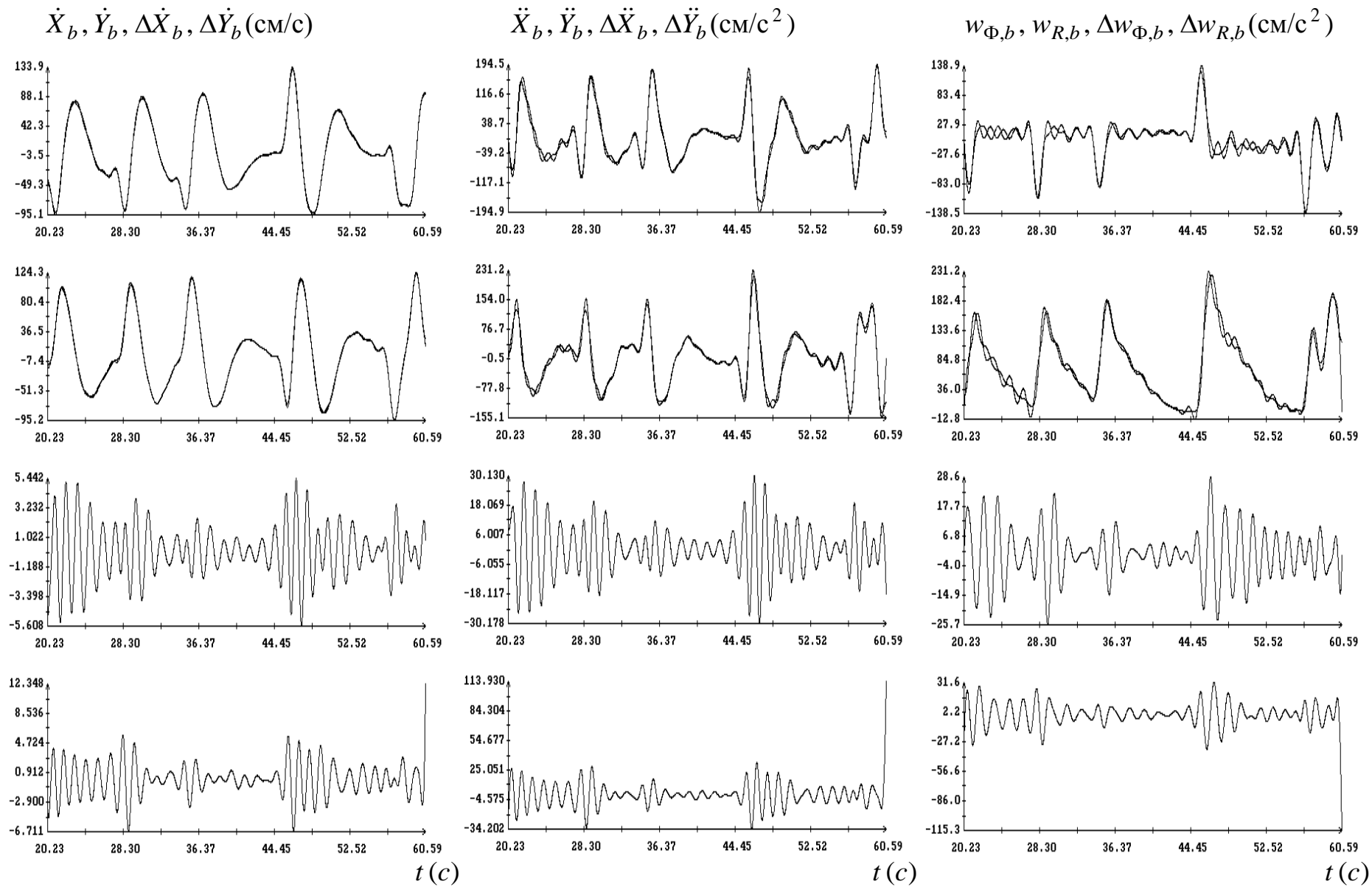
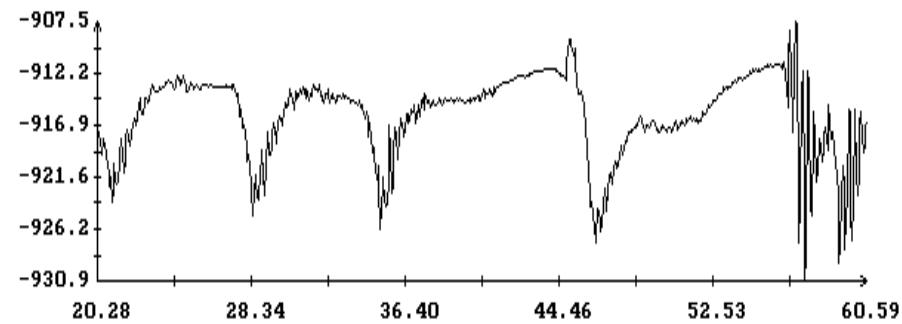
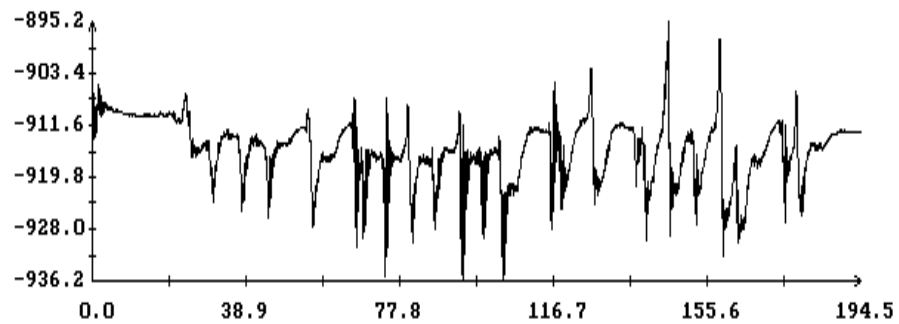
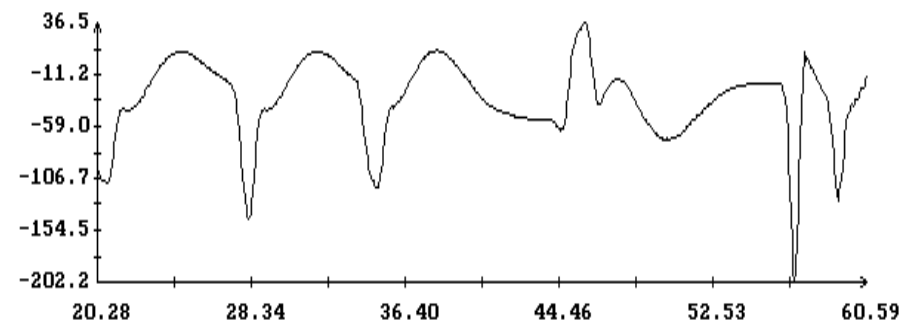
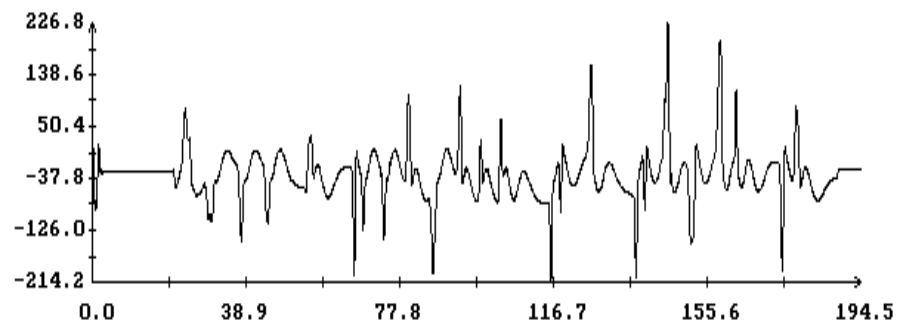
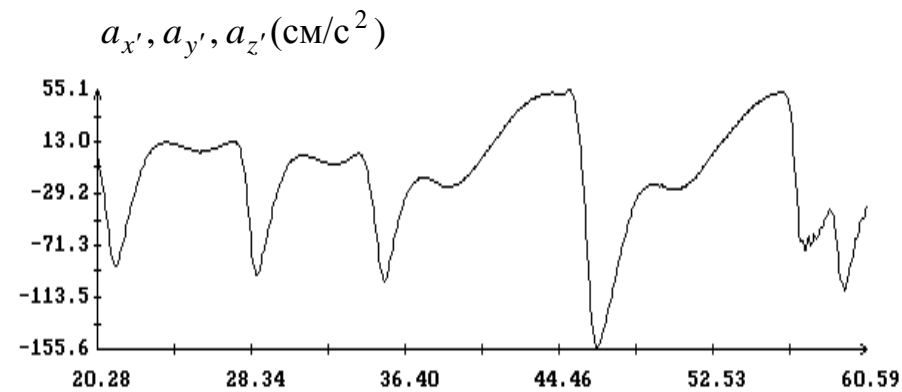
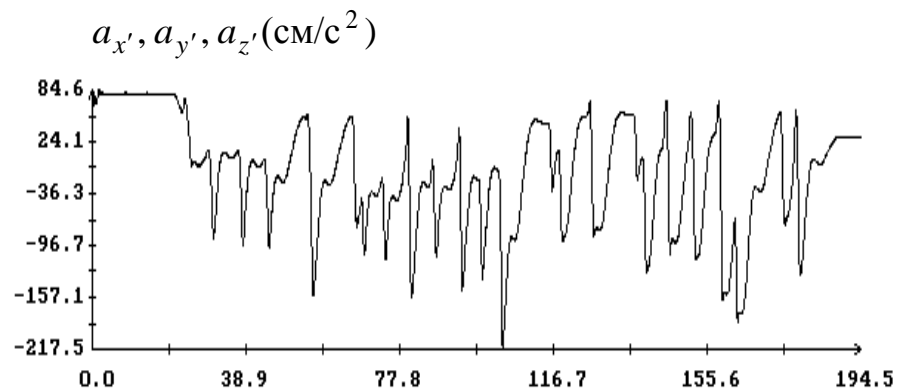


Рис. 6. Скорость и ускорение красного маркера, найденные по видеоинформации.



$t(c)$

$t(c)$

Рис. 7. Данные измерений блока акселерометров 3. Слева – данные, полученные в течение всего эксперимента, справа – данные на отрезке, выделенном для анализа.

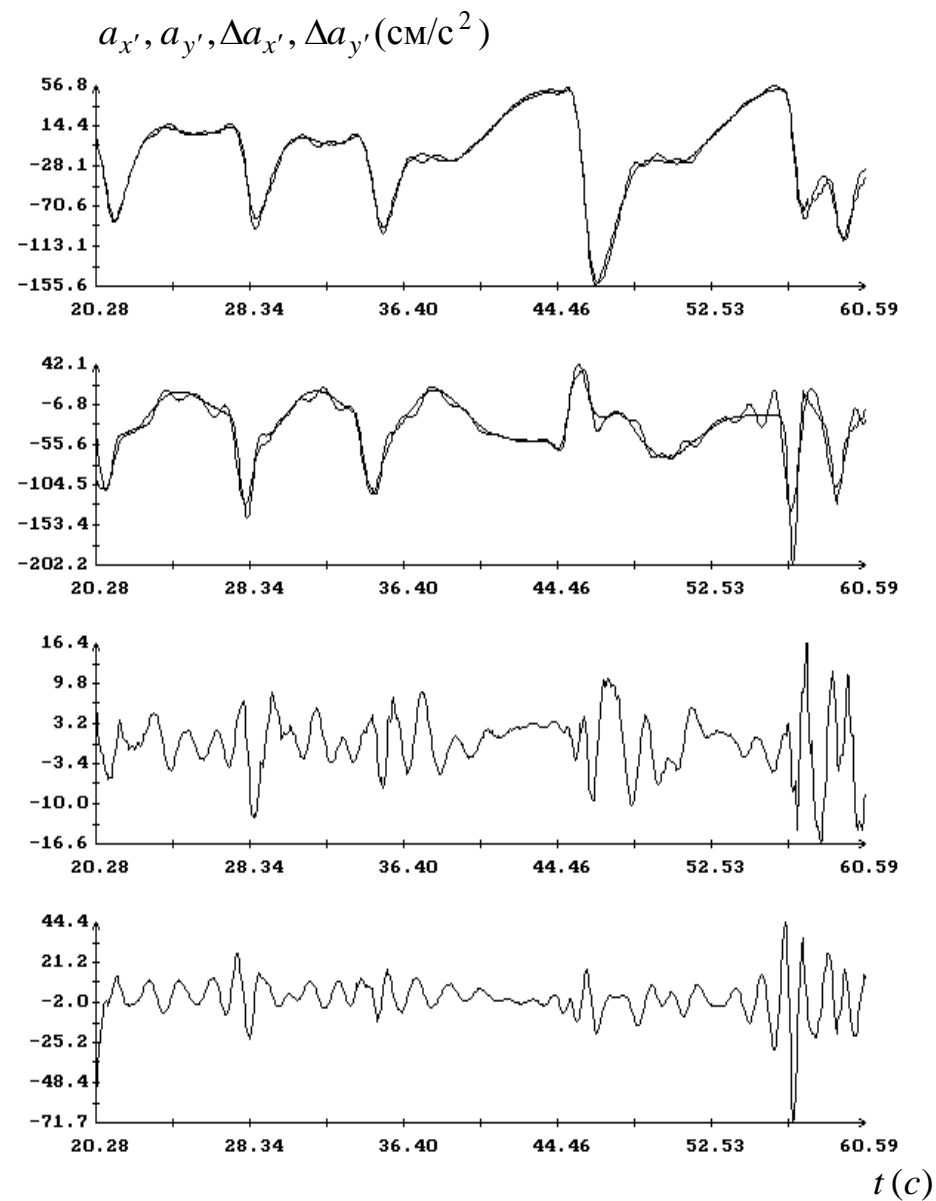
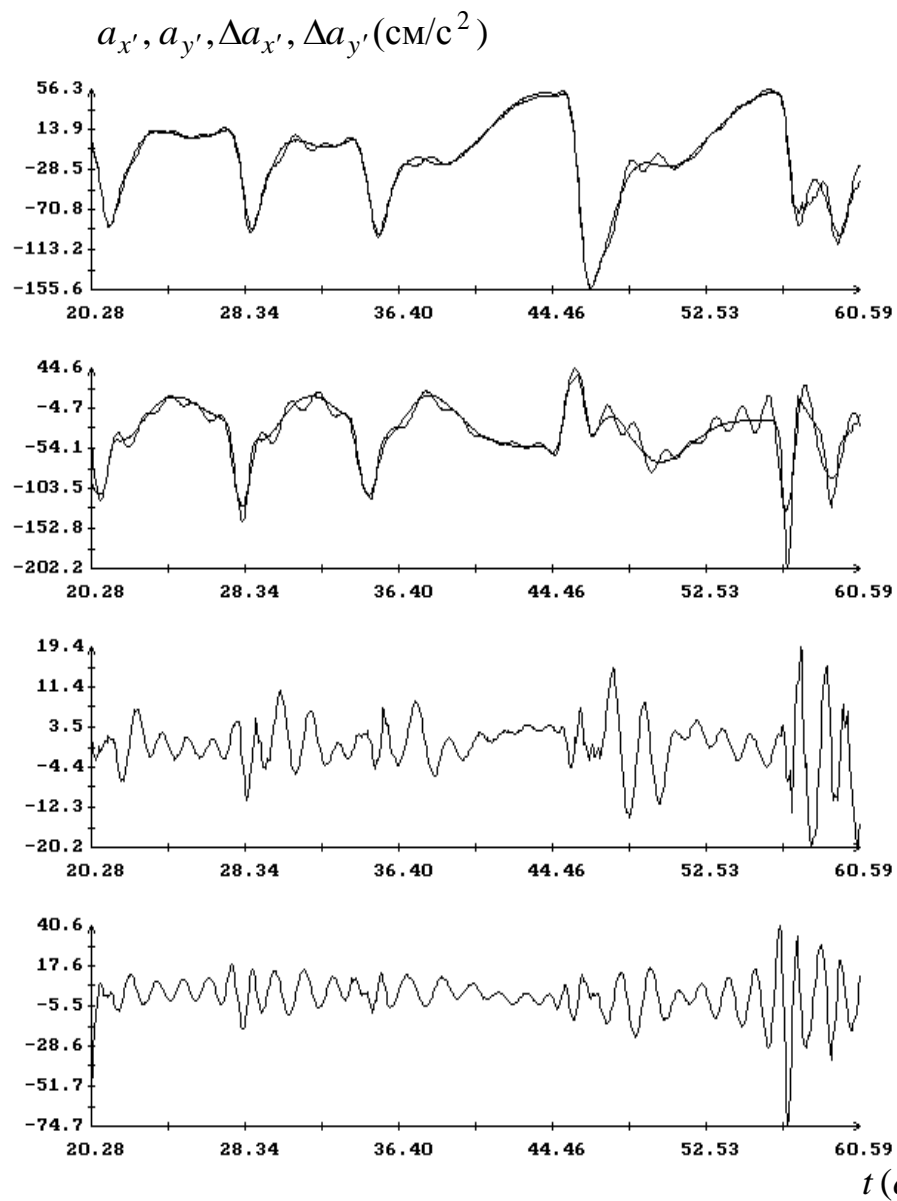


Рис. 8. Результаты обработки измерений блока акселерометров 3.

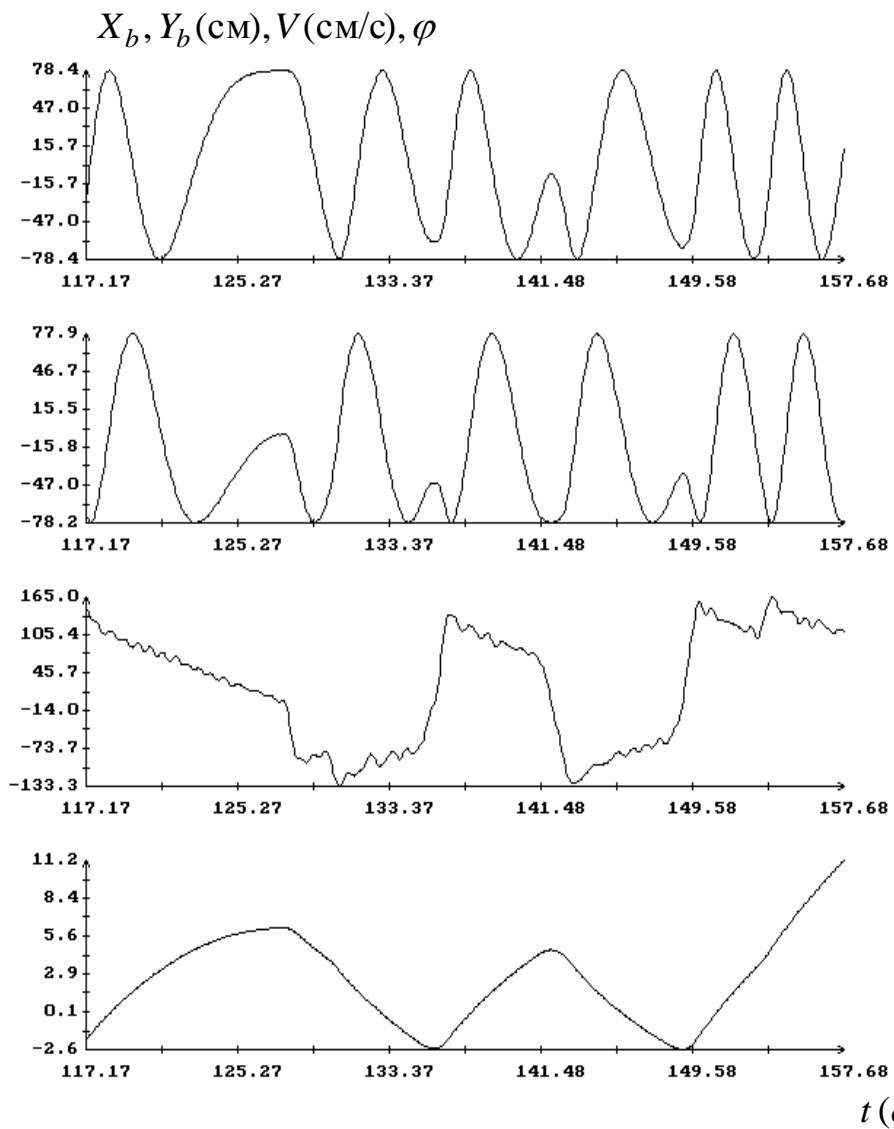
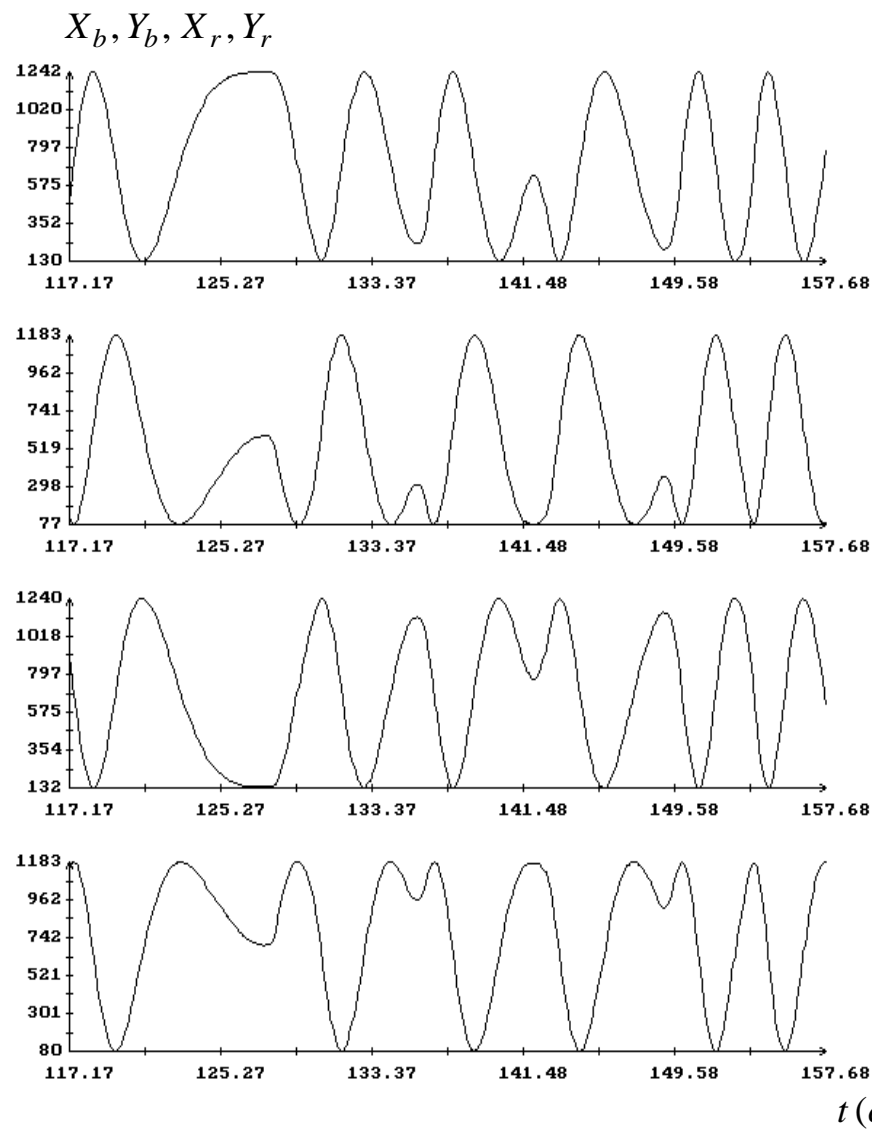


Рис. 9. Слева – видеоинформация о движении платформы, справа – его аппроксимация.

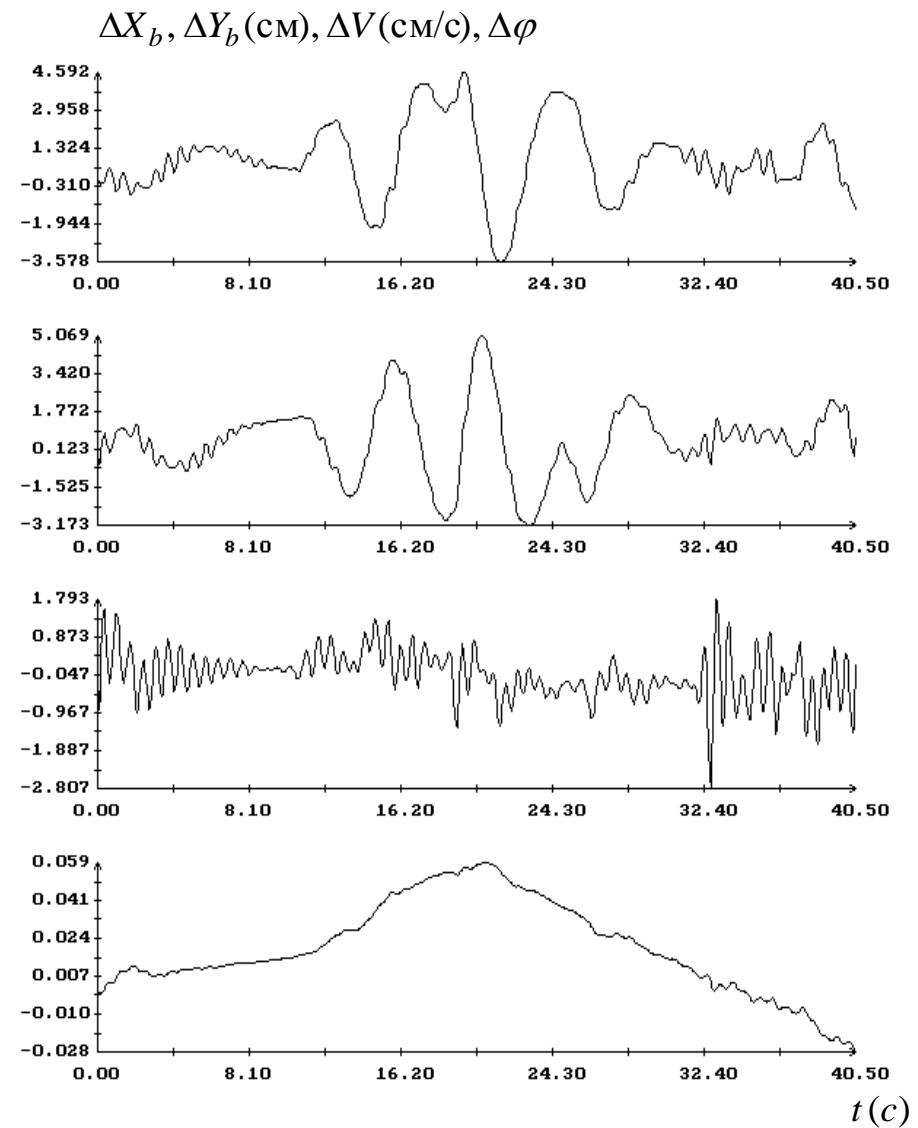
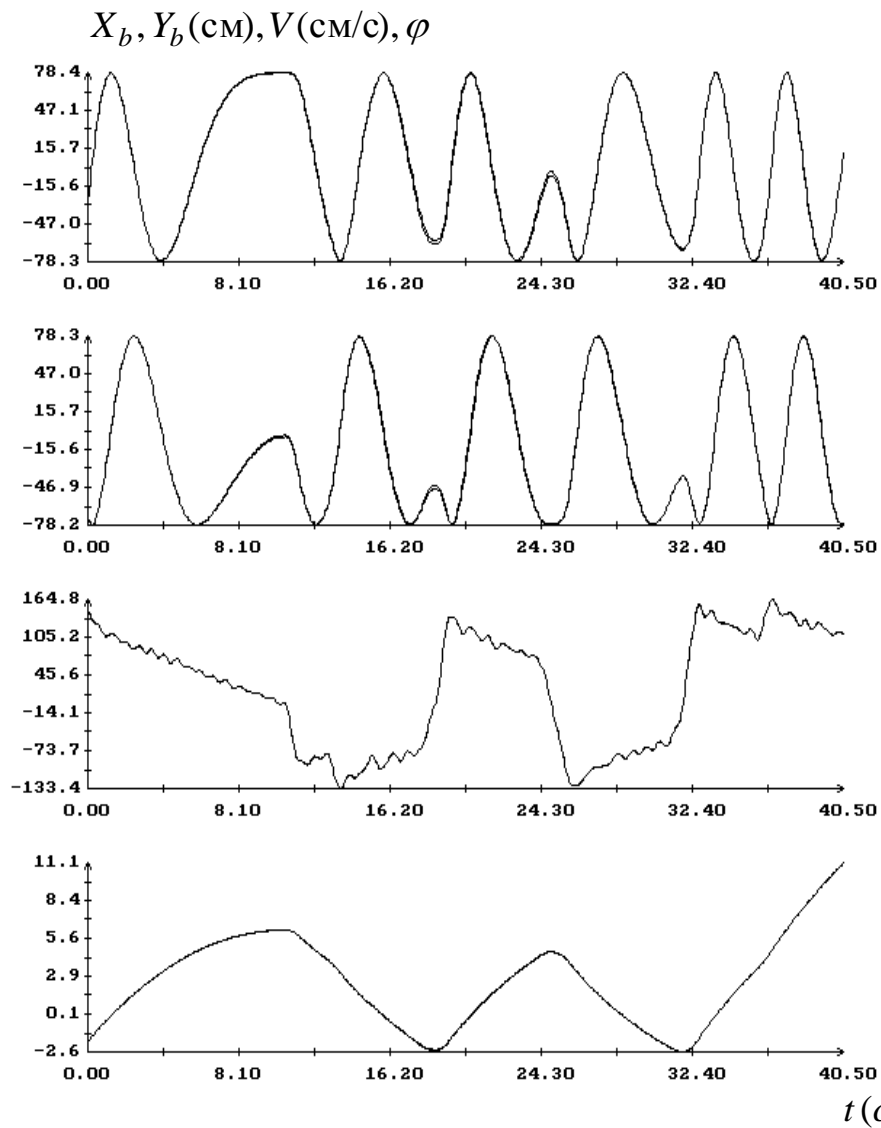
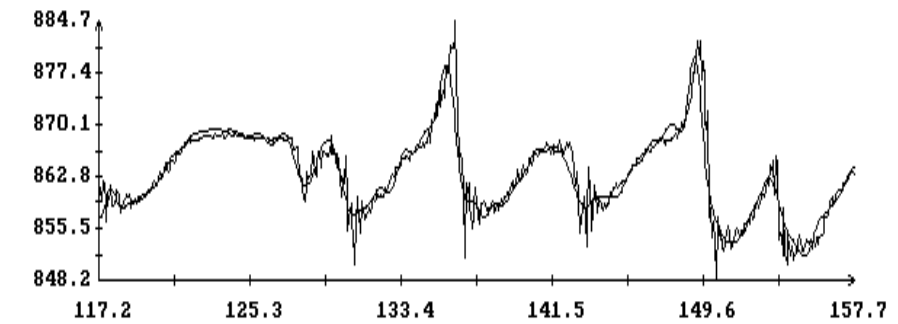
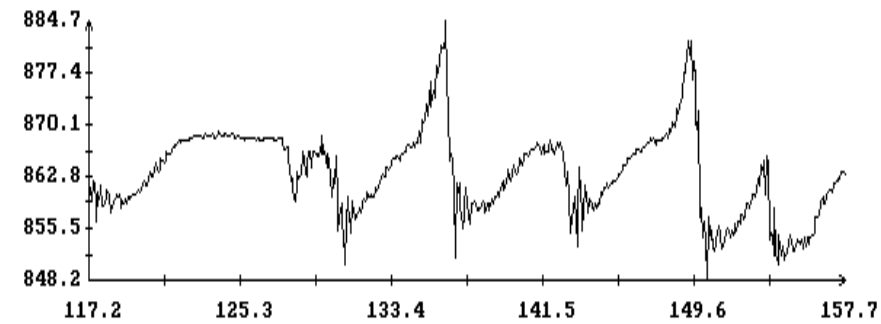
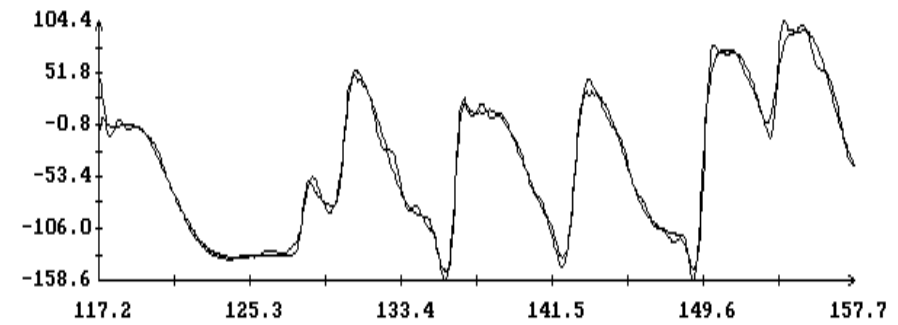
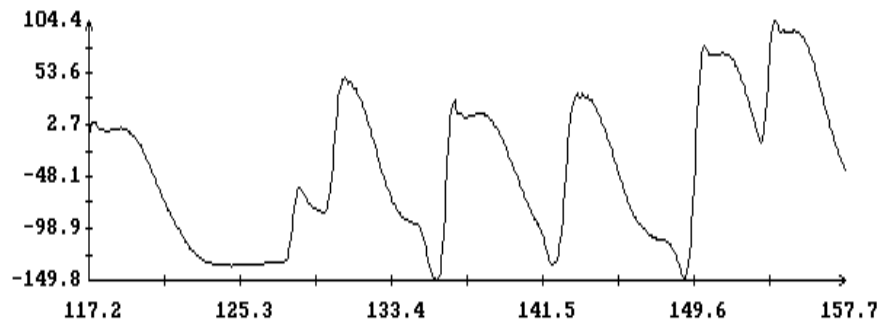
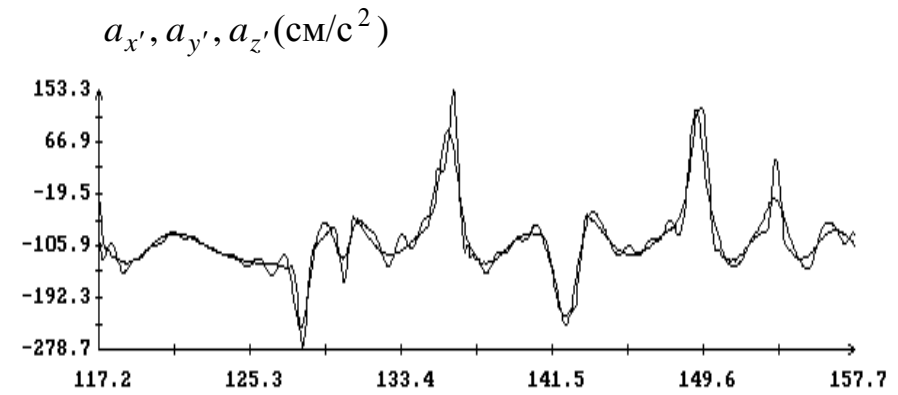
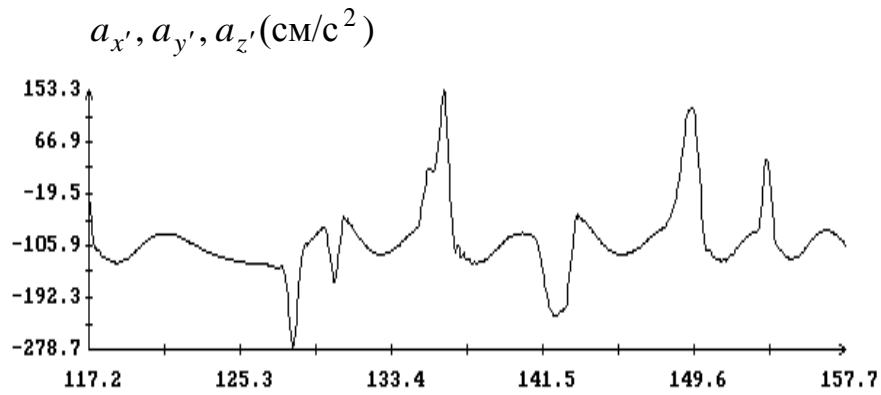


Рис. 10. Результаты интегрирования системы (7). Слева графики решения и аппроксимирующих функций, построенных по видеoinформации. Справа разности переменных в решении и аппроксимирующих функций.



$t(c)$

$t(c)$

Рис. 11. Слева – данные измерений блока акселерометров 3 на отрезке, выделенном для анализа. Справа – результаты обработки этих данных.

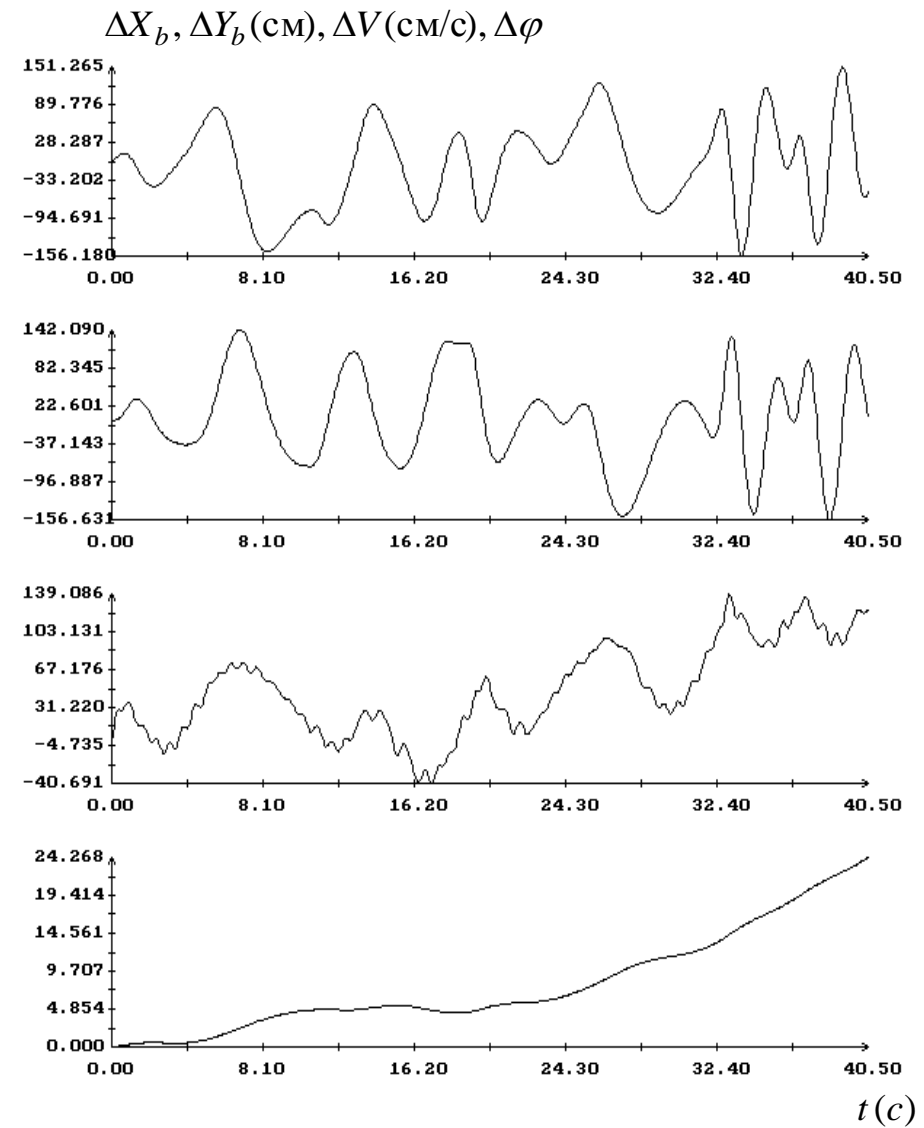
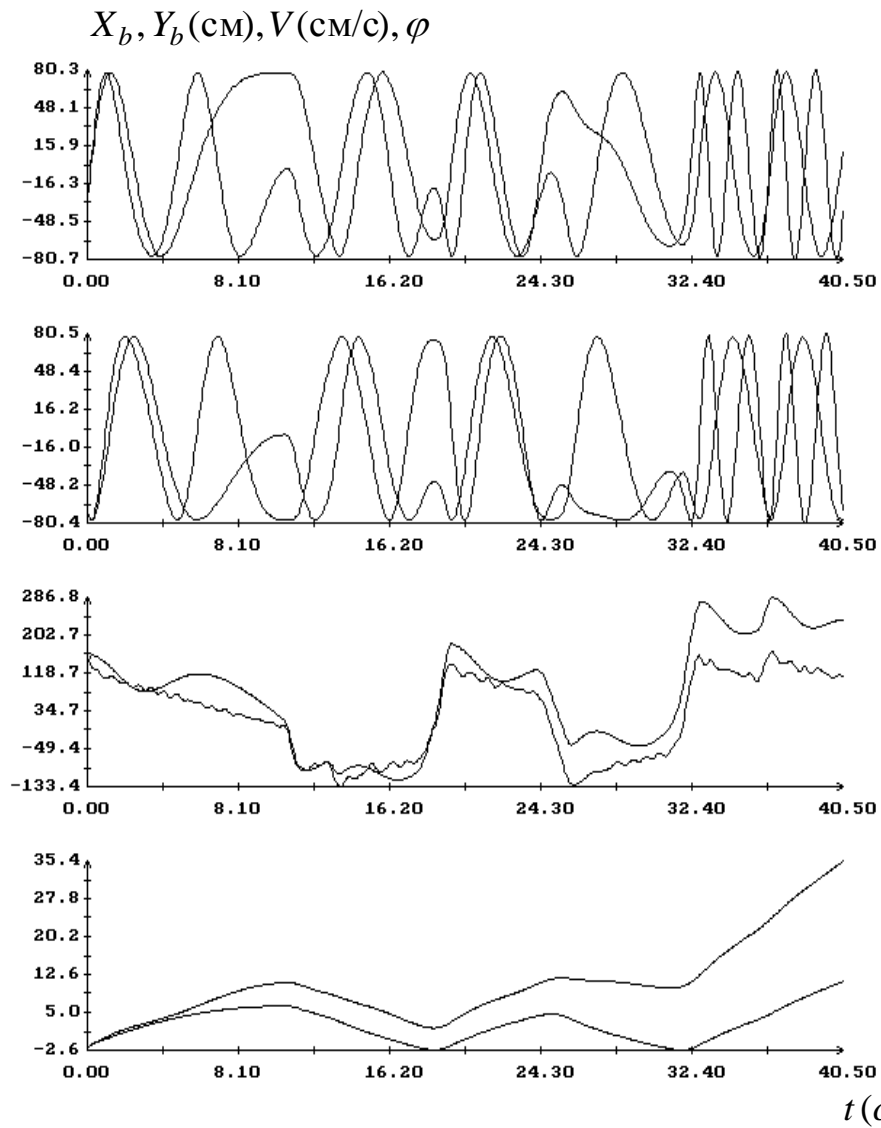


Рис. 12. Результаты интегрирования системы (6). Слева графики решения и аппроксимирующих функций, построенных по видеoinформации. Справа разности переменных в решении и аппроксимирующих функций.