

**Дипломный
проект**

**Исследование резонансных форм
колебаний биомеханических
объектов в естественных условиях**

Проектировал студент гр. 5-33 Лебедева А.А.

Руководитель дипломного проекта доцент, к.т.н. Маслов Л.Б.

Цель дипломного проекта

Провести исследование вибрационных свойств биомеханических объектов на примере большеберцовой кости голени человека в естественных физиологических условиях

Основные задачи дипломного проекта

- ☐ Разработка универсальной виброизмерительной системы на основе микродатчиков ускорений
- ☐ Разработка алгоритма определения вибрационных свойств исследуемого объекта (частоты, формы колебаний)
- ☐ Измерение вибрационных свойств большеберцовой кости на основе кратковременного ударного воздействия
- ☐ Анализ полученных экспериментальных данных с целью определения частот, форм колебаний, параметров диссипации

Литературный обзор вибрационных методов

Три основных метода исследования

- 1) Метод оценки отклика системы на импульсное возбуждение (IFR)
- 2) Метод резонансной диагностики (BRA)
- 3) Метод анализа механического отклика ткани (MRTA)

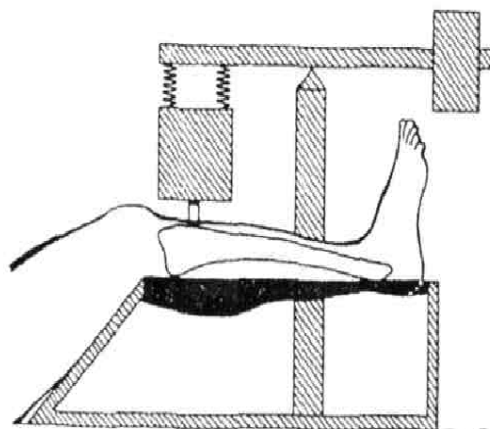
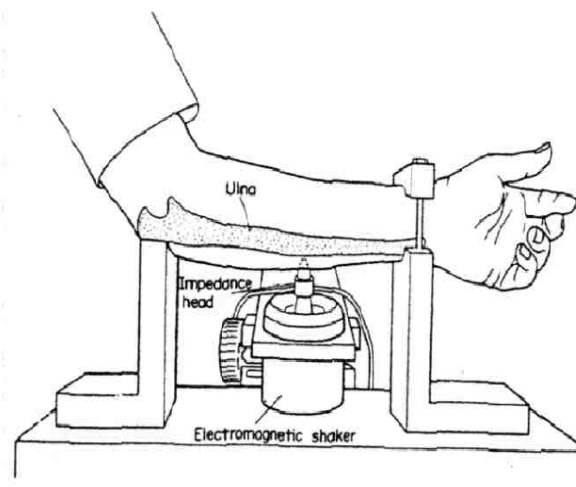


Схема метода
резонансной диагностики
для исследования
большеберцовой кости
голени человека



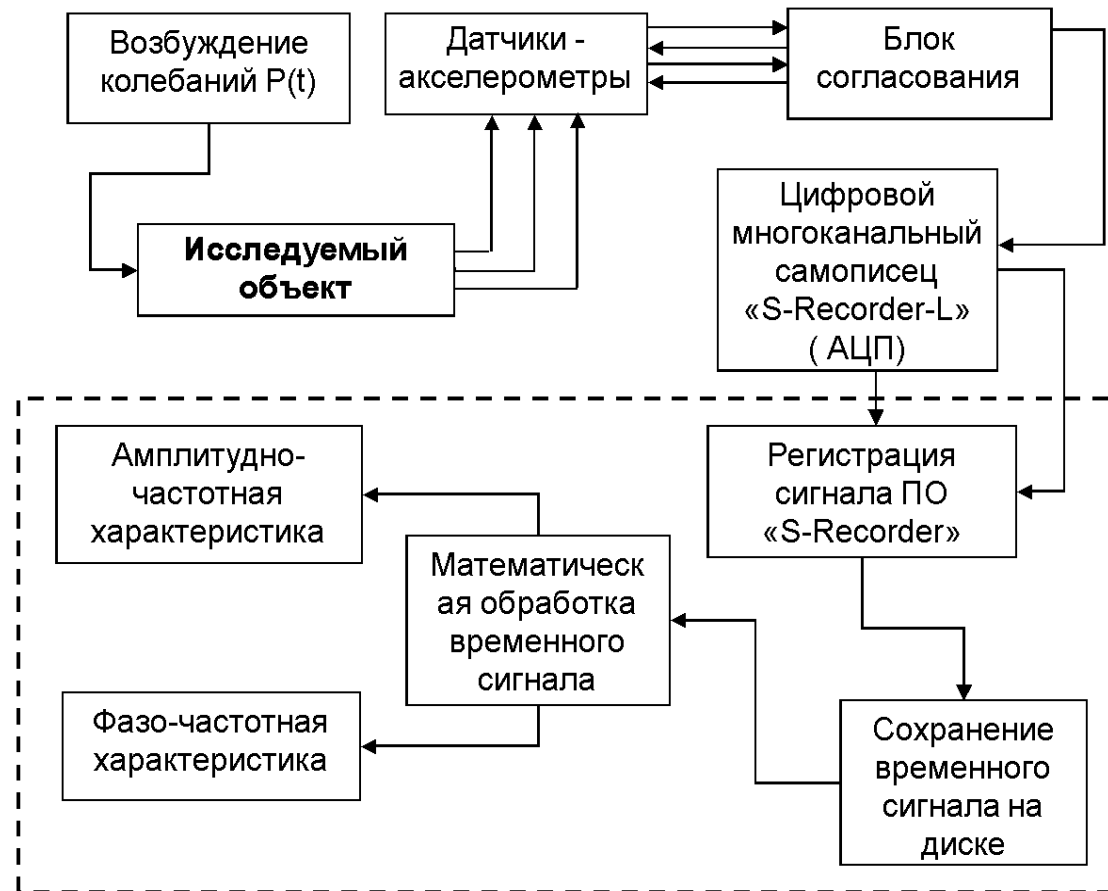
Схема
эксперимента для
определения
формы колебаний
большеберцовой
кости



Техника
механического
импеданса для
определения
резонансных
характеристик
локтевой кости

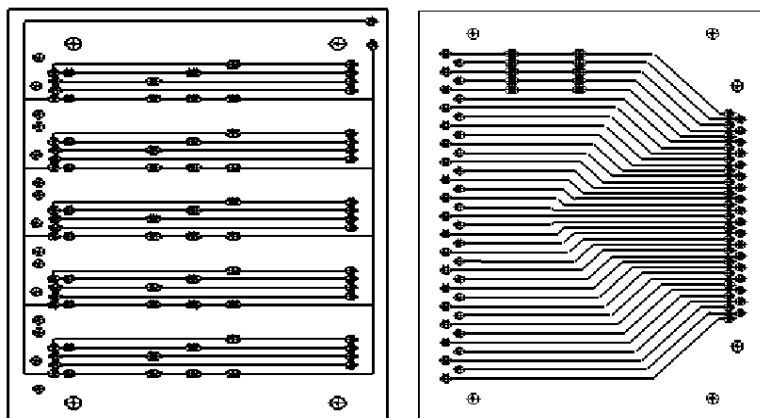
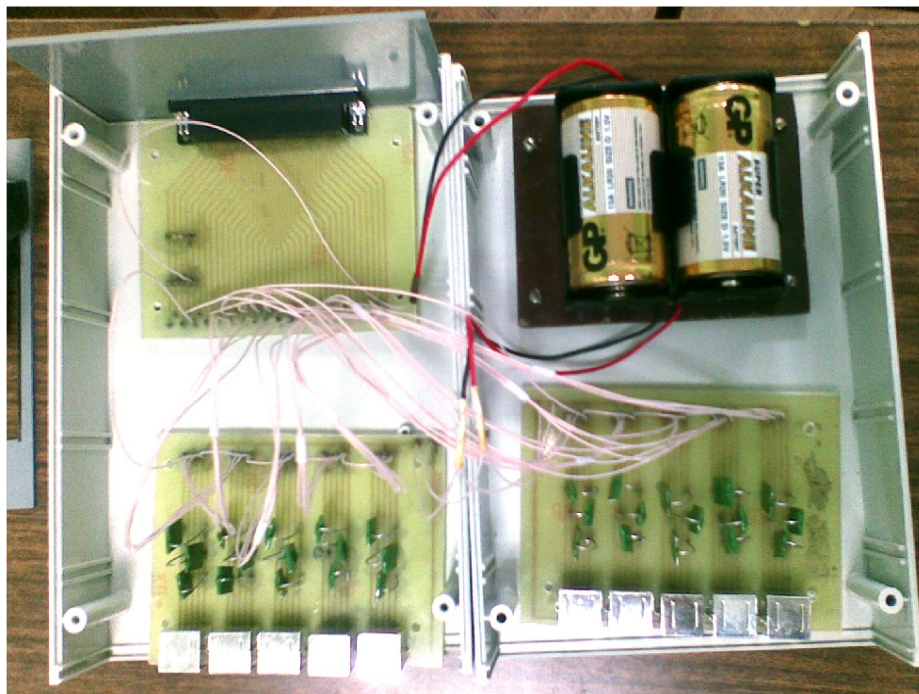
Разработка виброизмерительной системы

Схема измерительного комплекса

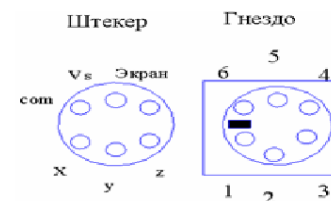


- **Исследуемый объект** – произвольная механическая система
- В качестве **виброприёмников** используются миниатюрные акселерометры на основе MEMS-технологии (микроэлектромеханическая система)
- **Цифровой многоканальный самописец «S-Recorder-L»**
- **Программный комплекс**, обеспечивающий сбор, просмотр, сохранение и экспорт данных для дальнейшей математической обработки
- **Блок согласования**, который необходим для питания акселерометров и коммутации измерительного канала

Блок согласования



Схемы спроектированных плат



Обозначение выводов штекера и соответствующего гнезда

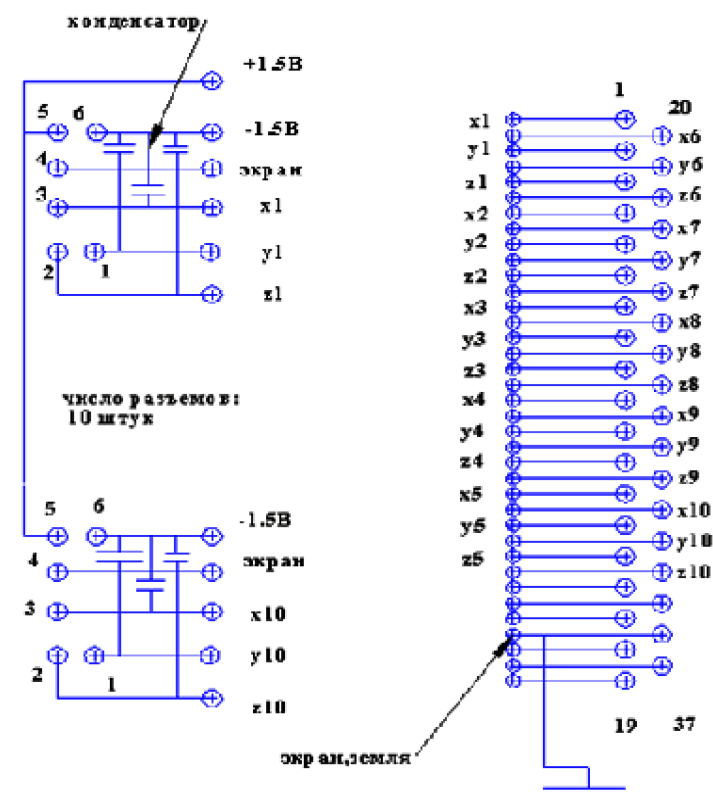


Схема соединения плат в блоке согласования

Математическое моделирование затухающих колебаний

Дифференциальное уравнение движения системы с вязким трением

$$EJ\left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \alpha_2 \frac{\partial^5 u}{\partial x^4 \partial t}\right) + \rho S\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \alpha_1 \frac{\partial u}{\partial t}\right) = 0$$

Общее решение $u(x, t) = \sum_k q_k(t) U_k(x)$

$$\ddot{q}_k + (\alpha_1 + \omega_k^2 \alpha_2) \dot{q}_k + \omega_k^2 q_k = 0$$

$$2\varepsilon_k = \alpha_1 + \omega_{nk}^2 \alpha_2$$

$$\omega_{dk} = \sqrt{\varepsilon_k^2 - \omega_{nk}^2} = \omega_{nk} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_k^2}{\omega_{nk}^2}} = \omega_{nk} \sqrt{1 - \zeta_k^2}$$

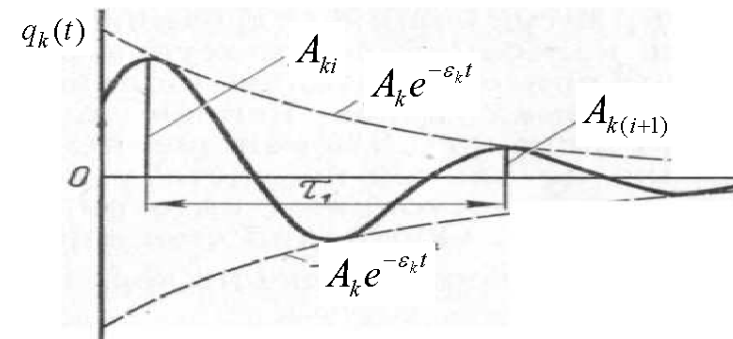
$$q_k(t) = A_k e^{-\varepsilon_k t} \sin(\omega_{dk} t + \varphi_k)$$

$$u(x, t) = \sum_k V_k(x) e^{-\varepsilon_k t} \sin(\omega_{dk} t + \varphi_k)$$

$$V_k(x) = A_k U_k(x)$$

Внутреннее трение $\sigma = E\left(\varepsilon + \alpha_2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right)$

Внешнее трение $R = \alpha_1 \rho S \frac{\partial u}{\partial t}$



Коэффициент демпфирования $\zeta_k = \frac{\varepsilon_k}{\omega_{nk}} = \frac{\alpha_1}{2\omega_{nk}} + \frac{\omega_{nk} \alpha_2}{2}$

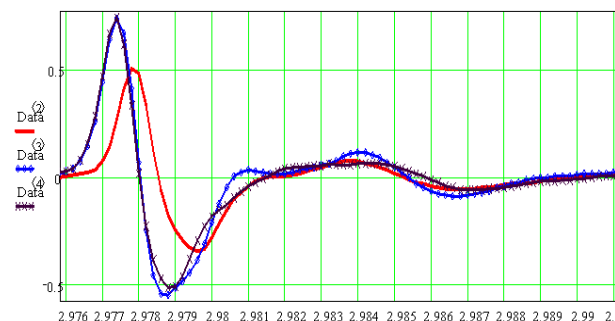
Декремент затухания

$$\delta_k = \ln\left(\frac{A_{ki}}{A_{k(i+1)}}\right) = \varepsilon_k \tau_1 = \varepsilon_k \frac{2\pi}{\omega_{dk}} = \frac{2\pi \zeta_k}{\sqrt{1 - \zeta_k^2}}$$

Добротность $Q_k = \frac{\pi}{\delta_k}$

Алгоритм определения вибрационных свойств системы

- I. Закрепление объекта, установка датчиков в фиксированных точках, приложение ударного воздействия



$$\begin{aligned} a1_n &= a1(t_n), & x &= x1 \\ a2_n &= a2(t_n), & x &= x2 \\ a3_n &= a3(t_n), & x &= x3 \end{aligned}$$

- II. Регистрация временного сигнала с объекта с помощью измерительного комплекса

$$\ddot{u}(x, t) = \sum_{k=1}^3 V_k(x) e^{-\varepsilon_k t} \left[(\varepsilon_k^2 - \omega_k^2) \sin(\omega_{dk} t + \varphi_k) - 2\varepsilon_k \omega_k \cos(\omega_{dk} t + \varphi_k) \right]$$

- III. Аппроксимация временного сигнала в соответствии с математической моделью методом наименьших квадратов

$$\begin{aligned} a1 &= \ddot{u}(x1, t_n) = a1(A_{11}, A_{12}, A_{13}, \dots, \varepsilon_3) \\ a2 &= \ddot{u}(x2, t_n) = a2(A_{21}, A_{22}, A_{23}, \dots, \varepsilon_3) \\ a3 &= \ddot{u}(x3, t_n) = a3(A_{31}, A_{32}, A_{33}, \dots, \varepsilon_3) \end{aligned}$$

- IV. Определение количественных характеристик колебаний

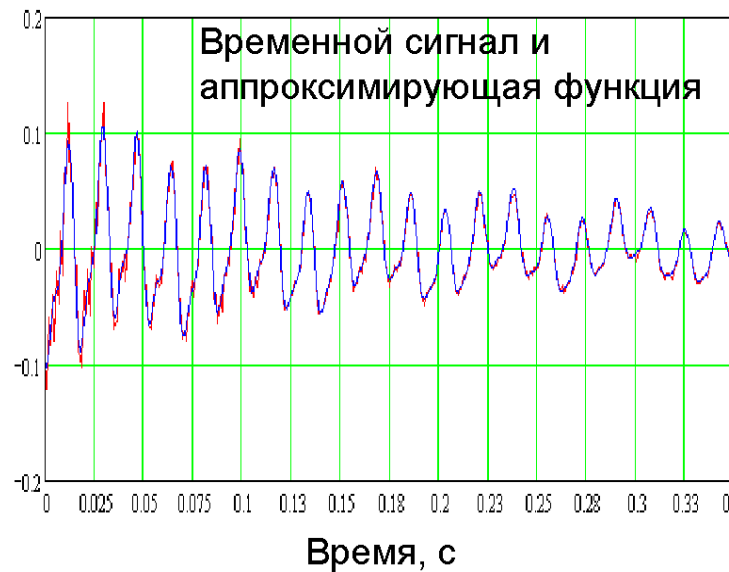
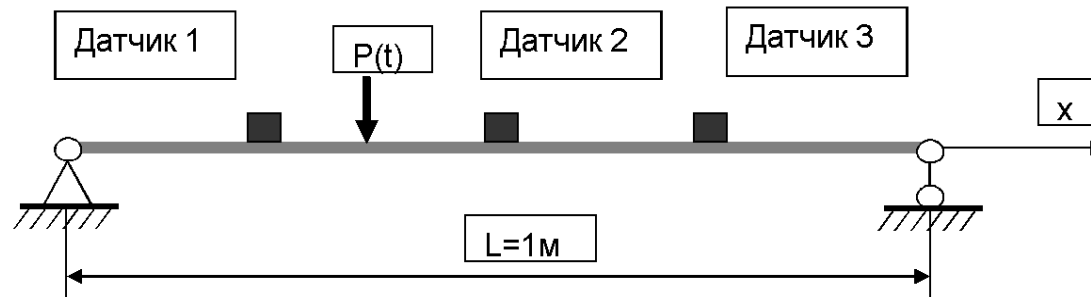
$$A_{ij}, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$$

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \frac{a1_n - a1(A_{11}, A_{12}, A_{13}, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)}{|a1|^2} = \min \\ \sum_{n=1}^N \frac{a2_n - a2(A_{21}, A_{22}, A_{23}, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)}{|a2|^2} = \min \\ \sum_{n=1}^N \frac{a3_n - a3(A_{31}, A_{32}, A_{33}, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)}{|a3|^2} = \min \end{cases}$$

Тестирование измерительного комплекса

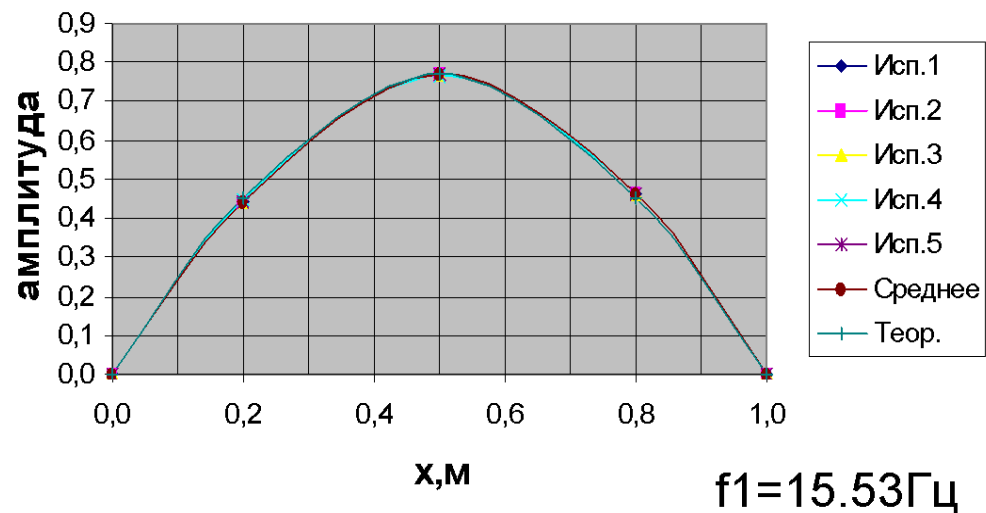
$$s=0.174B/g$$

Расчетная схема

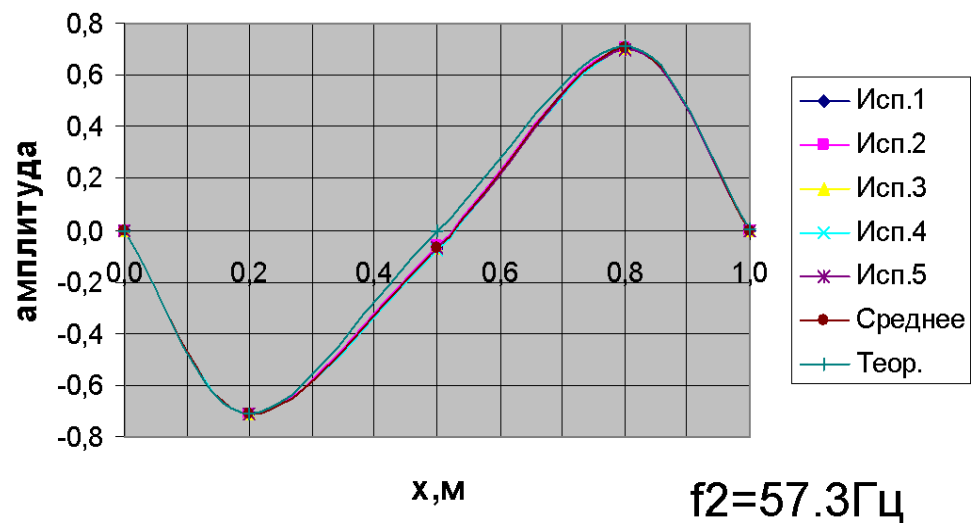


	Ед. изм.	Реал-я №1	Реал-я №2	Реал-я №3	Реал-я №4	Реал-я №5	Среднее
f1	Гц	15,53	15,526	15,528	15,525	15,538	15,53
f2	Гц	57,305	57,338	57,250	57,254	57,359	57,3
f3	Гц	114,82	114,98	114,86	114,74	115,08	114,9
ψ_1	рад	-0,665	1,057	-0,481	1,743	1,901	0,71
ψ_2	рад	1,236	1,415	1,546	1,134	1,683	1,40
ψ_3	рад	5,876	3,359	3,600	4,599	3,474	4,18
ε_1	c^{-1}	0,489	0,520	0,490	0,564	0,695	0,55
ε_2	c^{-1}	3,573	3,311	3,999	2,986	3,195	3,41
ε_3	c^{-1}	4,899	4,654	5,137	4,854	5,497	5,01
δ_1	-	0,0315	0,0335	0,0315	0,0363	0,0447	0,035
δ_2	-	0,0623	0,0577	0,0698	0,0521	0,0557	0,059
δ_3	-	0,0427	0,0405	0,0447	0,0423	0,0478	0,044

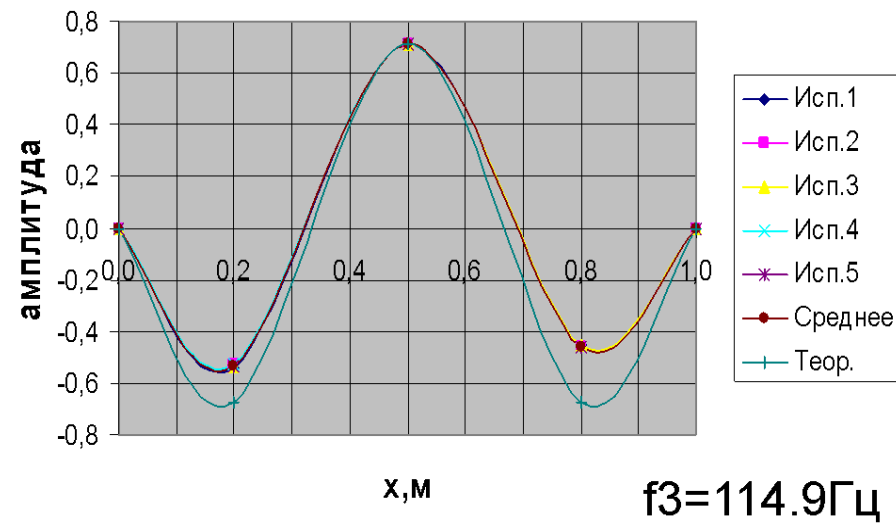
Первая форма колебаний



Вторая форма колебаний

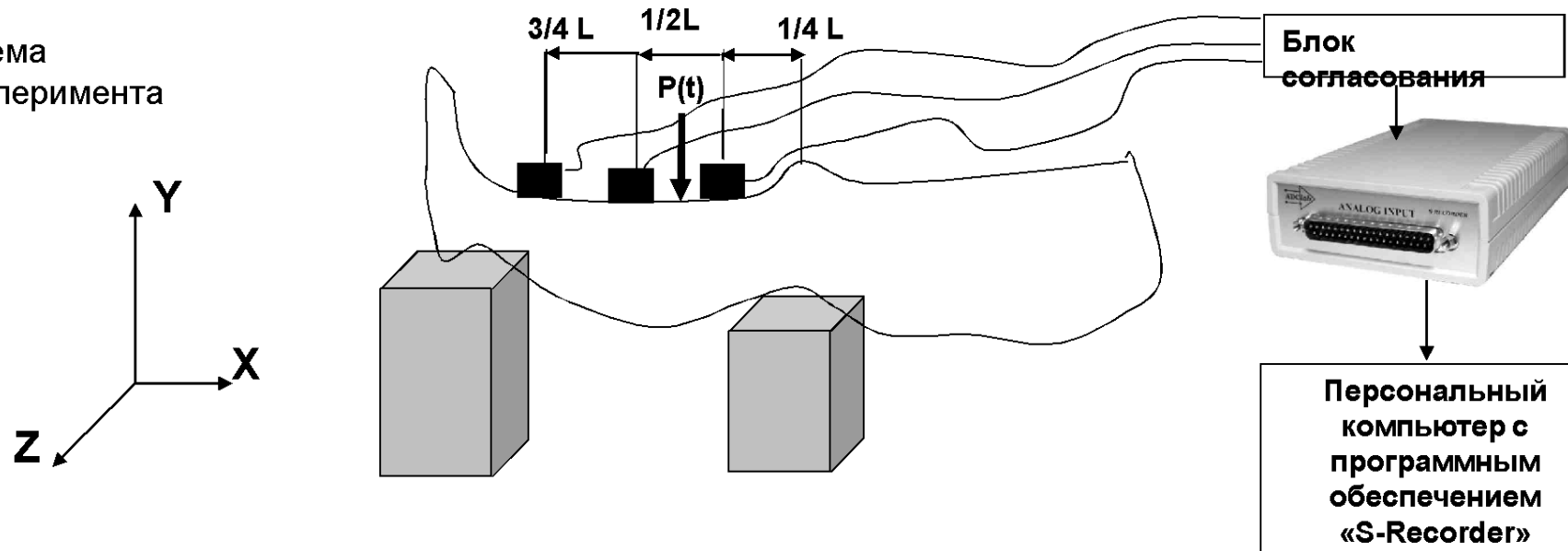


Третья форма колебаний



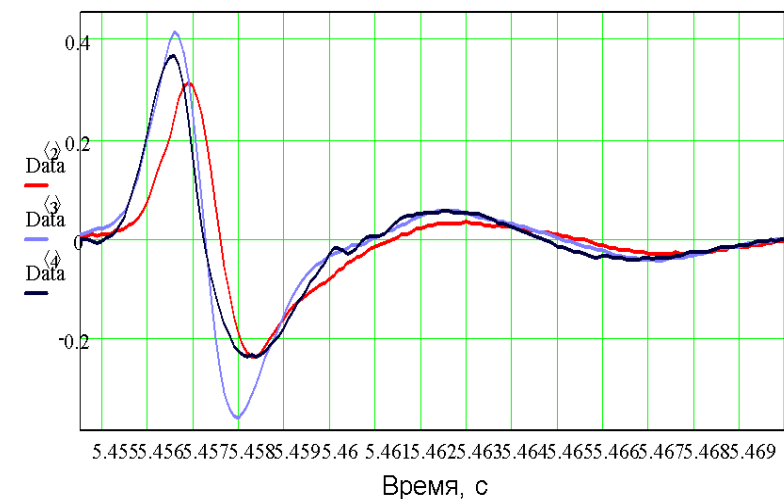
Измерение вибрационных свойств большеберцовой кости

Схема эксперимента



Доброво- лец	Длина кости, см	Окружность ноги, см	Рост, см	Вес, кг
1	37	35	176	70
2	37	37	178	74
3	39	36,5	175	69
4	36	35	170	60
5	34	39	167	63
6	37	36	168	65

Вид временного сигнала с трех датчиков



Анализ полученных экспериментальных данных

Временные портреты движения характерных точек объекта в плоскости (YZ)

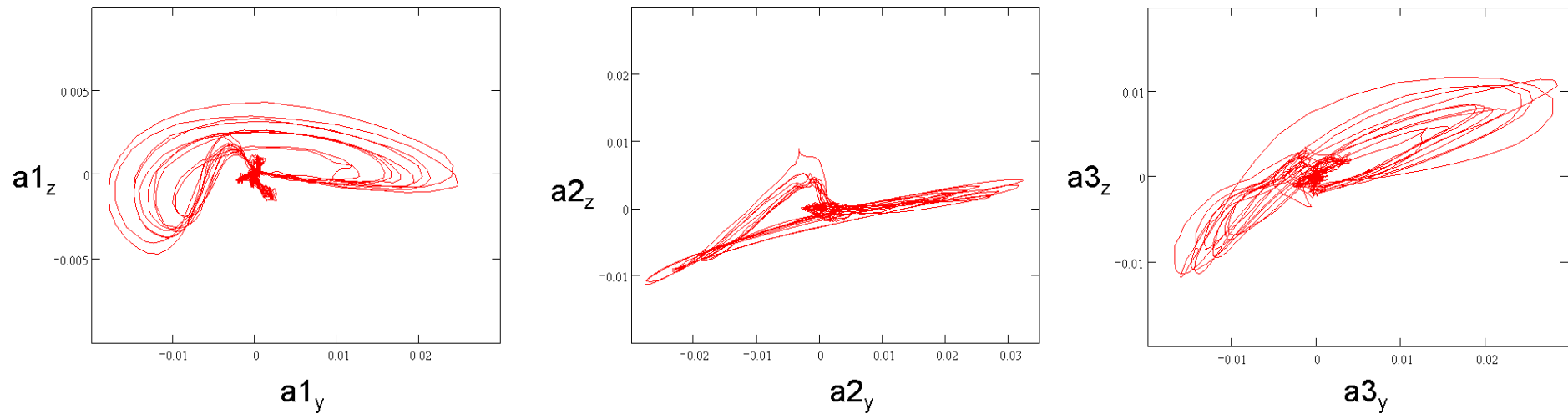
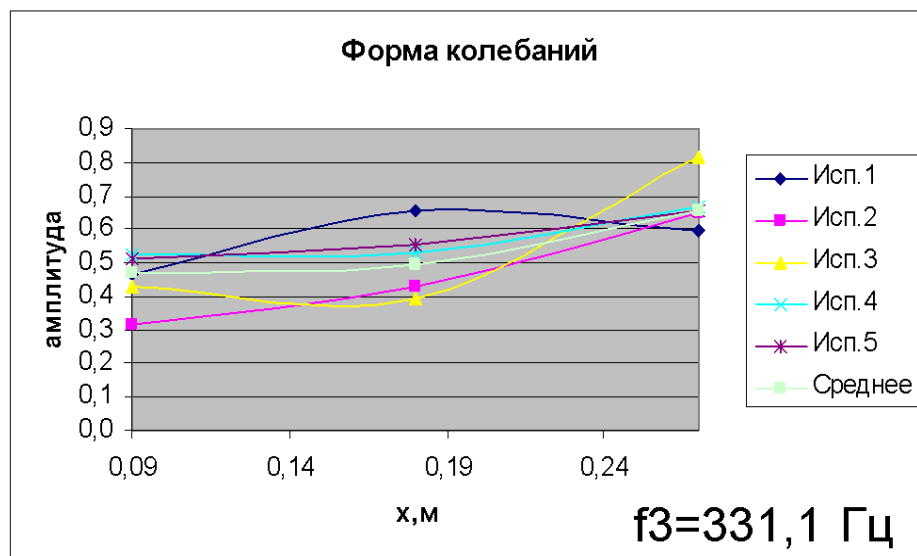
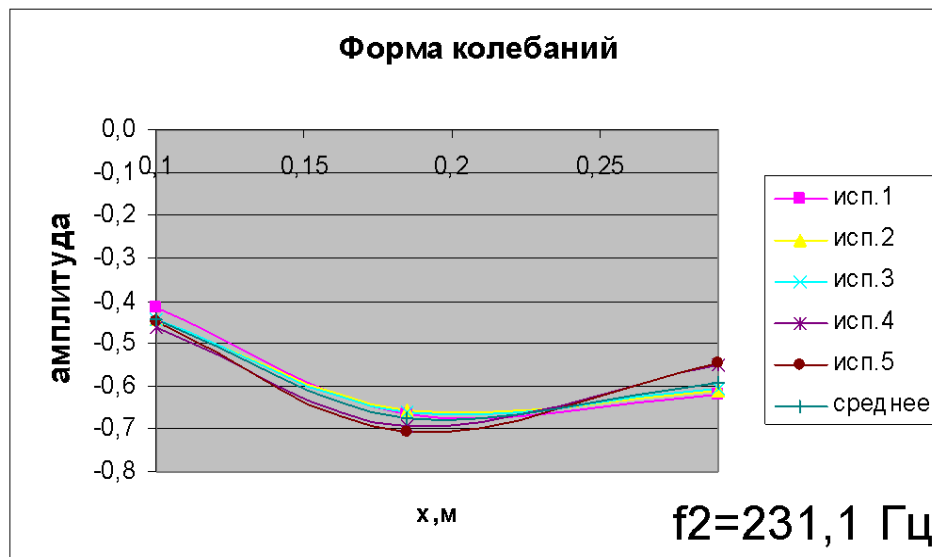
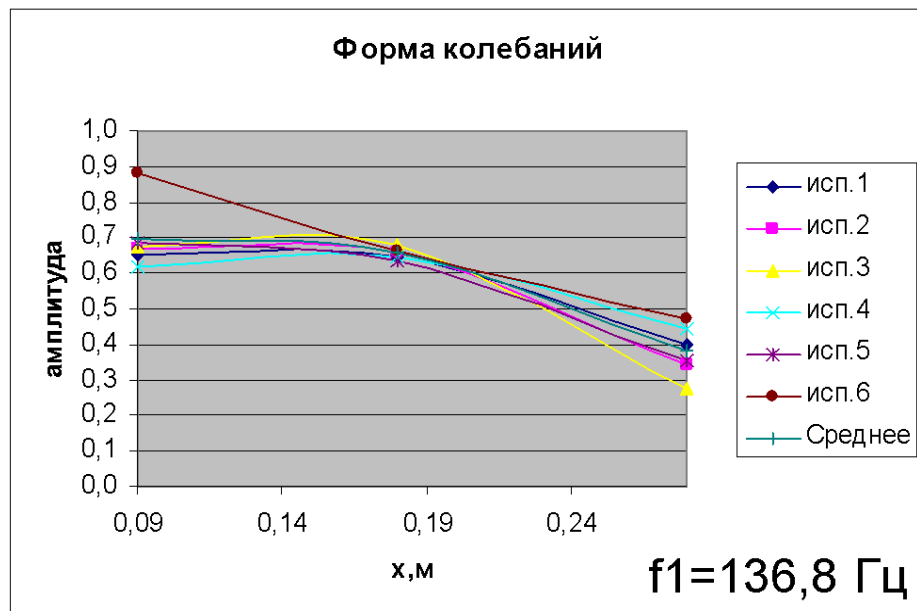


Таблица вибрационных характеристик большеберцовой кости

Найденные величины	Добр.1	Добр.2	Добр.3	Добр.4	Добр.5	Добр.6	Среднее значение
f1,Гц	149,54	138,40	122,40	136,848	121,691	148,372	136,761
f2,Гц	230,62	224,46	212,11	233,806	237,689	212,746	231,125
f3,Гц	364,35	344,69	279,20	344,026	326,274	353,414	331,103
ζ_1	0,382	0,762	0,548	0,500	0,548	0,392	0,522
ζ_2	0,362	0,167	0,219	0,537	0,321	0,238	0,307
ζ_3	0,400	0,449	0,254	0,487	0,398	0,260	0,375

Анализ полученных экспериментальных данных

Формы колебаний большеберцовой кости



Результаты дипломного проекта

- ❑ Разработана универсальная виброизмерительная система на основе микродатчиков ускорений для исследования динамических свойств механических и биомеханических структур.
- ❑ Разработан алгоритм определения вибрационных свойств биомеханических систем
- ❑ Проведены измерения и анализ вибрационных свойств металлической балки и большеберцовой кости голени человека на основе разработанного алгоритма. Определены основные частоты и формы колебаний исследуемых объектов.

Полученная система может быть использована для диагностики механического состояния различных динамических систем. В частности, для количественной оценки физиологического состояния большеберцовой кости в процессе восстановления после операции остеосинтеза дополнительно к методам рентгенографии.

Результаты дипломного проекта опубликованы и представлены:

- Региональная НТК студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ-2009», Иваново, 2009
- Международная научная студенческая конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу- творчество молодых», Йошкар-Ола, 2009
- Статья «Исследование резонансных свойств биологических объектов в нормальных физиологических условиях» в журнал «Вестник ИГЭУ»