

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

М.С. ГАСПАРОВ, А.Н. КРЮЧКОВ,
А.Б. ПРОКОФЬЕВ, Е.В. ШАХМАТОВ

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГИДРОСИСТЕМ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 681.2.081 (075)
ББК 39.965.2
Г22



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Астафьев
д-р техн. наук, проф. А.И. Ермаков

Г22 **Гаспаров М.С.**
**Динамические измерения и обработка экспериментальных
данных при испытаниях гидросистем: учеб. пособие /**
М.С. Гаспаров и др. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,
2006. – 128 с.

ISBN 5-7883-0402-4

Учебное пособие содержит сведения о методах и средствах проведения динамических измерений, описание элементов измерительных цепей измерения пульсационных процессов в рабочей среде гидросистем, описание первичных преобразователей, алгоритмов их тарировки, описание методик измерения пульсаций давления и шумовых характеристик гидросистем, использования интенсиометрии при проведении испытаний шумовых характеристик гидросистем. В учебном пособии представлена классификация измерений, средств и погрешностей измерений. Значительное внимание в пособии уделено описанию методов обработки динамических сигналов и экспериментальных данных.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 15.08.02 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» и может быть использовано при подготовке к лабораторным работам, в дипломном проектировании.

УДК 681.2.081 (075)
ББК 39.965.2

ISBN 5-7883-0402-4

© Гаспаров М.С., Крючков А.Н.,
Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	8
1. Основы динамических измерений	9
1.1. Основные понятия в области динамических измерений. Классификация измерений	9
1.2. Классификация погрешностей измерения	14
1.3. Классификация средств измерений	17
2. Элементы измерительных цепей пульсаций давления рабочей среды	21
2.1. Общие сведения об измерительной цепи	21
2.2. Датчики измерения пульсаций давления	22
2.3. Усилители	35
2.3.1. Аппаратура тензометрическая на несущей частоте 4АНЧ-22	35
2.3.2. Усилитель заряда РШ - 2734	38
2.4. Тарировка датчиков	38
3. Проведение измерений пульсаций давления	47
4. Измерение акустических характеристик гидро - и пневмосистем	52
4.1. Описание характеристик и эксплуатации измерителя шума и вибрации ВШВ-003-М2	57
4.1.1. Устройство и принцип работы ВШВ-003-М2	58
4.1.2. Подготовка ВШВ-003-М2 к работе	63
4.1.3. Порядок работы с ВШВ - 003 - М2	64
4.2. Методика измерения звукового давления излучения	69
5. Акустическая интенсивметрия и ее применение при исследовании шумовых характеристик гидро- и пневмосистем	75
5.1. Метод акустической интенсивности	75
5.2. Аппаратные методы определения интенсивности звука	77

5.3	Методы измерения интенсивности звука.	82
5.4	Алгоритм измерения акустических характеристик на базе метода интенсивности	84
5.4.1.	Показатель временной нестабильности звукового поля.	84
5.4.2.	Показатель давления — интенсивности звука на из- мерительной поверхности.	85
5.4.3	Показатель отрицательной составляющей звуковой мощности.	85
5.4.4	Показатель неравномерности поля	86
5.5	Построение карт интенсивности звука	86
6	Методы обработки динамических сигналов и экспе- риментальных данных.	98
6.1	Виды сигналов.	98
6.2	Обработка сигналов в пакете Matlab.	99
6.2.1	Непараметрические методы.	100
6.2.2	Параметрические методы.	104
6.2.3	Весовые функции (окна)	108
6.2.4	Функции корреляционного анализа.	109
6.2.5	Кепстральный анализ.	110
6.2.6	Программа обработки сигналов - SPTool (Signal Processing Tool)	112
6.3	Время-частотное разложение сигнала.	113
6.3.1	Оконное преобразование Фурье.	113
6.3.2.	Непрерывный вейвлет-анализ.	115
	Заключение.	119
	Рекомендуемая литература.	120
	Приложение 1.	122
	Приложение 2.	123
	Приложение 3.	124
	Приложение 4.	126

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A - эквивалентная площадь звукопоглощения;

E - звуковая энергия;

I_0 - нулевой уровень интенсивности звука;

G_{max} - максимальный показатель направленности;

f - частота;

$I(t)$ - мгновенная интенсивность звука;

K_{1A} - коррекция на фоновый шум;

K_{2A} - показатель акустических условий;

K_{3A} - локальная коррекция на акустические условия;

L_A - уровень звукового давления по характеристике A ;

L_I - уровень интенсивности звука;

L_N - уровень мощности звука;

L_p - уровень звукового давления;

N - полная звуковая мощность;

N_0 - нулевой уровень звуковой мощности;

P_0 - пороговое значение звукового давления;

$P_{скз}$ - среднеквадратичное (эффективное) значение звукового давления;

$p(t)$ - мгновенное значение звукового давления;

R - расстояние;

S - площадь;

T - время интегрирования;

$v(t)$ - мгновенное значение колебательной скорости частицы в звуковой волне;

Φ - коэффициент направленности;

G_{max} - максимальный показатель направленности;

f - частота.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные тенденции развития неизбежно ставят задачу повышения надёжности гидромеханических систем любых технических объектов. В настоящее время эти системы характеризуются сложной структурой, содержат десятки агрегатов. К гидросистемам предъявляются жёсткие требования по быстрдействию, точности и стабильности работы в условиях высоких рабочих давлений (до 35 МПа), которые имеют тенденцию к дальнейшему росту. Одним из факторов снижения работоспособности гидромеханических систем является наличие в них динамических нагрузок – пульсаций давления рабочей среды, вибрации арматуры и агрегатов и акустического шума (последний фактор необходимо учитывать при проектировании гидромеханических систем наземного оборудования, транспорта). Современное гидромеханическое оборудование является источником всех вышеперечисленных видов динамических нагрузок.

Значительное внимание при оценке и прогнозе работоспособности гидросистем уделяется исследованиям их динамических характеристик. Динамические процессы в гидросистемах характеризуются высокими скоростями и частотами, достигающими тысяч герц. Измерение динамических характеристик гидросистем требует применения современных цифровых технических средств, принципы работы которых, а также методы их использования изучаются в курсе «Динамические измерения и обработка экспериментальных данных».

Зарегистрировать временные реализации динамических процессов – это лишь одна из задач исследования динамических (виброакустических) характеристик. Огромное значение в научных исследованиях и инженерной практике уделяется методам анализа и обработки экспериментальных данных. Эта задача также широко освещена в настоящем учебном пособии.

Авторам представляется, что в настоящем учебном издании впервые обобщён опыт использования современных средств измерения характеристик динамических процессов в гидросистемах, а также анализа экспериментальных данных, что позволит студентам получить комплексное представление о текущем состоянии в области динамических измерений и обработки экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Начало разработки теоретических вопросов динамических измерений было обусловлено потребностями электроизмерительной техники, в особенности осциллографии. В числе первых нужно упомянуть появившиеся в 80 – 90 – годах XIX века работы А. Крузо и А. Блонделя, посвящённые динамике измерительных элементов осциллографов. Далее следует указать на работы Е. Орлиха, Х. Буша, Вертхайма – Соломонсона, Х. Целлиха, В. Хоффмана, Г.Д. Робинсона. Список авторов может быть значительно расширен с учётом последних достижений в данной области науки. Нельзя не отразить особенность науки динамических измерений, которая заключается в том, что её теория динамических измерений находится на стыке смежных дисциплин и поэтому широко заимствуют методы этих дисциплин. Так, исследование точности измерительных преобразователей и регистрирующих приборов, а также определение динамических свойств сложных разветвлённых гидросистем на основе известных свойств компонентов проводятся методами анализа систем. При этом в зависимости от свойств физического объекта, он может рассматриваться как система линейная или нелинейная, аналоговая или дискретная, с сосредоточенными или распределёнными параметрами. Соответственно, в методах исследования используется различный математический аппарат: линейные и нелинейные дифференциальные и разностные уравнения, обыкновенные дифференциальные уравнения и дифференциальные уравнения в частных производных, преобразования непрерывные и дискретные, интегральное и матричное исчисление и т. д.

1 ОСНОВЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение является основным процессом получения объективной информации о свойствах разнообразных материальных объектов как при фундаментальных исследованиях, так и при практической деятельности человека. На основе результатов измерений в науке, во всех областях народного хозяйства, военной техники и т. д. принимаются конкретные решения.

Динамические измерения, т.е. измерения с использованием средств измерений в динамическом режиме, получают всё большее распространение в технике и научных исследованиях. Эти измерения связаны в первую очередь с изучением закономерностей протекания быстропеременных физических процессов в исследуемых объектах. Поэтому роль динамических измерений особенно велика при испытаниях гидравлических и пневматических систем, характерное время процессов в которых изменяется от десятых долей секунды до одной миллисекунды.

Важной задачей, связанной с проведением динамических измерений, является обработка экспериментальных данных, которая использует специфический математический аппарат, не зависящей от физической природы измеряемых величин.

1.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ОБЛАСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерениям подвергается физическая величина – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее для многих физических объектов в качественном отношении, но индивидуальное для каждого из них в количественном отношении. Например, плотностью характеризуют многие твёрдые и жидкие вещества и материалы, хотя каждый из образцов материалов и веществ имеет свою конкретную величину плотности.

Истинное значение – это значение, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину. Действительное значение – это значение, полученное экспериментальным путём и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Измерение – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, с целью нахождения соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с её единицей и получения значения этой величины. Например, сравнение показания линейки с размерами какой-либо детали. В данном случае линейка является «хранителем» единицы физической величины.

Рассмотрим классификацию измерений по различным признакам (рисунок 1.1).

По характеру влияния на результат измерения длительности переходных процессов средств измерения измерения делятся на *статические* и *динамические*.

Статические измерения – это измерения физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения. *Динамические измерения* – это измерения изменяющейся по размеру физической величины.

По способу получения результатов измерения могут быть *прямыми*, *косвенными*, *совместными* и *совокупными*.

Прямые измерения – в этом случае искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных. Формула прямых измерений:

$$Q = x,$$

где Q - истинное значение физической величины;

x - измеренное значение физической величины.



Рисунок 1.1 - Классификация измерений

К прямым относятся, например, измерение диаметра трубопровода с помощью штангенциркуля, измерения давления в гидроматриале с помощью манометра и т.д.

Косвенные измерения – это измерения, при которых осуществляется определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Формула косвенных измерений:

$$Q = F(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

Примеры косвенных измерений:

- определение мощности насоса путём измерения давления в линии нагнетания и расхода рабочей жидкости;
- определение граничного импеданса и коэффициента звукопоглощения путём измерения пульсаций давления (частоты, амплитуды и фазового сдвига) двумя датчиками динамического давления.

Совместные измерения – это проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Например, определение коэффициента, связывающего зависимость расхода через дроссель от перепада давления на нем; определение зависимости вибрации насоса от давления рабочей жидкости на его входе.

Совокупные измерения – это проводимые одновременно измерения нескольких величин, при которых искомые значения величин находятся путем решения системы уравнений, получаемых при измерении этих величин в различных сочетаниях. Например, определение вклада различных источников в общий уровень шума в заданной точке путём последовательной частичной звукоизоляции отдельных источников и решения полученной системы алгебраических уравнений.

Совместные и совокупные измерения, по существу, также являются косвенными, поскольку результат измерения получается с помощью ряда простых измерений и вычислений соответствующих зависимостей, т. е. косвенно. Поэтому разделение измерений по способу получения их результатов на косвенные, совместные и совокупные является несколько условным и обусловлено разными способами обработки и получения результатов косвенных измерений.

Измерение – это познавательный процесс, заключающийся в сравнении путём физического эксперимента данной величины с некоторым её значением, принятым за единицу сравнения. Такое

понимание измерения сформулировал один из основоположников отечественной метрологии М.Ф. Малышев.

Измерения максимально возможной точности – измерения, которые обеспечивают достижимую в настоящее время, при существующем уровне техники и методах обработки результатов измерений, точность (или минимальную погрешность).

Контрольно–поверочные измерения – измерения, при которых погрешность полученного результата не должна превышать заданное значение с некоторой вероятностью.

Указанные виды измерений относятся к *лабораторным* и характеризуются тем, что погрешность каждого результата измерения оценивается по данным, полученным в процессе самого измерения.

Измерения, проводимые на практике, следует отнести к *техническим*, которые характеризуются тем, что выполняются в определённых условиях по методике, разработанной и исследованной заранее до проведения измерения.

По способу выражения результатов различают измерения *абсолютные* и *относительные*.

Абсолютное измерение основано на прямом измерении одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

Относительное измерение – измерение отношения величины к одноимённой величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноимённой величине, принимаемой за исходную.

Одним из признаков классификации методов измерения может быть, например, способ обработки сигнала *средства измерения*. Так разделяют *средства измерения*, основные на *аналоговом* и *цифровом* (дискретном) *методах обработки сигналов*.

Измерения можно характеризовать рядом понятий, более детально отражающих качество измерения, - это *правильность*, *схо-*

димось и воспроизводимось измерений.

Правильность измерений – качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в их результатах.

Сходимость измерений – близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и одинаково тщательно. Это качество измерений характеризует в основном близость к нулю случайной погрешности измерений.

Воспроизводимость измерений – близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, средствами и операторами, в разное время, но приведённых к одним и тем же условиям измерений (температура, давление, расход рабочей жидкости и т. д.).

1.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Значение физической величины, которое определяется в процессе измерения, представляет собой некое объективное свойство предмета, явления и т. д., которое характеризуется истинным значением физической величины. Результат измерения – это продукт познания, представляющий собой приближённую оценку истинного значения. Математически погрешность измерения Δ записывается как разность между истинным значением физической величины Q и результатом измерения x :

$$\Delta = x - Q.$$

При проведении измерений в общей погрешности измерения явно проявляются две её составляющие: *случайная* и *систематическая* (рисунок 1.2).

Случайная погрешность – составляющая погрешность результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведённых с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины. Случайные

погрешности при определении их в разные моменты времени оказываются независимыми друг от друга.

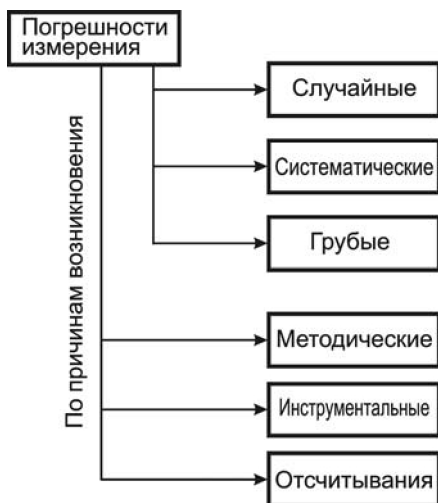


Рисунок 1.2 - Классификация погрешностей измерения

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. Систематические погрешности обусловлены, как правило, конструктивно – технологическими особенностями средства измерения, влиянием оператора, снимающего показания, влиянием условий эксплуатации и т. д.

На фоне случайных и систематических погрешностей иногда появляется грубая погрешность – промах. Это погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Математическая обработка результатов измерения позволяет установить непричастность промахов к случайным погрешностям.

Следует отметить, что случайные погрешности невозможно устранить, их можно только уменьшить за счёт увеличения числа измерений. Систематические погрешности можно частично исключить, изучая их поведение во времени.

По причинам возникновения погрешности измерения разделяют на три вида: *методическую, инструментальную и субъективную* (см. рисунок 1.2).

Методическая погрешность измерения – это составляющая систематической погрешности измерения, возникающая из-за несовершенства принятого метода измерения. Самая распространённая методическая погрешность - упрощение принимаемой модели измерения. Например, в измерительной модели принимается, что измеряются пульсации давления в каком-либо сечении трубопроводной линии. Однако мембрана измерительного преобразователя пульсаций давления имеет определённый размер в пространстве, на котором фактически осредняются все амплитуды и фазы волны давления. Методические погрешности обусловлены также нелинейностью зависимости сигнала, поступающего на вход средства измерения, от изменения физической величины, а кроме того взаимным влиянием измерительного объекта и средства измерения.

Инструментальная погрешность измерения – это составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерения. Например, инструментальная погрешность может быть обусловлена нелинейностью преобразования сигнала, ограниченностью динамического диапазона средства измерения, инерционностью средства измерения, условиями эксплуатации, в том числе влиянием окружающей температуры, уровнем электромагнитных помех, влиянием электронных шумов, колебанием напряжения в электрической сети и т. д. на метрологические характеристики средства измерения. К инструментальным погрешностям следует также отнести погрешности из-за градуировки, калибровки и поверки средства измерения. При этом погрешность

эталона или стандартного образца, с помощью которых настраивается или поверяется средство измерения, включается в состав инструментальной погрешности средства измерения.

Субъективная погрешность измерения – это составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора. Например, при отсчитывании показаний средства измерений в аналоговом виде большое значение имеет правильное расположение оператора по отношению к показывающему устройству.

1.3 КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Комплекс средств измерений динамических процессов представляет собой совокупность унифицированных функциональных устройств и приборов, характеризующихся информационной, метрологической, конструктивной, технологической и эксплуатационной совместимостью и нормализованных по выполняемым функциям, входным, выходным, управляющим и другим основным параметрам. Данный комплекс обеспечивает:

- задание и воспроизведение колебаний;
- преобразование получаемой измерительной информации в нормализованные сигналы;
- представление сигналов в виде, удобном для управления динамическими процессами и их контроля при исследованиях, испытаниях и эксплуатации;
- построение на основе цифровых вычислительных машин информационно–измерительных систем.

Обобщенная классификация средств измерения представлена на рисунке 1.3.

Устройства задания и управления колебаниями предназначены для формирования синусоидального, узко- и широкополосного случайных шумовых сигналов и спектров ударных импульсов различной формы. Их используют также для набора и реализации программ задания параметров динамических процессов, управления

режимами или стабилизации режимов при испытаниях оборудования в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. В состав устройств задания и управления колебаниями входят устройства формирования возбуждающего сигнала и управления им.

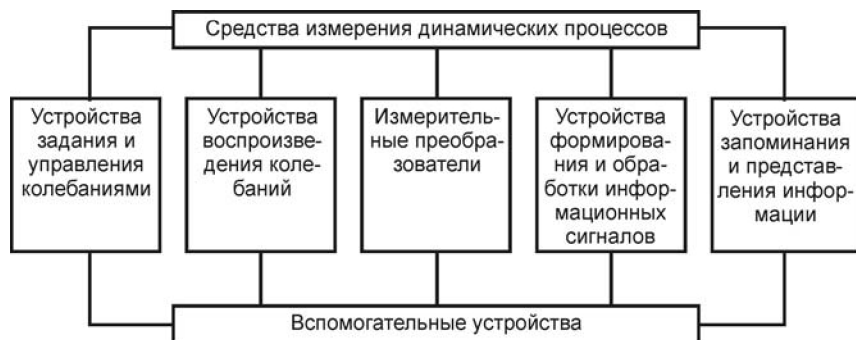


Рисунок 1.3 - Обобщенная классификация средств измерений

Устройства формирования возбуждающего сигнала разделяют на устройства формирования периодических, одиночных и случайных сигналов и унифицированные цифроаналоговые формирователи.

В состав устройств формирования периодических сигналов входят генераторы синусоидальных сигналов и генераторы периодических колебаний. Устройства формирования случайных процессов включают генераторы белого и розового шумов, устройства задания отдельных характеристик случайных процессов, а также формирующие фильтры. Формирующие фильтры представляют собой набор фильтров верхних и нижних частот, октавных, треть-октавных, следящих, пропускающих, заграждающих, полосовых и т. д. Универсальные цифровые формирователи состоят из анализаторов и синтезаторов, действие которых основано на использовании быстрого преобразования Фурье.

Устройства воспроизведения колебаний предназначены для усиления задающих электрических сигналов до требуемой мощно-

сти, а также для преобразования усиленных задающих электрических сигналов в перемещения подвижных частей вибростендов, динамиков, пульсаторов рабочей жидкости, ударных стендов и других установок.

Измерительные преобразователи предназначены для преобразования параметров давления и расхода рабочей жидкости, вибрации, удара и шума в соответствующие электрические сигналы. По физическому принципу различают преобразователи:

- действие которых основано на эффекте фотоупругости;
- пьезоэлектрические;
- ёмкостные;
- тензометрические;
- вихревые;
- индуктивные;
- индукционные;
- магниторезисторные;
- мехатронные;
- на эффекте Хцлл;
- интерферанционные;
- на эффекте Доплера;
- дифракционные;
- фотоэлектрические;
- позиционно-чувствительные;
- голографические;
- радиоволновые;
- радиационные;
- ультразвуковые и т. д.

В зависимости от способа съема информации различают *контактные* и *бесконтактные преобразователи*.

Устройства формирования и обработки информационных сигналов предназначены для усиления и измерения электрических сигналов; для выделения их на фоне помех, нормирования и ста-

стистического анализа измеряемых параметров пульсационных процессов в рабочей жидкости, вибрации, удара, акустических шумов.

В состав устройства формирования информационных сигналов входят предварительные усилители заряда и напряжения, аттенюаторы, нормализаторы, фильтры, функциональные преобразователи и. т. п.

Устройства обработки информационных сигналов состоят из амплитудных и фазовых селекторов, измерителей пикового, эффективного, среднего значения, фазы, частоты и длительности ударных импульсов, параметров случайных процессов.

Устройства вторичной обработки, запоминания и представления информации предназначены для индикации информации в аналоговой и цифровой форме, регистрации и запоминания этой информации, преобразования информации из цифровой формы в аналоговую и из аналоговой в цифровую, привязки информационных сигналов ко времени, сравнения информационных сигналов с заранее заданным значением параметра и выработки управляющего сигнала, коммутации каналов измерения, задания программ работы измерительной и испытательной аппаратуры и для сопряжения с компьютером.

Вспомогательные устройства предназначены для расширения функциональных возможностей измерительной и испытательной аппаратуры, обеспечения энергоснабжения, улучшения условий эксплуатации и других целей. К вспомогательным устройствам относятся источники питания, средства связи и коммутации (кабели, разъёмы), устройства интерфейса, конструктивные элементы, устройства сигнализации, охлаждения, защиты и крепления измерительных преобразователей и др.

2 ЭЛЕМЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

Любая измерительная система представляет собой совокупность приборов и аппаратуры. На рисунке 2.1 приведена структурная схема системы измерений пульсаций давления рабочей жидкости. Сигналы от исследуемого объекта 1 и измерительных преобразователей 2 через усилитель 3 поступают в виде аналоговых сигналов напряжения в аналого–цифровой преобразователь 4. Аналого–цифровые преобразователи (АЦП) являются устройствами, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые сигналы, пригодные для обработки цифровыми устройствами, например, персональным компьютером 5 (см. рисунок 2.1).

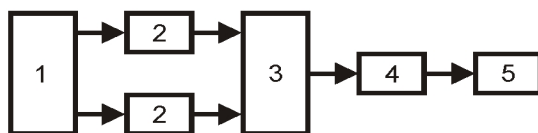


Рисунок 2.1 - Схема измерительной цепи:

*1 - исследуемый объект; 2 - измерительные преобразователи; 3 - усилитель
4- АЦП; 5 - персональный компьютер*

Используемый в данной лабораторной работе АЦП Е-330 (производитель ЗАО «L-card», г. Москва), внешний вид которого представлен на рисунке 2.2, является внешним модулем, подключаемым к принтерному порту компьютера.

На модуль Е-330 может быть подано до 32 аналоговых сигналов. Разрядность АЦП - 12 бит. Диапазон входных сигналов - $\pm 5,12$ В. Максимальная частота преобразования - 500 кГц. Для исключения возможных повреждений модуль Е-330 заключён в корпус 1, который имеет разъёмы 2 для подключения сигналов. К пер

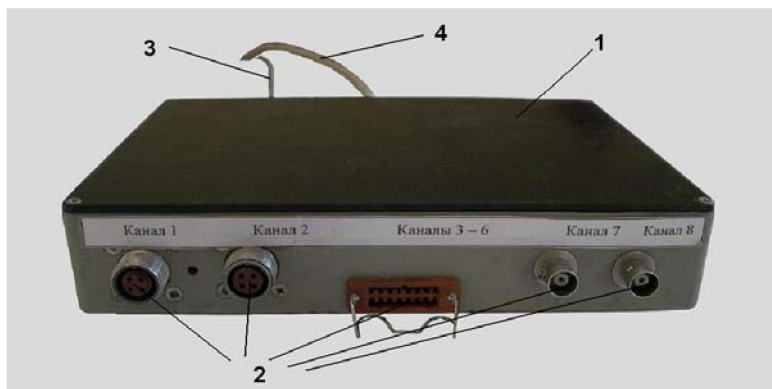


Рисунок 2.2 - . Внешний вид АЦП E-330:

1-корпус; 2- разъемы для подключения аналоговых сигналов; 3-кабель питания модуля электрическим напряжением; 4-кабель передачи данных в персональный компьютер

сональному компьютеру АЦП подключается кабелями 3 и 4. Кабель, присоединяемый к порту клавиатуры или PS/2, предназначен для питания модуля электрическим напряжением. По кабелю 4, подключаемому к LPT, осуществляется передача данных.

2.2 ДАТЧИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Динамические процессы, происходящие в гидросистемах машин, требуют измерения быстроизменяющегося и пульсирующего давления в различных точках гидролиний низкого и высокого давления. Диапазон частоты измеряемого давления может колебаться от 1 Гц до 10..20 кГц.

Для преобразования колебаний давления в электрический сигнал используют различные типы преобразователей:

- 1) потенциометрический, в котором чувствительный элемент - упругая мембрана, перемещаясь под действием давления, тем или иным путём изменяет электрическое сопротивление части цепи внутри преобразователя;
- 2) тензометрический, в котором усилие, создаваемое давлением, воспринимается чувствительным элементом (например, мембра-

- ной), а возникающие напряжения измеряются тензометрами;
- 3) электромагнитный, в котором прогиб мембраны или деформация сильфона под действием давления приводит к изменению характеристик магнитной цепи измерительного преобразователя;
 - 4) ёмкостный, в котором чувствительный элемент изменяет ёмкость в цепи преобразователя;
 - 5) пьезоэлектрический, в котором давление передаётся на кристалл и возникающая при этом разность потенциалов служит выходным сигналом;
 - 6) вибрационно–частотный, в котором деформация мембраны вызывает изменение напряжений растяжения в элементе, собственная частота которого зависит от этих напряжений и является информативным параметром выходного электрического сигнала.

Наибольшее распространение в настоящее время получили тензометрические и пьезоэлектрические датчики пульсаций давления. Рассмотрим их подробнее. В большинстве датчиков давления для преобразования давления в перемещение используются упругие элементы в виде плоских и гофрированных круглых мембран с отношением толщины к диаметру в пределах $0,02 \dots 0,1$.

При измерении колебаний давления жидкости возникает специфическая задача неискажений передачи этого параметра на вход преобразователя давления без нарушения условия функционирования исследуемого объекта. Соответственно к подсоединительным элементам датчика давления предъявляются, с одной стороны, требования точности преобразования, а с другой герметичности и механической прочности.

Достаточно часто датчики давления присоединяют к исследуемым объектам с помощью трубопровода. При идентификации показаний такого измерительного преобразователя в случае быстроменяющегося давления необходимо учитывать динамические характеристики подсоединительных трубопроводов.

Современное развитие техники дало возможность создавать

миниатюрные датчики пульсаций давления, что позволило встраивать эти измерительные преобразователи непосредственно в гидравлические агрегаты для определения их динамических характеристик.

Можно выделить следующие основные требования к измерительным преобразователям пульсаций давления: высокая чувствительность и возможность работы в условиях повышенной вибрации, малые размеры, высокие надёжность и долговечность, широкий диапазон рабочих частот, возможность работы в условиях рабочих температур (от -60 до +150 °С). Основными параметрами измерительных преобразователей являются чувствительность (В/МПа) и частотный диапазон (Гц). Выбор необходимого датчика определяется потребностью проводимого эксперимента.

Действие тензометрических датчиков (измерительных преобразователей) основано на использовании явления тензоэффекта. Тензоэффект заключается в том, что под действием приложенной растягивающей или сжимающей силы проводниковые и полупроводниковые материалы изменяют удельное электрическое сопротивление (проводимость). Тензоэффект характеризуется тензочувствительностью материала:

$$S_M = \frac{\Delta R_M l_M}{R_M \Delta l_M},$$

где l_M, R_M - длина и сопротивление тензочувствительного элемента;

$\Delta l_M, \Delta R_M$ - приращение длины и сопротивления вследствие приложения внешних сил.

Чувствительные элементы тензометрических датчиков пульсаций давления (тензорезисторы) могут быть проволочными, фольговыми и полупроводниковыми.

В зависимости от вида чувствительного элемента проволочные одноэлементные тензорезисторы подразделяются на пять групп.

- 1) общего назначения с плоской петлевой решёткой из тянутой проволоки $\varnothing 10\text{--}30$ мкм с базами $l_p = 2\text{...}100$ мм;
- 2) с двухслойной петлевой решёткой с $l_p = 1\text{...}3$ мм;
- 3) с плоской беспетлевой многопроволочной решёткой из тянутой проволоки $\varnothing 10\text{...}30$ мкм с $l_p = 3\text{...}200$ мм;
- 4) беспетлевые однопроволочные из тянутой проволоки $\varnothing 10\text{...}20$ мкм с $l_p \geq 10$ мм;
- 5) беспетлевые однопроволочные из жилы литого микропровода $\varnothing 2\text{...}6$ мкм с $l_p = 1\text{...}3$ мм.

Фольговые тензорезисторы имеют решетку из полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4...12 мкм, которые наносят на пленку из синтетической смолы или бумаги пропитанной клеем. Толщина пленочного основания тензорезистера составляет 30...40 мкм, бумажного – 80...1000 мкм. Вследствие большой теплоотдачи фольговых тензорезисторов ток, протекающий через измерительный преобразователь может составлять 0.5 А, что повышает чувствительность тензопреобразователя.

В последнее время все шире применяют полупроводниковые тензорезисторы. Их действие основано на использовании пьезорезистивного эффекта, т.е. зависимости электрического сопротивления полупроводника от действия механических напряжений. В качестве пьезорезистивных измерительных преобразователей обычно используют полупроводниковые элементы: резисторы, диоды, стабилизаторы, тоннельные диоды и транзисторы.

На рисунке 2.3 показана схема тензометрического датчика пульсаций давления. Упругий элемент датчика выполнен в виде пластины 1, которая прикреплена к подложке 2, имеющей отверстие. Пластина 1 с отверстием в подложке 2 образует плоскую мембрану. С внутренней стороны мембраны наклеены малобазовые тензорезисторы 3 разной проводимости. Применение тензорези-

стором с одинаковым коэффициентом чувствительности, но разной проводимости позволяет повысить общую чувствительность датчика и произвести его температурную компенсацию. Сигнал с датчика через токосъемник поступает на усилитель и регистрирующий прибор.

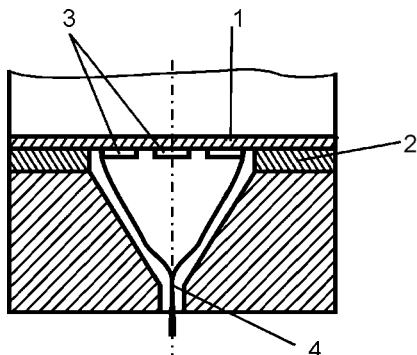


Рисунок 2.3 - Схема тензометрического датчика пульсаций давления:
1-пластина; 2-подложка; 3-тензоэлементы; 4-электрические выводы

Отечественной промышленностью выпускаются тензометрические датчики типа ЛХ-412 и ЛХ-415 (см. таблицу 2.1). Внешний вид этих датчиков представлен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 - Внешний вид тензометрических датчиков пульсаций давления
ЛХ-412 и ЛХ-415

Таблица 2.1 - Технические характеристики тензометрических датчиков пульсаций давления отечественного производства

Серия	Диапазон изменений пульсаций давления, МПа	Питание, В	V_{max} , В	Рабочие температур., С°	Максим. частота, Гц	Материал корпуса	Ма-са, г.	Присоедин. размер
ЛХ-412	до 40	12	5	- 50...+50	1500	Нержав. сталь	220	M-20
ЛХ-415	до 3	12	5	- 50...+50	500	Нержав. сталь	550	M-20

На рисунке 2.5 представлен внешний вид тензометрических датчиков давления, выпускаемых за рубежом. В таблице 2.2 представлены их характеристики.

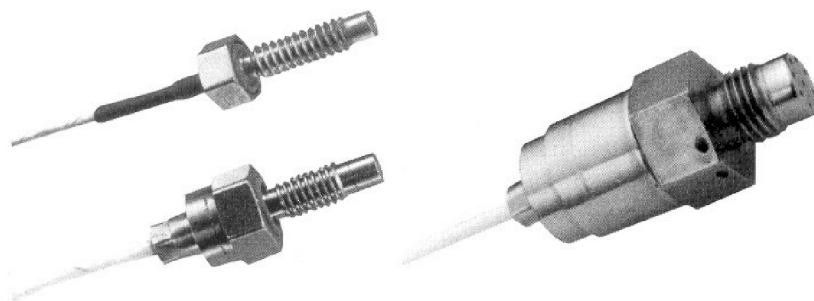


Рисунок 2.5 - Внешний вид тензометрических датчиков пульсаций давления фирмы Kulite.

Таблица 2.2 - Технические характеристики тензотетрических датчиков пульсаций давления фирмы Kulite.

Серия	Диапазон измерений пульсаций давления, МПа	Питание, В	V_{max} , В	Нелинейность (в % от динамич. диапазона)	Рабочие температуры, °С	Максим. частота, кГц
ХТСЕ-190	0,035 - 14	10	100	± 0,1	- 55...+232	50
СТ-190	0,035 - 14	10	100	± 0,1	- 196...+120	50
НКС-375	7 - 210	5	100	± 0,5	- 55...+204	150
НЕМ-375	0,17 - 140	10	100	±0,25	- 55...+232	40

Представленные в таблице 2.2 измерительные преобразователи фирмы Kulite (США) отличаются небольшими размерами (датчики серий ХТСЕ-190 и СТ-190 имеют присоединительную резьбу М10), устойчивостью к жестким внешним условиям, точностью и высокой надежностью. Датчики могут использоваться в широком температурном диапазоне. Так, серии ХТСЕ-190 и НЕМ-375 имеют верхнее значение температурного диапазона +232 °С. Для криогенных приложений выпускается серия СТ-190 (нижнее значение температурного диапазона – минус 196 °С). Датчик серии НКС-375 измеряет давление до 210 МПа и может использоваться для исследования взрывных процессов. Благодаря высокой точности, надежности, малому объему и весу измерительные преобразователи фирмы Kulite широко применяются в авиационной и космической технике.

В настоящее время для измерений динамических процессов наиболее широко применяют пьезоэлектрические измерительные преобразователи, в которых в качестве чувствительного элемента используют монокристаллические или поликристаллические материалы, обладающие пьезоэлектрическими свойствами.

Действие пьезоэлектрических измерительных преобразователей основано на использовании прямого пьезоэффекта, т. е. свойств некоторых материалов (пьезоэлектриков) генерировать заряд под действием приложенной к ним механической силы (рисунок 2.6).

Давление на преобразователь передается через мембрану 1 и керамическую подушку 2, служащую для теплоизоляции. Керамическая подушка 2 контактирует с нижней гранью пьезоэлемента 3, верхняя грань которого упирается в упор 4. Под действием деформации мембраны 1 от воздействия пульсаций давления пьезоэлемент 3 деформируется. Деформация пьезоэлемента сопровождается возникновением электрического заряда, пропорционального мгновенному значению колебательной составляющей давления.

Основные преимущества пьезоэлектрических измерительных пьезообразователей:

- широкий диапазон рабочих частот;
- большая вибрационная и ударная прочность;
- простота конструкции;
- малая чувствительность к магнитным полям;
- возможность создания высокотемпературных преобразователей;
- возможность создания преобразователей с малыми размерами и массой;
- высокая чувствительность измерительного преобразователя (коэффициент преобразования).

Основные недостатки пьезоэлектрических измерительных преобразователей:

- большое выходное сопротивление;
- зависимость выходного сигнала от длины кабеля (при работе с усилителем напряжения);
- невозможность измерения постоянной составляющей динамического процесса.

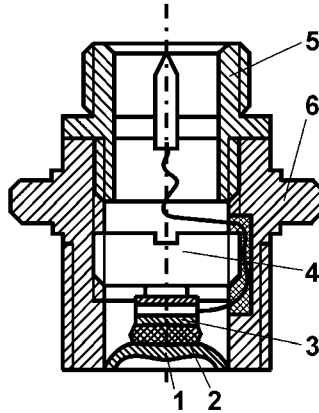


Рисунок 2. 6 - Схема пьезоэлектрического датчика пульсаций давления:
 1-мембрана; 2-керамическая подушка; 3-пьезоэлемент; 4-упор;
 5-штепсельный разъем; 6-корпус

Большим недостатком пьезоэлектрических измерительных преобразователей является ограниченная длина выводного кабеля, соединяющего датчик с высокоомной частью измерительного прибора. С увеличением длины кабеля уменьшается коэффициент преобразования измерительного преобразователя при работе последнего с усилителем напряжения. Для этого случая результирующий коэффициент преобразования измерительного преобразователя K'_d определяется соотношением:

$$K'_d = K_d \frac{C_a}{C_k + C_a},$$

где K_d - коэффициент преобразования измерительного преобразователя;

C_a - ёмкость преобразователя;

C_k - ёмкость удлинительного кабеля.

Поэтому перспективным является использование измерительных преобразователей, совмещенных с входным усилителем.

Основными техническими характеристиками пьезоэлектрических измерительных преобразователей являются:

- коэффициент преобразования по напряжению, mB / Pa ;
- коэффициент преобразования по заряду, $nKл / Pa$;
- резонансная частота, $kГц$;
- емкость, $nФ$;
- диапазон рабочих температур, $°C$;
- динамический диапазон;
- размеры, масса и тип крепления на объекте.

Примером серийно выпускаемых отечественных пьезоэлектрических преобразователей являются датчики серии ЛХ, например ЛХ-604, ЛХ-608, ЛХ-610, ЛХ-611М, ЛХ-612М. Внешний вид датчика ЛХ-610 приведен на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 - Внешний вид пьезоэлектрического датчика пульсаций давления ЛХ-610

Технические характеристики отечественных пьезоэлектрических датчиков пульсаций давления представлены в таблице 2.3.

В качестве примера зарубежных пьезоэлектрических преобразователей пульсаций давления можно привести датчики фирмы РСВ (США). Они могут использоваться для измерений динамического давления в различных процессах, таких как компрессия,

пульсации, ударные волны, процессы в двигателях внутреннего сгорания и т.д., в диапазоне от 0.7 Па до 690 МПа.

В качестве чувствительного элемента используются кристаллы кварца, турмалина или искусственной пьезоэлектрической керамики. Важное достоинство этих датчиков состоит в их совместимости со стандартными широко распространенными усилителями заряда или напряжения. Часть датчиков выпускаются со встроенными ИСР-усилителями (ИСР – Integrated Circuit Piezoelectric) и имеют низкоимпедансный выход. Внешний вид датчиков фирмы РСВ представлен на рисунке 2.8. В таблице 2.4 приведены их основные технические характеристики.



Рисунок 2.8 - Внешний вид пьезоэлектрического датчика пульсаций давления фирмы РСВ М101А06

Таблица 2.3 - Технические характеристики пьезоэлектрических датчиков пульсаций давления отечественного производства.

Серия	Диапазон измерений пульсаций давления, МПа	Диапазон воздействия статических давлений, МПа	Частотный диапазон, Гц	Коэффициент преобразования, мВ/Па	Погр. не более, %	Рабочие температур., С°	Масса, г.	Примечание
ЛХ-604	0,05-5	3-60	10-10000	$(40 \pm 25) \cdot 10^{-5}$	± 10	-196...+200	160	С
ЛХ-608	0,05-5	3-60	10-10000	$(40 \pm 25) \cdot 10^{-5}$	± 10	+25...+3000	190	принуд. охлаждением водой
ЛХ-610	0,005-0,5	0,05-0,5	3-10000	0,0035	± 8	-196...+200	100	
ЛХ-611М	0,045-5,6	4-63	31,5-8000	$20 \cdot 10^{-5}$	± 10	-196...+200	100	
ЛХ-612М	0,045-5,6	2,8-63	31,5-8000	$16 \cdot 10^{-5}$	± 12	+25...+1000	120	С принуд. охлаждением водой

Таблица 2.4 - Основные технические характеристики пьезоэлектрических датчиков пульсаций давления фирмы РСВ.

Марка датчика	Диапазон измерений пульсаций давления, МПа	Диапазон воздействия статических давлений, МПа	Частотный диапазон, Гц	Коэффициент преобразования мВ/кПа (пКл/кПа)	Рабочие температуры, °С.
M102A07	7·10 ⁻⁵ ... 0,345	до 3,45	0,5 ... 80000	14,5	-73 ... +135
M112A22					
M102A02	1,4·10 ⁻⁴ ... 0,69	до 6,9	0,5 ... 80000	7,3	-73 ... +135
M102A05					
M112A21	2·10 ⁻⁵ ... 0,86	до 6,9	0,5 ... 60000	5,8	-73 ... +135
M121A					
M101A06	6,8·10 ⁻⁴ ... 3,45	до 34,5	0,01 ... 130000	1,45	-73 ... +135
M111A26					
M101A02	6,9·10 ⁻³ ... 34,5	до 103,4	0,001 ... 130000	0,15	-73 ... +135
M111A22					
M101A03	1,38·10 ⁻² ... 6,9	до 350	0,005 ... 60000	0,07	-73 ... +135
M111A23					
M108A02	6,9·10 ⁻⁴ ... 0,69	до 6,9	0,5 ... 80000	7,25	-73 ... +135
M102A02					
M102A05	2·10 ⁻⁵ ... 0,69	до 20,7	0,5 ... 20000	(1,015)	-240 ... +315
M112A21					
M116B02					

2.3 УСИЛИТЕЛИ

Усилителями называют приборы, обеспечивающие получение унифицированного (со стандартными параметрами) выходного сигнала при подаче на вход измерительного сигнала. Главная необходимость применения усилителей обусловлена низким уровнем сигналов, получаемых от измерительных преобразователей. В системах измерения пульсаций давления используются приборы:

- 1) аппаратура тензометрическая на несущей частоте 4АНЧ-22;
- 2) усилитель заряда РШ-2734.

2.3.1 Аппаратура тензометрическая на несущей частоте 4АНЧ-22

Аппаратура 4АНЧ-22 предназначена для статических и динамических измерений по 4 каналам давления или других физических величин. При измерении пульсаций давления в качестве первичных преобразователей используют тензометрические датчики давления ЛХ-412, ЛХ-415.

Аппаратура 4АНЧ-22 (см. рисунок 2.9) содержит блок питания, генератор с четырьмя усилителями мощности для питания измерительных мостов, четыре усилителя несущей частоты. Работа аппаратуры осуществляется следующим образом.

С измерительного моста, к которому подключаются датчики давления на вход аппаратуры поступает напряжение несущей частоты, промодулированное напряжением низкой частоты, несущей информацию об измерительном сигнале. Это напряжение усиливается усилителем переменного напряжения, затем демодулируется фазочувствительным демодулятором. После фильтрации гармоник несущей частоты, измеряемое напряжение поступает на устройство выделения динамики, которое позволяет измерять как статодинамические процессы, так и отдельные динамические составляющие с дополнительным усилением. Балансировка начального дисбаланса измерительного моста и калибровка аппаратуры, обеспечиваю-

щие нулевое значение постоянной составляющей напряжения на

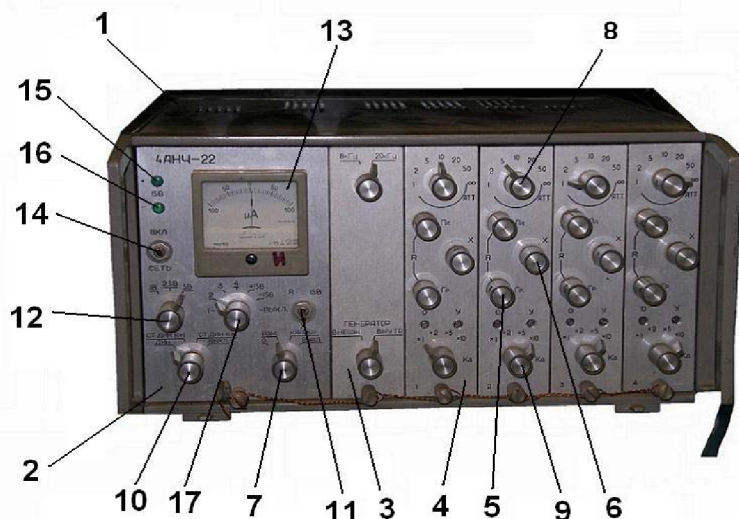


Рисунок 2.9 - Внешний вид аппаратуры тензометрической на несущей частоте 4АНЧ-22:

1-корпус; 2-блок питания; 3-генератор; 4-усилитель несущей частоты; 5-устройство активной балансировки; 6-устройство реактивной балансировки; 7-устройство калибровки; 8-входные аттенюаторы; 9-аттенюатор блока устройства выделения динамики; 10-переключатель режимов (динамика, статодинамика); 11-переключатель реактивной и активной составляющей дисбаланса моста; 12-переключатель уровней выходного напряжения; 13 - встроенный микроамперметр; 14-переключатель питания; 15-лампа контроля напряжения +15В; 16-лампа контроля напряжения -15В; 17-переключатель каналов

выходе из каждого канала при постоянном давлении, осуществляются устройствами 5 активной (R) и 6 реактивной (X) балансировки и устройством калибровки 7, переключённым в положение «Калибр». Входной аттенюатор 8 предназначен для ослабления входного сигнала в 1, 2, 5, 10, 20, 50 раз. Аттенюатор 9 блока устройства выделения динамики обеспечивает возможность усиления сигнала в 2, 5, 10 раз. Переключатель 10 блока питания имеет положение «Дин», «Ст-Дин $K=1$ », «Ст-Дин $K \geq 1$ », «Выкл» и предназначен

для переключения режимов выделения динамической составляющей («Дин», при этом статическая составляющая отфильтровывается) и измерения статодинамических сигналов при положении аттенюатора $9 K_d = 1$ и $K_d \geq 1$ соответственно. Переключатель 7 имеет положения «0», «Изм», «Калибр», «Выкл» и служит для переключения режимов «измерение» (положение «Изм») и «калибровка» (положения «0» и «Калибр»). Переключатели 11 и 12 служат для подключения встроенного микроамперметра 13 к выходам усилителей переменного напряжения. При контроле выходного напряжения переключатель 11 ставится в положение «R, 15 В», а переключатель 12 соответственно в положения «1 В», «2,5 В», «5 В» в зависимости от выбранного входного напряжения. При контроле реактивного дисбаланса моста переключатель 11 ставится в положение «X». Включение аппаратуры в сеть 220 В осуществляется переключателем 14. Контроль за наличием напряжения на выходе стабилизаторов осуществляется лампами 15 (+15 В) и 16 (- 15 В).

Клеммная колодка (см. рисунок 2.10) предназначена для подсоединения к выходам 4-х каналов аппаратуры регистрирующих и преобразующих устройств.



Рисунок 2.10 - Внешний вид клеммной колодки аппаратуры 4АНЧ-22

2.3.2 Усилитель заряда РШ - 2734

Усилитель заряда РШ-2734 (см. рисунок 2.11) представляет собой устройство для преобразования 4 входных сигналов в виде заряда в выходные напряжения в полосе частот до 100 кГц. Основное назначение прибора - работа в составе виброметрических и гидроакустических систем. Коэффициент преобразования изменяется путём переключения микропереключателей индивидуально для каждого канала. Возможные значения коэффициентов преобразования: 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200 мВ/пКл.

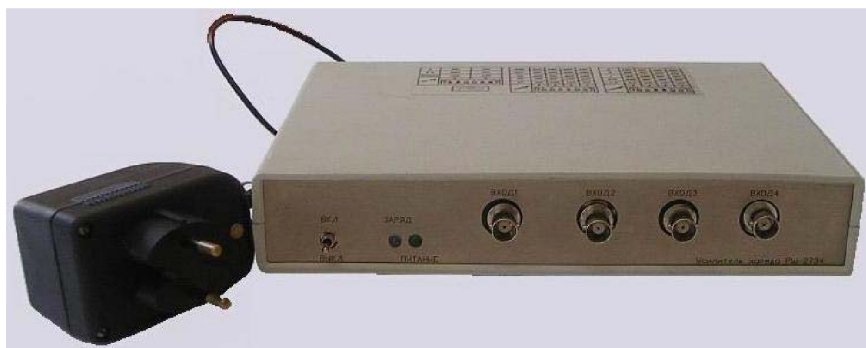


Рисунок 2.11 - Внешний вид усилителя заряда РШ-2734

2.4 ТАРИРОВКА ДАТЧИКОВ

Тарировка - экспериментальное определение зависимости (аналитической и графической) между значениями сигнала на выходе из измерительной цепи и измеряемой величиной (давлением).

Тензометрические датчики пульсаций давления типа ЛХ-412 и ЛХ-415 тарируются по статике статическими характеристиками. При этом создаётся некоторое избыточное статическое давление и для каждого его значения регистрируются на компьютере соответствующие временные реализации. При дальнейшей обработке находят средние значения полученных временных реализаций и строят с помощью регрессионного анализа искомую тарировочную характеристику. Поскольку статическая характеристика рассматри-

ваемых датчиков очень близка к линейной, тарировку можно проводить для двух значений давления – атмосферного ($P_{изб}=0$) и максимального. Однако в этом случае невозможно оценить достоверность тарировки при наличии случайной ошибки определения давления (промаха). Не обеспечивает этого и проведение трёх замеров, так, как через полученные точки на тарировочной характеристике можно провести 3 прямые (см. рисунок 2.12,а). Поэтому на практике тарировка проводится по четырём точкам, что в случае промаха позволяет идентифицировать и исключить ошибочный замер (см. рисунок 2.12,б). В лабораторной работе для закрепления практических навыков предполагается проведение 5 замеров при различных значениях давления.

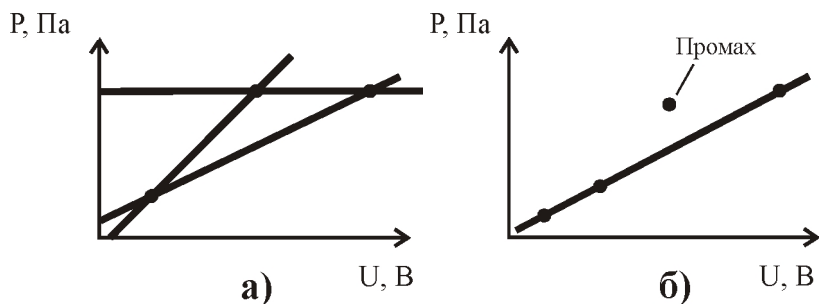


Рисунок 2.12 - Определение числа точек при тарировке датчика

Порядок проведения тарировки.

1. Заполняется протокол (см. приложение 1), куда заносятся
 - дата и место проведения испытаний;
 - фамилии испытателей;
 - тип и номер датчика.
2. Датчик устанавливается в переходник 1 ручной насосной станции (см. рисунок 2.13).
3. Проверяется герметичность собранной системы. Для этого вентиль 2 грубой регулировки давления закрывается, вентиль 3 тонкой регулировки давления прикрывается. Рычагом 4 ручного насоса накачивается давление, величина которого должна быть не больше

номинала датчика, указанного на его корпусе. Величина давления контролируется по манометру 5. После достижения заданного давления вентиль 3 закрывается. Осуществляется визуальный контроль системы на предмет наличия подтекания рабочей среды (масло АМГ–10). При этом следует обратить внимание на постоянство давления в системе (по манометру 5). В случае обнаружения негерметичности, её необходимо устранить.

4. Открытием вентилей 2 и 3 стравливается давление из системы.

5. Испытуемый датчик подключается к соответствующему каналу соединительной колодки аппаратуры 4АНЧ-22. Номер канала заносится в протокол.

6. Производится балансировка входной цепи аппаратуры 4АНЧ-22. Для этого необходимо:

- перевести аттенюатор 8 (см. рисунок 2.9) используемого канала усилителя в положение «50»;
- переключить тумблер 11 в положение «R,15В»
- перевести выключатель 17 в положение, соответствующее подключённому каналу;
- проверить и установить положения остальных переключателей в соответствии с таблицей 2.5;
- вращением ручек 5 грубой «Гр» и плавной «Пл» активной балансировки установить стрелку встроенного микроамперметра 13 на «0»;
- перевести тумблер 11 в положение «X»;
- вращением ручки 6 реактивной балансировки добиться минимального отклонения стрелки встроенного микроамперметра 13 от «0»;
- повторить балансировку по активной и реактивной составляющим аналогично предыдущим пунктам, переводя переключатель 8 поочерёдно в положения «20», «10», «5», «2», «1», добиваясь в положении «1» отклонения стрелки от «0» не более чем на 1 деление по встроенному микроамперметру 13.

Примечание. Для упрощения балансировочных операций тумблер 11 может находиться в положении «Х» на всех этапах балансировки.

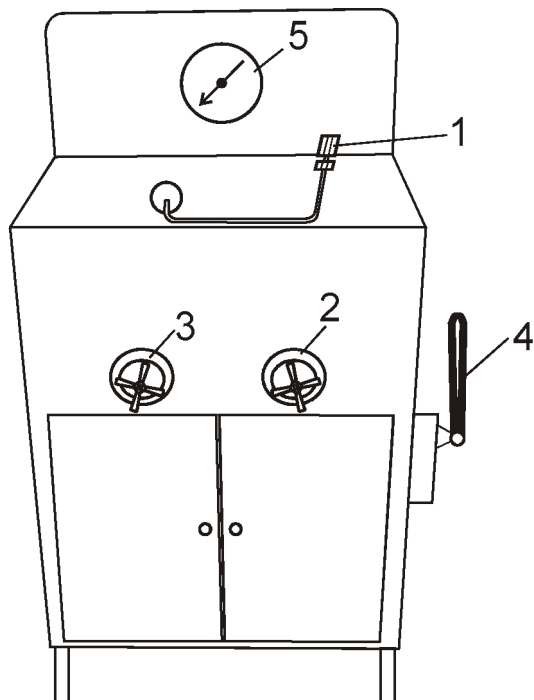


Рисунок 2.13 - Ручная насосная станция:

1-переходник для монтажа датчика давления; 2-вентиль грубой регулировки давления; 3-вентиль тонкой регулировки давления; 4-рычаг накачки давления; 5-манометр

7. Выходы клеммной коробки (соответствующего канала, к которому подключен испытываемый датчик) соединяются кабелем с АЦП. Задействованный канал АЦП записывается в протокол.

Таблиц. 2.5 - Положения переключателей аппаратуры 4АНЧ-22 при балансировке

Переключатель	Тумблер «Сеть» 14	Устройство калибровки 7	Переключатель режимов 10	Переключатель уровней выходного напряжения 12	Переключатель несущей частоты	Переключатель режимов работы генератора	Аттенюатор 9
Положение переключателя	«Сеть»	«Изм»	«ст – дин» Кд = 1	«5В»	20кГц	«Внутр »	«x1 »

8. АЦП двумя кабелями (интерфейсным и кабелем питания) подключается к персональному компьютеру (например, типа Notebook).

9. Производится загрузка операционной системы компьютера.

10. Запускается программа Gemis Oscilloscope.

11. Осуществляется настройка каналов, к которым подключен анализируемый сигнал. Окно настройки каналов программного комплекса Gemis Oscilloscope представлено на рисунке 2.14. На рисунке 2.14. показано подключение сигнала к 7 каналу АЦП.

12. В протокол заносятся имена 5 файлов, которые будут получены при тарировке датчика. Каждый файл будет соответствовать своему значению давления.

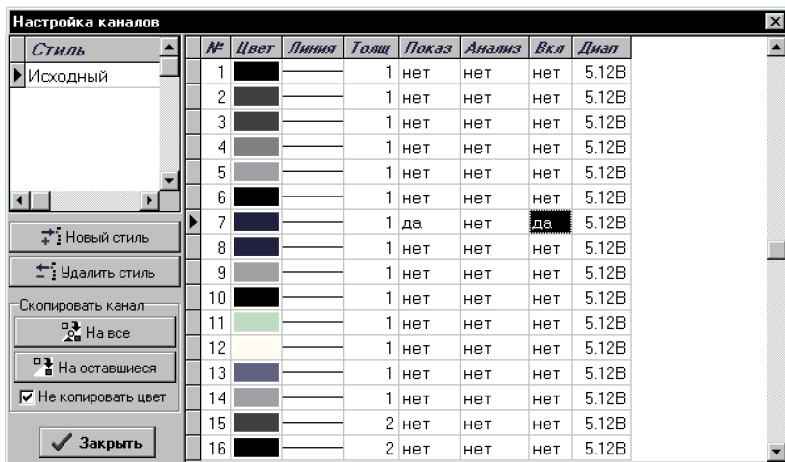


Рисунок 2.14 - Окно настройки каналов программного комплекса Gemis Oscilloscope

13. В окне «Настройка» программного комплекса Gemis Oscilloscope устанавливаются (см. рисунок 2.15):

- период дискретизации. Это величина, обратная частоте дискретизации. Поскольку тарировка осуществляется по статическому давлению, высокая частота дискретизации нецелесообразна, так как приведет к излишне большому размеру файла данных. Рекомендуемая величина частоты дискретизации – 1000 мкс (или 0,001 с). Величина периода дискретизации устанавливается в поле 1;
- устанавливается щелчком кнопки мыши указатель в поле 2 «Запись на диск»;
- в поле 3 устанавливается рабочая папка;
- в поле 4 заносится имя файла;
- щелчком кнопки мыши снимается указатель с поля 2 «Запись на диск». Это делается для того, чтобы пользователь имел возможность самостоятельно определить момент начала записи регистрируемого сигнала на диск компьютера. Если не снять указатель с поля 2, запись на диск начнется одновременно с запуском регистрации сигнала.

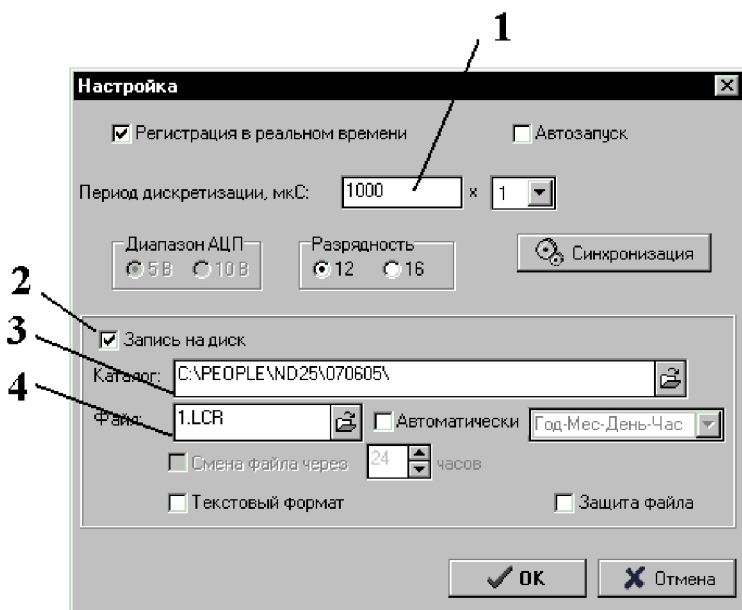


Рисунок 2.15 - Окно «Настройка» программного комплекса
Gemis Oscilloscope:

1-поле установки периода дискретизации; 2-поле установки записи сигнала на диск; 3-поле установки каталога для записи; 4-поле установки имени файла

14. Кнопкой 1 (см. рисунок 2.16) осуществляется запуск регистрации сигнала (без его записи на диск компьютера).

15. Определяются необходимые положения переключателей 8 и 9, определяющие суммарный коэффициент усиления сигнала с датчика. Переключатель 8 устанавливается в положение максимального ослабления «∞», а переключатель 9 – в положение минимального усиления – «1».

Рычагом 4 (см. рисунок 2.12) ручного насоса накачивается достижимое или допустимое давление, величина которого определяется номиналом тарированного датчика. Уменьшая переключателем 8 (см. рисунок 2.9) коэффициент ослабления или (и) увеличивая переключателем 9 коэффициент усиления необходимо добиться того, чтобы величина сигнала, контролируемая по экрану компью-

тера, была как можно больше, но не превышала 5 В. Данные установки аппаратуры 4АНЧ-22 заносятся в протокол.

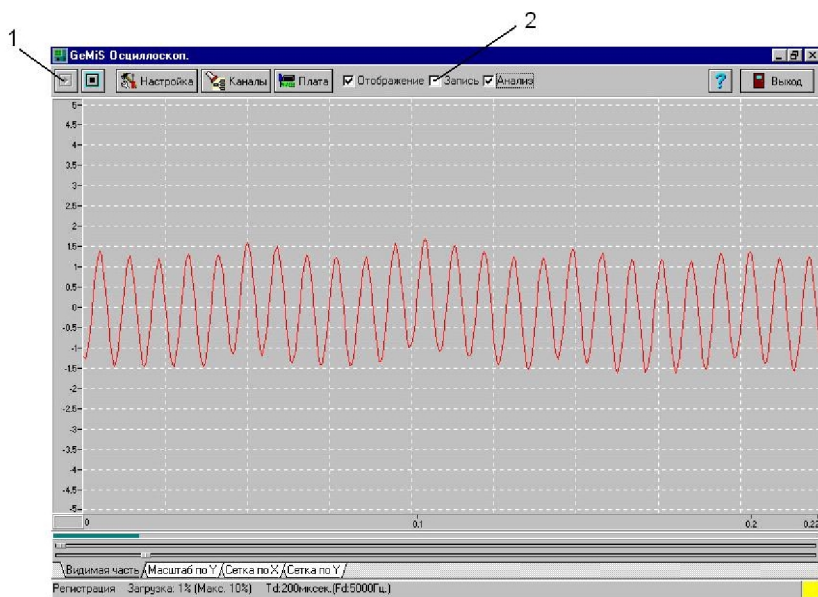


Рисунок 2.16 - Окно регистрации сигналов программного комплекса Gemis Oscilloscope:

1-кнопка запуска регистрации сигнала; 2-поле запуска записи сигнала на диск

16. Нажатием кнопки мыши в поле 2 (см. рисунок 2.16) инициируем процесс записи сигнала в файл на жёсткий диск компьютера. С учётом того что излишний объём данных нецелесообразен, достаточно 0,5...1 с записи на диск. При этом будет записано (при частоте дискретизации 1000 Гц) 500...1000 точек. Повторным нажатием кнопки мыши в поле 2 завершаем запись данных на диск. Величину рабочего давления, контролируруемую по манометру 5 (рисунок 2.13) необходимо записать в протокол.

17. В окне «Настройка» программного комплекса Gemis Oscilloscope устанавливается следующее по протоколу имя файла (см. п. 13). Осуществляется запуск регистрации сигнала (см. п. 14).

Открывая вентиль 3 (см. рисунок 2.13), необходимо сравнить давление в насосной станции на 20...30%. После этого осуществляется запись сигнала на диск (см. п. 16) и в протокол заносится соответствующая величина давления в насосной станции.

18. П.17 повторяется ещё трижды для третьей, четвёртой и пятой величин давления. При этом пятый замер проводится при атмосферном давлении, для чего открываются оба вентиля 2 и 3 насосной станции.

19. Тумблером 14 (см. рисунок 2.9) отключается питание аппаратуры на несущей частоте 4АНЧ-22.

20. Исследуемый датчик отключается от соединительной колодки аппаратуры 4АНЧ-22.

21. Датчик выворачивается из переходника 1 насосной станции (см. рисунок 2.13).

Обработка результатов эксперимента проводится на практических занятиях и описана в соответствующих методических указаниях.

3 ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

В данном разделе представлена методика проведения измерений пульсаций давления тензометрическими датчиками (типа ЛХ-412, ЛХ-415) с использованием аппаратуры на несущей частоте 4АНЧ-22. В качестве источника пульсаций давления используется двойной насос НД-25 системы топливопитания авиационного двигателя, состоящий из шнекоцентробежной и шестеренной ступеней, расположенных на одном валу. Привод насоса осуществляется от электродвигателя мощностью 200 кВт.

Порядок проведения измерений.

1. Указанный преподавателем датчик подключается к соединительной коробке аппаратуры на несущей частоте 4АНЧ-22.

2. В протокол замеров пульсаций давления (см. приложение 2) записываются:

- дата и место проведения испытаний;
- фамилии испытателей;
- место установки датчика;
- тип и номер датчика;
- прибор (в данной лабораторной работе используется аппаратура на несущей частоте 4АНЧ-22, однако, в принципе возможно и использование других приборов, например усилителя заряда РШ-2734);
- № канала прибора (это номер канала на соединительной коробке, к которому подключён датчик).

Несколько строк в рассматриваемой таблице протокола обусловлено тем, что возможна одновременная регистрация нескольких сигналов с различных датчиков с использованием многоканального ввода. Однако для упрощения в данной лабораторной работе будет использован одноканальный ввод и, соответственно, в таблице протокола (приложение 2) вторая и третья строки остаются незаполненными.

3. Производится балансировка входной цепи аппаратуры 4АНЧ-22. Для этого необходимо:

- перевести аттенюатор 8 (см. рисунок 2.9) используемого канала усилителя в положение «50»;
- переключить тумблер 11 в положение «R,15В»;
- перевести выключатель 17 в положение, соответствующее подключённому каналу.
- проверить и установить положения остальных переключателей в соответствии с таблицей 2.5;
- вращением ручек 5 грубой «Гр» и плавной «Пл» активной балансировки установить стрелку встроенного микроамперметра 13 на «0»;
- перевести тумблер 11 в положение «X»;
- вращением ручки 6 балансировки добиться минимального отклонения стрелки встроенного микроамперметра 13 от «0»;
- повторить балансировку по активной и реактивной составляющим аналогично предыдущим пунктам, переводя переключатель 8 поочерёдно в положения «20», «10», «5», «2», «1», добиваясь в положении «1» отклонения стрелки от «0» не более чем на 1 деление по встроенному микроамперметру 13.

Примечание. Для упрощения балансировочных операций тумблер 11 может находиться в положении «X» на всех этапах балансировки.

4. Выходы клеммной коробки (соответствующего канала, к которому подключен испытываемый датчик) соединяются кабелем с АЦП. Задействованный канал АЦП записывается в протокол.

5. АЦП двумя кабелями (интерфейсным и кабелем питания) подключается к персональному компьютеру (например, типа Notebook).

6. Производится загрузка операционной системы компьютера.

7. Запускается программа Gemis Oscilloscope.

8. Осуществляется настройка каналов, к которым подключен анализируемый сигнал. Окно настройки каналов программного комплекса Gemis Oscilloscope представлено на рисунке 2.14. На рисунке 2.14 показано подключение сигнала к 7 каналу АЦП.

9. В таблицу №2 приложения 2 в соответствии с числом студентов в подгруппе заполняются номера замеров и соответствующие имена файлов. Каждый файл будет соответствовать своему режиму работы насосного агрегата.

10. В окне «Настройка» программного комплекса Gemis Oscilloscope (см. Рисунок 2.15):

- устанавливается период дискретизации. Рекомендуемая величина частоты дискретизации – 10000Гц. При этом период дискретизации – 100 мкс (или 0.0001 с). Величина периода дискретизации устанавливается в поле 1;

- щелчком кнопки мыши устанавливается указатель в поле 2 «Запись на диск»;

- в поле 3 устанавливается рабочая папка;

- в поле 4 заносится имя файла;

- щелчком кнопки мыши снимается указатель с поля 2 «Запись на диск». Если не снять указатель с поля 2, запись на диск начнётся одновременно с запуском регистрации сигнала.

11. Переключатели 8 и 9 (см. рисунок 2.9) устанавливаются в положения, обеспечивающие максимальное ослабление регистрируемого сигнала: переключатель 8 – «∞», переключатель 9 – «1».

12. Под руководством преподавателя включается оборудование стендового комплекса и устанавливаются заданные частоты вращения ротора насоса, которые заносятся в столбец «Характеристики объекта» таблицы 2 приложения 2 (либо в об/мин, либо в процентах).

13. Кнопкой 1 (см. рисунок 2.16) осуществляется запуск регистрации сигнала (без его записи на диск компьютера).

14. Переключатель режимов 10 (см. рисунок 2.9) переводится в по-

ложение «Дин».

15. Переключатели 8 и 9 (см. рисунок 2.9) устанавливаются в положения, обеспечивающие максимальное расширение динамического диапазона сигнала. Для этого переключатель 8 последовательно переводится в положения «20», «10», «5», «2», «1», а переключатель 9 – в положения «2», «5», «10». При этом по экрану компьютера контролируется, чтобы регистрируемый сигнал не выходил за допустимые границы ($\pm 5B$). Положения переключателей фиксируются в таблице 2 приложения 2.

16. Нажатием кнопки мыши в поле 2 (см. рис. 2.16) инициируется процесс записи сигнала в файл на жёсткий диск компьютера. С учётом того, что излишний объём данных нецелесообразен, достаточно ≈ 1 с записи на диск. При этом будет записано (при частоте дискретизации 10000 Гц) 10000 точек. Повторным нажатием кнопки мыши в поле 2 завершается запись на диск.

17. В окне «Настройка» программного комплекса Gemis Oscilloscope (см. рисунок 2.15) в поле 4 заносится очередное имя файла. Щелчком кнопки мыши снимается указатель с поля 2 «Запись на диск».

18. Переключатели 8 и 9 (см. рисунок 2.9) устанавливаются в положения, обеспечивающие максимальное ослабление регистрируемого сигнала: переключатель 8 – «∞», переключатель 9 – «1».

19. Стендовое оборудование переводится на другой режим работы. Новые значения частоты вращения ротора насоса заносятся в соответствующий столбец и строку таблицы 2 приложения 2.

20. Кнопкой 1 (см. рисунок 2.16) осуществляется запуск регистрации сигнала (без его записи на диск компьютера).

21. Переключатели 8 и 9 (см. рисунок 2.9) устанавливаются в положения, обеспечивающие максимальное расширение динамического диапазона сигнала. Для этого переключатель 8 последовательно переводится в положения «20», «10», «5», «2», «1», а переключатель 9 – в положения «2», «5», «10». При этом по экрану

компьютера контролируется, чтобы регистрируемый сигнал не выходил за допустимые границы ($\pm 5B$). Положения переключателей фигурируем в таблице 2 приложения 2.

22. Нажатием кнопки мыши в поле 2 (см. рисунок 2.16) инициируется процесс записи сигнала в файл на жёсткий диск компьютера. Через 1 – 2 с повторным нажатием кнопки мыши в поле 2 завершается запись данных на диск.

23. Пункты 17 – 22 повторяются в соответствии с числом студентов в подгруппе.

24. Тумблером 14 (см. рисунок 2.9) отключается питание аппаратуры на несущей частоте 4АНЧ-22.

25. Под руководством преподавателя отключается питание оборудования стендового комплекса.

26. Отключается питание компьютера.

27. АЦП отсоединяется от компьютера и от клеммной коробки аппаратуры на несущей частоте 4АНЧ-22.

28. Используемый датчик отключается от соединительной колодки аппаратуры 4АНЧ-22.

4 ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРО - И ПНЕВМОСИСТЕМ

Современные машины, механизмы и производственное оборудование, включая гидро – и пневмосистемы, являются источниками интенсивного шума. Непрерывный рост их мощности сопровождается дальнейшим увеличением шума. Шум оказывает вредное влияние на организм человека. Это проявляется в функциональных расстройствах нервной системы, поражении органов слуха, нарушениях деятельности сердечно – сосудистой системы. Под воздействием шума заметно снижаются качество и производительность труда. Поэтому за последнее время борьба с шумом приобрела особое научное и практическое значение.

Основные физические величины, описывающие акустические характеристики:

- звуковое давление;
- интенсивность;
- мощность звука;
- коэффициент направленности.

Звуковое давление – основная физическая характеристика звуковых волн. Звуковым давлением называют периодическое или любое другое переменное изменение давления в частице под действием звука по отношению к давлению в невозмущённой среде (в воздухе по отношению к постоянному атмосферному давлению). В акустике частицей среды называют такой её участок, на котором состояние среды практически не меняется. Это – наименьший физически однородный макрообъект колебаний. Размеры частицы малы по сравнению с длиной звуковой волны, но в объёме частицы содержится очень большое число молекул.

При исследовании акустических характеристик измеряют среднеквадратичное (эффективное) значение звукового давления $P_{скз}$:

$$P_{\text{срз}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt},$$

где $p(t)$ - мгновенное значение звукового давления;

T - время интегрирования.

Звуковое давление выражают в **Па**. Самое слабое пороговое звуковое давление, воспринимаемое человеком, составляет $2 \cdot 10^{-5}$ **Па** на частоте **1000Гц**. Самое высокое звуковое давление, не вызывающее болевых ощущений – приблизительно **100Па**.

Акустические величины обычно измеряются в логарифмическом масштабе – в децибелах, что объясняется трудностью использования линейных масштабов при большом изменении значений шума. Шкала децибелов для звукового давления P определяется выражением:

$$L_p = 10 \lg \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \lg \frac{P}{P_0},$$

где L_p - уровень звукового давления;

$P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ **Па** - пороговое значение звукового давления.

Интенсивностью звука или силой звука называется удельная мощность звука, равная количеству звуковой энергии в единицу времени, проходящей через единицу площади фронта волны (мгновенная интенсивность звука):

$$I(t) = p(t)v(t),$$

где $v(t)$ - мгновенное значение колебательной скорости частицы в звуковой волне.

Усреднённая интенсивность звука

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) v(t) dt.$$

Интегрирование по времени, также как и для звукового давления, производится за время, значительно большее периода колебаний.

Интенсивность звука – вектор, направление которого совпадает с направлением движения волны. Эту величину называют иногда «вектором» Умова-Пойнтинга в честь русского и английского физиков, которые независимо друг от друга ввели в широкий обиход это понятие.

Интенсивность звуковой волны I в точке, находящейся на расстоянии R от источника звука, излучающего звуковую энергию E , определяется:

$$I = \frac{E}{4\pi R^2}.$$

На достаточном расстоянии от источника интенсивность пропорциональна квадрату звукового давления:

$$I \sim P^2.$$

Таким образом

$$\frac{E}{4\pi R^2} \sim P^2,$$

и

$$P = \text{const} \cdot \frac{1}{R}.$$

Это соотношение называют законом обратных радиусов, которому подчиняется свободное распространение звука в дальнем акустическом поле звукового источника. Уровни интенсивности звука L_I , дБ определяются выражением:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт} / \text{ м}^2$ - нулевой уровень интенсивности звука.

Полная мощность звука N определяется выражением:

$$N = SI,$$

где S - площадь поверхности, через которую проходит звуковая энергия интенсивности I .

Выражение для определения уровня мощности звука в $дБ$ (уровень акустической мощности) записывается в виде:

$$L_N = 10 \lg \frac{N}{N_0} = 20 \lg \frac{P}{P_0} + 10 \lg \frac{2\pi R^2}{S_0},$$

где $N_0 = 10^{-12} \text{ Вт}$ - нулевой уровень звуковой мощности;

N - определяемая акустическая мощность машины, гидро – или пневмосистемы, Вт ;

$$S_0 = 1 \text{ м}^2.$$

Коэффициент направленности измеряют в связи с тем, что большинство источников шума излучает звук по разным направлениям неравномерно. Коэффициент направленности излучения звуковой мощности источника шума определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{10^{0,1(G_{max} + L_p)}}{10^{0,1L_p}} = 10^{0,1(G_{max} + L_p) / L_p},$$

где G_{max} - максимальный показатель направленности.

Максимальный показатель направленности – это разность между максимальным и средним уровнями звукового давления на равностоящей от центра источника шума поверхности определения коэффициента направленности. Численные значения величин L_p и G_{max} находятся экспериментально в зависимости от метода измерения звуковой мощности. В случае равномерного излучения во все стороны от источника $\Phi = 1$.

В простейшем случае измеряют полный уровень звукового давления. Однако такое измерение не даёт представления ни о распределении частот шума, ни о его восприятии человеком. Поэтому в аппаратуру для измерения акустического шума вводят корректив-

рующие фильтры, частотные характеристики которых обозначаются буквами *A*, *B*, *C* и *D*. Характеристика *A* приближает изменение акустического шума к восприятию звука человеком. Уровень звукового давления по характеристике *A* определяется соотношением:

$$L_A = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{(L_i - A_i)/10},$$

где L_i - уровень звукового давления в i – й полосе частот;

n - число полос.

В таблице 4.1 приведены значения корректирующей величины A_i для октавных и третьоктавных полос частот.

Таблица 4.1 - Значения корректирующей величины A_i для октавных и третьоктавных полос частот.

Октавные полосы			Третьоктавные полосы			Октавные полосы			Третьоктавные полосы			
i	$f, \text{Гц}$	$A_i, \text{дБ}$	i	$f, \text{Гц}$	$A_i, \text{дБ}$	i	$f, \text{Гц}$	$A_i, \text{дБ}$	i	$f, \text{Гц}$	$A_i, \text{дБ}$	
1	31,5	+39,4	1	25	+44,7	6	1000	0	16	800	+0,8	
			2	31,5	+39,4				17	1000	0	
			3	40	+34,6				18	1250	-0,6	
2	63	+26,2	4	50	+30,2	7	2000	-1,2	19	1600	-1,0	
			5	63	+26,2				20	2000	-1,2	
			6	80	+22,5				21	2500	-1,3	
3	125	+16,1	7	100	+19,1	8	4000	-1,0	22	3150	-1,2	
			8	125	+16,1				23	4000	-1,0	
			9	160	+13,4				24	5000	-0,5	
4	250	+8,6	10	200	+10,9	9	8000	+1,1	25	6300	+0,1	
			11	250	+8,6				26	8000	+1,1	
			12	315	+6,6				27	10000	+2,5	
5	500	+3,2	13	400	+4,8							
			14	500	+3,2							
			15	630	+1,9							

Характеристика *B* более расширена в область низких частот. Характеристика *C* в незначительной степени зависит от частоты в

области слышимых частот. Характеристика *D* предназначена для измерений авиационного шума. Для того, чтобы отличить измерения уровней звукового давления в дБ без частотной коррекции от измерений, произведённых с помощью корректирующих характеристик, результаты последнего вида измерений обозначают: дБ(*A*), дБ(*B*), дБ(*C*), дБ(*D*). Акустический шум также исследуют, производя частотный анализ в октавных, третьоктавных или ещё более узких полосах частот.

Для измерений акустических характеристик применяют шумомеры 1-го или 2-го класса с полосовыми октавными или третьоктавными фильтрами.

4.1 ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ШУМА И ВИБРАЦИИ ВШВ-003-M2

Измеритель шума и вибрации ВШВ-003-M2 предназначен:

- для измерения уровня звука с частотными характеристиками *A*, *B*, *C*;
- для измерения уровня звукового давления в диапазоне частот от 2 Гц до 18 кГц и октавных полосах в диапазоне частот от 2 Гц до 8 кГц свободном и диффузном полях;
- для измерения среднеквадратических значений (СКЗ) виброускорения и виброскорости.

Съём информации о вибрации осуществляется пьезоэлектрическими виброизмерительными преобразователями ДН-3-M1 (рисунок 4.1,а) и ДН-4-M1 (рисунок 4.1,б); о шуме - микрофонным конденсаторным капсулем М101 (рисунок 4.1,в).

ВШВ-003-M2 относится к агрегатному комплексу средств измерения вибрации (АСИВ) и может работать в лабораторных, производственных и полевых условиях.

Прибор относится к шумомерам *I* класса точности.



Рисунок 4.1 - Пьезоэлектрическими виброизмерительными преобразователями ДН-3-М1 (а), ДН-4-М1 (б); микрофонный конденсаторный капсюль М101 (в)

4.1.1 Устройство и принцип работы ВШВ-003-М2

В ВШВ-003-М2 используется принцип преобразования звуковых и механических колебаний исследуемых объектов в пропорциональные им электрические сигналы, которые затем усиливаются, преобразуются и измеряются прибором измерительным (см. рисунок 4.2). Конструктивно ВШВ-003-М2 состоит из:

- вибропреобразователей ДН-3-М1 и ДН-4-М1 (см. рисунок 4.2 и рисунок 4.1а,б)
- эквивалента вибропреобразователя (см. рисунок 4.2);
- эквивалента капсюля микрофонного;
- предусилителя микрофонного ВПМ-101;
- прибора измерительного;
- источника питания;
- соединительных кабелей.

Эквивалент вибропреобразователя предназначен для электрической калибровки и непосредственно для работы при измерении виброускорения и виброскорости. Эквивалент вибропреобразователя выполнен в металлическом цилиндрическом корпусе, внутри

которого имеется конденсатор с ёмкостью, равной эквивалентной ёмкости вибропреобразователей ДН-3-М1, ДН-4-М1.



Рисунок 4.2 – Внешний вид ВШВ-003-М2:

1 – вибропреобразователь ДН-3-М1; 2 – вибропреобразователь ДН-4-М1; 3 – эквивалент вибропреобразователя; 4 – эквивалент капсуля микрофонного; 5 – предусилитель микрофонный ВПМ-101; 6 – прибор измерительный; 7 – источник питания

Эквивалент капсуля микрофонного предназначен для электрической калибровки измерителя перед измерением уровней звукового давления и представляет собой цилиндрический металлический корпус, внутри которого находится конденсатор ёмкостью, равной эквивалентной ёмкости капсуля.

Предусилитель ВПМ-101 предназначен для согласования высокоомного сопротивления капсуля с входным сопротивлением прибора измерительного. Конструктивно предусилитель ВПМ – 101 выполнен в герметичном исполнении.

Прибор измерительный конструктивно выполнен в прямо-

угольном корпусе. Для удобства переноса прибор помещён в футляр. На лицевую панель прибора измерительного выведены следующие органы управления, регулирования и индикации (рисунок 4.3):

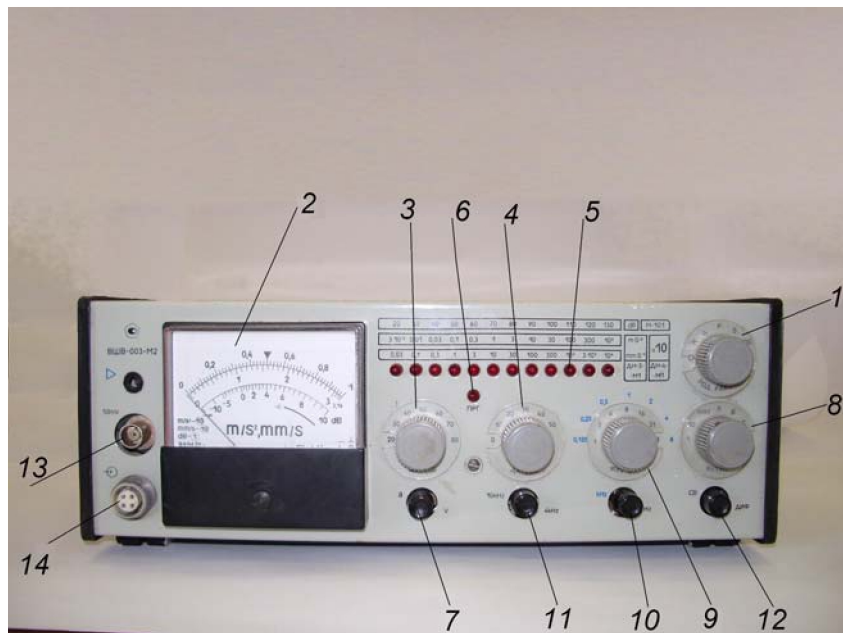


Рисунок 4.3 – Лицевая панель прибора измерительного:

1 – переключатель «РОД РАБОТЫ»; 2 – показывающий прибор; 3 - переключатель ДЛТ1, дБ; 4 –переключатель ДЛТ2 ; 5 – единичные индикаторы; 6 - индикатор ПРГ; 7 – кнопка а, v; 8 – переключатель частотных фильтров ФЛТ, Hz; 9 – переключатель ФЛТ ОКТ; 10 – кнопка kHz, Hz; 11 – кнопка 10 kHz, 4 kHz; 12 – кнопка СВ, ДИФ; 13 – гнездо 50 т V; 14 – гнездо для подсоединения предусилителя ВПМ-101

- переключатель «Род работы» с положениями:

- "O" - для включения измерителя;
- для контроля состояния батарей;
- "▷" - для включения измерителя в режим измерения с постоянной времени *F* (fast – быстро), *S* (slow – медленно), 10*S* (очень медленно);

- показывающий прибор - для отсчёта измеряемой величины (при работе с вибропреобразователем ДН – 4 – М1 результат измерения необходимо умножить на 10) и контроля напряжения питания;

- переключатели ДЛТ 1, дБ, ДЛТ 2 дБ и единичные индикаторы:

- 20, 30, ..., 130 дБ;
- $3 \cdot 10^{-3}$, 0.01, ..., $10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- 0.03, 0.1, ..., $10^4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;

предназначенные для выбора предела измерения уровня звукового давления, виброускорения и виброскорости соответственно;

- индикатор ПРГ – для индикации перегрузки измерительного тракта;

- кнопка ***a, V*** - для включения измерителя в режим измерения виброскорости (в её отжатом положении измеряется виброускорение; в нажатом положении измеряется виброскорость);

- переключатель частотных фильтров ФЛТ, ***Гц*** с положениями:

- 1 – для включения фильтра высоких частот 1 Гц, ограничивающего частотный диапазон при измерении виброускорения и виброскорости;
- 10 – для включения фильтра высоких частот 10 Гц, ограничивающего частотный диапазон при измерении виброускорения и виброскорости;
- ЛИН – для включения фильтра низких частот 20 кГц, ограничивающего частотный диапазон, при измерении уровня звукового давления по линейной характеристике;
- ***A*** - для включения корректирующего фильтра ***A*** ;
- ***B*** - для включения корректирующего фильтра ***B*** ;
- ***C*** - для включения корректирующего фильтра ***C*** ;
- ***ОКТ*** для включения измерителя в режим частотного анализа в октавных полосах;

- переключатель ФЛТ ОКТ для включения одного из четырнадцати октавных фильтров со средними геометрическими частотами от

1Гц до 8 кГц;


- кнопка **kHz**, **Hz** для переключения между диапазонами октавных фильтров со средними геометрическими частотами от 1 Гц до 63 Гц (кнопка нажата) и от 125 Гц до 8 Гц (кнопка отжата);

- кнопка 10 **kHz** 4 **kHz** - для включения фильтров низких частот 10 кГц (кнопка отжата) или 4**kHz**– (кнопка нажата), ограничивающих частотный диапазон при измерении виброускорения и виброскорости;


- кнопка СВ, ДИФ – для измерений в режиме свободного (кнопка отжата) и диффузного (кнопка нажата) поля;

- гнезда:

- 50 mV – выход с калибровочного генератора;

- «» - для подсоединения предусилителя ВПМ -101.

На правой боковой стенке прибора измерительного размещены:

- «» - выход переменного напряжения для подключения к прибору регистрирующих или регулирующих устройств;

- «» - заземление измерителя.

На задней стенке прибора измерительного размещен отсек для батарей.

Источник питания предназначен для питания ВШВ – 003 –М2 от сети переменного тока напряжением 220В частотой 50 Гц.

На рисунке 4.4 представлена схема микрофонного капсюля. Корпус 1, изолятор 4 и мембрана 2 образуют замкнутую камеру, связанную с окружающей средой специальным отверстием для уравнивания медленно изменяющегося атмосферного давления. Мембрана 2 и неподвижный электрод 3 электрически изолированы друг от друга и являются обкладками конденсатора, ёмкость которого равна приблизительно 60 пФ, а сопротивление изоляции между обкладками не менее 10^5 МОм.

Чувствительным элементом к звуковому давлению является мембрана 2, изготовленная из тонкой никелевой фольги, толщиной ≈ 5 мкм. Мембрана 2 устанавливается на расстоянии 21 мкм от не-

подвижного электрода 3. Неподвижный электрод 3 и корпус капсуля 1 изготовлены из никелевого сплава, а изолятор 4 – из кварцевого стекла.

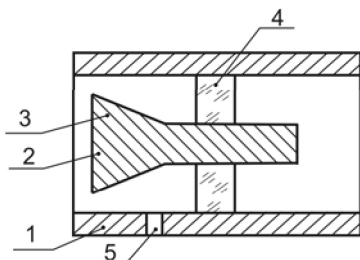


Рисунок 4.4 – Схема микрофонного капсуля:

1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – неподвижный электрод; 4 – изолятор; 5 – отверстие для выравнивания статического давления под мембраной

При воздействии звукового давления на капсуль мембрана 2 прогибается электрическая ёмкость капсуля изменяется. При наличии поляризующего напряжения, подаваемого на неподвижный электрод 3, изменение ёмкости капсуля приводит к появлению переменного напряжения на обкладках конденсатора, которым является капсуль. Таким образом, механические колебания мембраны преобразуются в переменное напряжение, пропорциональное воздействию на капсуль звуковому давлению.

4.1.2 Подготовка ВШВ–003–М2 к работе

1. Распаковать ВШВ–003–М2. Проверить механическую исправность его органов управления и разъёмов. Выдержать ВШВ–003–М2 в течении 24 часов при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$, если он длительное время находится в условиях отрицательных температур, т.е. ниже минус 10°C .

2. Установить измеритель в рабочее положение (горизонтальное или вертикальное) и механическим корректором нуля установить стрелку измерителя на отметку 0 шкалы.

3. При работе от батарей необходимо измеритель вынуть из футляра. С заднего отсека измерителя снять крышку, вынуть ис-

точник питания и вставить батареи (5 шт.) согласно указанной полярности «+», «-» и закрыть крышку.

Установить переключатели измерителя в положения:

Род работы $\text{---} \text{---} \text{---}$;

ДЛТ 1, dB – 80;

ДЛТ 2, dB – 50.

Показание измерителя при этом должно быть в пределах сектора, указанного на шкале измерителя. Если это требование не выполняется, то необходимо заменить батареи.

4. При работе от сети необходимо:

- вынуть батареи из заднего отсека измерителя;
- вставить источник питания;
- заземлить ВШВ -003 –М2 с помощью клеммы защитного заземления на источнике питания.

4.1.3 порядок работы с ВШВ – 003 – М2

4.1.3.1 Порядок работы при измерении уровней звукового давления в диапазоне частот от 2 до 18000 Гц капсулем

Первым этапом работы является калибровка измерителя. Она должна проводиться каждый раз перед началом измерений и периодически, в процессе измерений, по усмотрению оператора. Для проведения калибровки необходимо:

- эквивалент капсуля 4 (см рисунок 4.2) соединить с предусилителем ВПМ – 101;
- предусилитель ВПМ -101 соединить с гнездом « $\text{---} \text{---} \text{---}$ » измерителя;
- гнездо «50 mV» измерителя соединить кабелем с эквивалентом капсуля 4;
- переключатель измерителя «Род работы» установить в положение "▷"; при этом будет светиться индикатор 90 дБ.
- резистором "▷" установить стрелку измерителя на отметку шкалы - ∞... + 10 dB в соответствии с таблицей 4.2. Значение уровня

чувствительности капсюля берётся из протокола поверки капсюля, образец которого приведён в приложении 3.

Таблица 4.2

Значение уровня чувствительности капсюля, дБ	Отметка по шкале измерителя, дБ	Значение уровня чувствительности капсюля, дБ	Отметка по шкале измерителя, дБ
св. минус 24 до минус 24,25	2	св. минус 26,25 до минус 26,75	4,5
св. минус 24,25 до минус 24,75	2,5	св. минус 26,75 до минус 27,25	5
св. минус 24,75 до минус 25,25	3	св. минус 27,25 до минус 27,75	5,5
св. минус 25,25 до минус 25,75	3,5	св. минус 27,75 до минус 28	6
св. минус 25,75 до минус 26,25	4		

- отсоединить от предусилителя ВПМ – 101 эквивалент капсюля и подсоединить капсюль.

Для измерения уровней звукового давления в диапазоне частот от 2 Гц до 18 кГц необходимо установить переключатели измерителя в положения:

- Род работы - F ;
- ДЛТ 1, дВ – 80;
- ДЛТ 2, дВ – 50;
- ФЛТ 1, Нз–ЛИН;
- все кнопки отжаты.

При этом будет светиться индикатор 130 дВ.

При производстве измерений уровня звукового давления предусилитель ВПМ – 101 с капсюлем следует держать на вытянутой руке в направлении излучателя звука. Если при измерении стрелка измерителя находится в начале шкалы, то следует ввести в её сектор - 5...10 шкалы децибел сначала переключателем ДЛТ 1, дВ, затем ДЛТ 2, дВ. При измерениях низкочастотных составляющих

могут возникнуть флуктуации (колебания) стрелки измерителя. Тогда следует перевести переключатель «Род работы» из положения *F* в положение *S*.

Для определения результата измерения следует сложить показание, соответствующее светящемуся индикатору, и показание по шкале децибел.

Измерение уровней звука по характеристикам *A*, *B*, *C* следует проводить аналогично, установив переключатель измерителя ФЛТ в положения *A*, *B*, *C*.

Измерение уровней звука в октавных полосах частот проводится аналогично измерению уровней звукового давления в диапазоне частот от 2 Гц до 18 к Гц. Однако при этом переключатель ФЛТ, *Hz* должен находиться в положении ОКТ. Необходимый октавный фильтр включается переключателем ФЛТ ОКТ и кнопкой *kHz*, *Hz*. Для измерений в октавных полосах 1...63 Гц кнопка *kHz*, *Hz* должна быть нажата; для измерений в октавных полосах 125...8000 Гц кнопка *kHz*, *Hz* отжата.

При измерении уровней звукового давления необходимо помнить, что предусилитель ВПМ – 101 с капсулем должен находиться не ближе 1,5 м от пола и 1 м от источника звука и стен. Для точных измерений предусилитель ВПМ – 101 с капсулем необходимо закрепить стационарно с помощью штатива в точке измерения. При измерении уровней звукового давления в диффузном поле (малые производственные помещения с большим количеством отражающих поверхностей) следует нажать кнопку СВ, ДИФ (рисунок 4.3).

4.1.3.2 Порядок работы при измерении виброускорения и виброскорости

Первым этапом работы является калибровка измерителя. Она должна проводиться каждый раз перед началом измерений и периодически, в процессе измерений, по усмотрению оператора. Для проведения калибровки необходимо:

- выбрать необходимый вибропреобразователь;
- подсоединить эквивалент вибропреобразователя к предусилителю ВПМ – 101, который подсоединить к гнезду « \ominus » измерителя;
- гнездо «50 mV» измерителя соединить кабелем с эквивалентом вибропреобразователя;
- переключатель измерителя «Род работы» установить в положение "▷";
- резистором "▷" установить стрелку измерителя на отметку шкалы 0 – 1, указанную в таблице 4.3, учитывающую действительное значение коэффициента преобразования вибропреобразователя указанное в его паспорте;

Таблица 4.3

Действительное значение коэффициентов преобразования вибропреобразователей, $\text{мВ} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1}$		Числовая отметка измерителя при калибровке
ДН - 3 - М1	ДН - 4 - М1	
от 9 до 9,4	от 0,9 до 0,94	0,54
св. 9,4 до 9,8	св. 0,94 до 0,98	0,52
св. 9,8 до 10,2	св. 0,98 до 1,02	0,50
св. 10,2 до 10,6	св. 1,02 до 1,06	0,48
св. 10,6 до 11	св. 1,06 до 1,1	0,46

- отсоединить кабель от гнезда «50 mV» (см. рисунок 4.3) и эквивалента вибропреобразователя.

Для измерения виброускорения необходимо установить переключатели измерителя в положения:

- Род работы - F , S или $10S$;
- ДЛТ 1, - dB – 80;
- ДЛТ 2, - dB – 50;
- ФЛТ, Hz - «1» или «10» в зависимости от частотного диапазона измерения.

Также в зависимости от частотного диапазона измерения нажать или отжать кнопку 10 Hz , 4 kHz . В нажатом состоянии этой

кнопки включён фильтр низких частот 4 кГц, в отжатом состоянии – включён фильтр низких частот 10 кГц.

Измерения производятся аналогично измерениям уровней звукового давления.

При необходимости изменяются положения переключателей ДЛТ 1, дВ и ДЛТ 2, дВ.

Отсчёт показаний измерителя производится в m/s^2 . При работе с вибропреобразователем ДН – 4 – М1 показание необходимо умножить на 10.

Для измерения виброускорения в октавных полосах частот следует включить необходимый октавный фильтр кнопкой **kHz**, **Hz** и переключателем ФЛТ ОКТ (см рисунок 4.3). Переключатель ФЛТ, **Hz** при этом должен быть установлен в положение ОКТ.

Измерение виброскорости производится аналогично измерению виброускорения. Однако при этом кнопка **a, V** должна находиться в нажатом положении.

Для определения результата измерения виброускорения или виброскорости в децибелах следует сложить показание, соответствующее светящемуся индикатору в децибелах и показание по шкале децибел показывающего прибора. Затем к результатам измерения прибавить или отнять следующие значения:

- при измерении виброускорения с вибропреобразователем ДН-4-М1 прибавить 10 дБ, а с вибропреобразователем ДН-3-М1 отнять 10 дБ;
- при измерении виброскорости с вибропреобразователем ДН - 4 - М1 прибавить 46 дБ, а с вибропреобразователем ДН-3-М1 прибавить 26 дБ.

4.2 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Настоящая методика применима к стационарным или движущимся машинам, оборудованию, в том числе элементам пневмо – и гидросистем, эксплуатируемым в помещении или вне его, которые создают во внешней среде все виды шума. Методика базируется на ориентировочном методе измерения уровней звукового давления излучения машин на рабочем месте и в других контрольных точках вблизи машин. При этом не накладывается строгих ограничений на акустические условия в помещении, в котором проводятся испытания. Методика предусматривает акустические условия, приближающиеся к реверберационному звуковому полю.

Рассматриваемая методика применяется при измерениях для выявления и контроля значений шумовых характеристик машин, если нет возможности или нецелесообразно использовать метод более высокой степени точности.

Для измерений пригодно любое испытательное пространство, достаточно защищённое от фонового шума и имеющее показатель акустических условий $K_{2A} \leq 7$ дБА. Показатель акустических условий K_{2A} может быть определён по эквивалентной площади звукопоглощения в помещении. Эквивалентная площадь звукопоглощения A в помещении определяется по формуле:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i, \quad (4.1)$$

где S_i - площадь i – ой поверхности в испытательном помещении, м²;

α_i - коэффициент звукопоглощения i – ой поверхности;

n - число звукопоглощающих поверхностей в испытательном помещении.

Для определения показателя акустических условий K_{2A} используется график представленный на рисунок 4.5. Величина K_{2A} определяется в зависимости от отношения A/S , где S - площадь

измерительной поверхности (более подробно об измерительной поверхности будет написано ниже).

Отношение A/S должно быть больше или равно 1. Большему значению соответствует более благоприятные условия измерений.

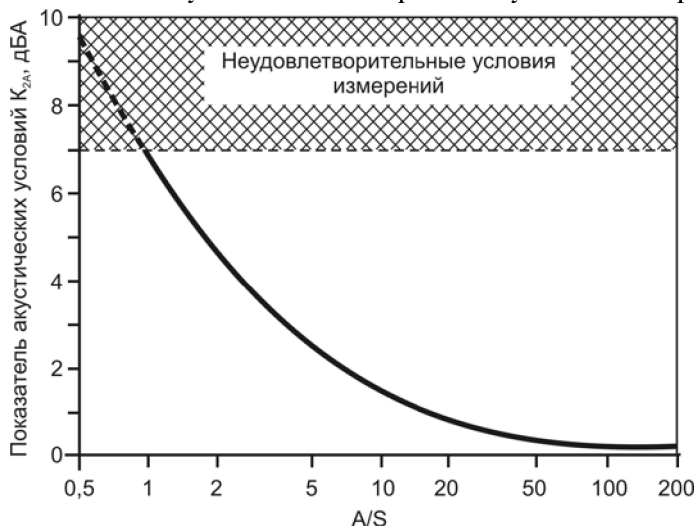


Рисунок 4.5 – Зависимость показателя акустических уровней K_{2A} от отношения A/S

В контрольной точке уровень фонового шума, включая шум ветра у микрофона, должен быть по меньшей мере на 3 (предпочтительнее на 10) дБА менее уровня звука при работе машины. Коррекцию на фоновый шум K_{1A} , дБА определяют по формуле:

$$K_{1A} = -10 \lg(1 - 10^{-0,1\Delta L}), \quad (4.2)$$

где ΔL - разность между измеренными уровнями звука в контрольной точке при включённой и выключенной машине.

Если $\Delta L > 10$ дБА, то считают, что $K_{1A} = 0$. Если $\Delta L < 3$ дБА (т.е. $K_{1A} > 3$ дБА), то результат измерений считают недействительным.

При измерении шумовых характеристик по рассматриваемой методике необходимо также определить локальную коррекцию на

акустические условия K_{3A} учитывающую влияние отражённого звука на уровень звукового давления излучения в контрольной точке:

$$K_{3A} = 10 \lg \left[1 + 4 \frac{S'}{A} \right], \quad (4.3)$$

где $S' = 2\pi a^2$,

a - расстояние от контрольной точки до ближайшего доминирующего источника звука испытуемой машины в метрах. В случае, когда доминирующий источник звука не может быть точно определён, за a принимают расстояние от контрольной точки до ближайшей части испытуемой машины.

Если расчётное значение K_{3A} превышает 2,5 дБА, то в качестве оценки локальной коррекции на акустические условия должно быть принято значение 2,5 дБА. На рисунке 4.6 приведены значения локальной коррекции на акустические условия.

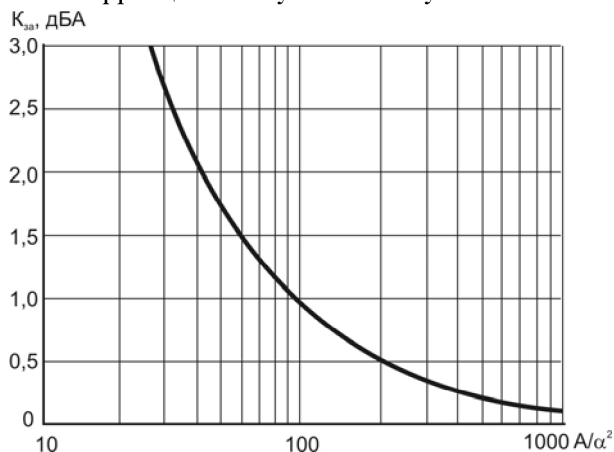


Рисунок 4.6 – Локальная коррекция на акустические условия K_{3A} в зависимости от A/α^2

Измерения производятся в 4 или более контрольных точках, которые располагаются на расстоянии 1 м от каждой грани огибающего параллелепипеда на высоте $1,55 \pm 0,075$ м над полом. Если

возможно, то микрофон ориентируется на доминирующий источник звука.

Необходимо сделать ряд общих замечаний относительно неопределённости измерений по рассматриваемой методике. Единичное значение уровня звукового давления излучения, измеренное в соответствии с настоящей методикой, может отличаться от истинного значения в данной контрольной точке на значение в пределах неопределённости измерений. Неопределённость измерений определяется несколькими факторами, одни из которых связаны с акустическими условиями, другие с техникой эксперимента. Неопределённость измерений зависит от среднеквадратичного отклонения воспроизводимости и доверительной вероятности. Чтобы определить среднеквадратичные отклонения воспроизводимости в контрольных точках, необходимо провести в них многочисленные повторные измерения.

Рассматриваемая ориентировочная методика имеет меньшую степень точности, чем технический метод по ГОСТ 31172, так как акустические условия на месте установки машины в меньшей мере поддаются управлению. Кроме того, применяемый здесь метод определения локальной коррекции на акустические условия K_{3A} занижает её значение и устанавливает для неё верхний предел 2,5 дБА. Поэтому уровни звукового давления излучения по настоящей методике часто могут быть оказаться выше, чем определённые по ГОСТ 31172.

Детальная информация о точности рассматриваемой ориентировочной методики не может быть дана, если локальная коррекция на акустические условия ограничена значением 2,5 дБА. Тем не менее, среднеквадратичное отклонение воспроизводимости равно или меньше 5 дБА для машин, генерирующих шум с относительно плоским спектром в диапазоне частот от 100 до 10000 Гц.

Итак, суммируя всё выше сказанное, измерение уровней звукового давления излучения должно проводиться в следующей последовательности.

1. По соотношению (4.1) определяется эквивалентная площадь A звукопоглощения в испытательном помещении. Для этого определяются площади всех звукопоглощающих поверхностей помещения и по справочнику находятся коэффициенты звукопоглощения исходя из характера поверхности.

2. Строится огибающий параллелепипед исследуемого объекта.

3. Выбираются 4 или более контрольные точки на расстоянии 1 м от каждой грани от огибающего параллелепипеда на высоте $1,55 \pm 0,075$ м от пола.

4. Определяется площадь измерительной поверхности S , проходящей через контрольные точки.

5. Определяются отношения A/S . Если $A/S < 1$, то:

а) выбирается измерительная поверхность с меньшей площадью S . Для этого уменьшается расстояние от контрольных точек до граней огибающего параллелепипеда. Но это расстояние не должно быть менее 0,15 м. Далее производится повторное выполнение п.4.

б) увеличивается эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении A размещением в испытательном помещении на стенах и потолке звукопоглощающих материалов или облицовок. Далее производится повторное выполнение п. 1 - 4.

6. По графику рисунка 4.5 определяется показатель акустических условий K_{2A} .

7. В каждой контрольной точке последовательно или параллельно устанавливаются микрофоны и производится замер уровней звукового давления по шкале A при включённом объекте испытаний L'_{pAi} и выключенном объекте (фоновый шум) $(L'_{pAi})_{фон}$.

8. В каждой контрольной точке определяется разность между измеренными уровнями звука:

$$\Delta L_i = L'_{pAi} - (L'_{pAi})_{фон}$$

Если хотя бы в одной точке $\Delta L_i < 3$ дБА, то результаты измерений считают недействительными. В этом случае необходимо принять меры по уменьшению фонового шума.

9. Определяют коррекцию на фоновый шум K_{1Ai} по формуле (4.2) для каждой контрольной точки. Если $\Delta L_i > 10$ дБА, то считают, что $K_{1Ai} = 0$.

10. По формуле (4.3) в каждой контрольной точке определяется локальная коррекция на акустические условия K_{3Ai} . Если $K_{3Ai} > 2,5$ дБА, то принимается, что $K_{3Ai} = 2,5$ дБА.

11. В каждой контрольной точке вычисляют уровень звука излучения L_{pAi} или эквивалентный уровень звука излучения), дБ А по формуле.

$$L_{pAi} = L'_{pAi} - K_{1Ai} - K_{3Ai}.$$

12. В качестве результата измерений принимают максимальное значение уровня звукового давления излучения.

13. Оформляют протокол измерений (см. приложение 4).

5 АКУСТИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИМЕТРИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРО- И ПНЕМОСИСТЕМ

Развитие современной измерительной и вычислительной техники открывает принципиально новые возможности экспериментального определения звуковой мощности, в частности, проведение испытаний в условиях, близких к натурным, выделение акустических сигналов от отдельного источника на фоне помех, создаваемых другими источниками. Способствует этому появление выпускаемой промышленностью интенсиметрической аппаратуры, позволяющей непосредственно измерять значения звуковой мощности, проходящей через отдельные элементы поверхности, окружающей исследуемый источник шума.

Поскольку в измерениях интенсивности учитывается разность фаз между звуковым давлением и скоростью частиц, нормальной к измерительной поверхности, звуковая мощность, излучаемая в дальнюю зону, может определяться по результатам измерений активной интенсивности в ближнем поле. Возможность измерений в ближнем поле позволяет снизить влияние отраженных волн, а интегрирование нормальной составляющей вектора активной интенсивности по замкнутой поверхности вокруг исследуемого источника позволяет исключить влияние фонового шума, создаваемого другими источниками. Интегрирование нормальной составляющей вектора активной интенсивности по отдельным участкам измерительной поверхности позволяет решать задачи по локализации распределенных источников шума.

5.1 МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

При изучении различных шумовых полей измерения звукового давления далеко не всегда дают исчерпывающую информацию об особенностях поля, особенно если оно имеет сложную пространственную структуру. Гораздо более полная информация может быть

получена из анализа энергетических характеристик звукового поля: плотности потенциальной и кинетической энергии, вектора акустической интенсивности. Исследование энергетических характеристик позволяет в ряде случаев прояснить особенности структуры сложных звуковых полей, выявить закономерности их формирования.

Особый интерес представляет информация о векторе интенсивности: определение его величины и направления в различных точках звукового поля позволяет, в частности локализовать источник шума и вычислить его акустическую мощность. Весьма важно, что определение акустической мощности и локализация источника шума могут производиться на основе измерений интенсивности в его ближнем поле (измерение только звукового давления в ближнем поле, как уже указывалось, может привести к неверной оценке мощности источника).

Системы для измерения интенсивности звука основаны на фазовой согласованности двухканальной аппаратуры. Математически активная интенсивность связана с градиентом фазы по формуле:

$$I_r = \frac{-p_{rms}^2}{\rho c k} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}, \quad (5.1)$$

где $\frac{\partial \phi}{\partial r}$ - фазовый градиент звукового поля в направлении r ;

p_{rms}^2 - среднеквадратичное давление;

ρc - импеданс среды;

k - волновое число.

Реактивная составляющая интенсивности J_r , связана с градиентом амплитуды в звуковом поле и определяется как:

$$J_r = \frac{-1}{2\rho c k} \cdot \frac{\partial p_{rms}^2}{\partial r}, \quad (5.2)$$

где J_r – вектор реактивной интенсивности в направлении r .

Двухканальный анализатор спектра в реальном времени способен непосредственно измерять активную и реактивную составляющие интенсивности.

Активная интенсивность используется для идентификации и определения звуковой мощности какого-либо источника шума в присутствии других источников. Реактивная интенсивность позволяет получить информацию о структуре звукового поля. Реактивная интенсивность связана с градиентом потенциальной энергии в звуковом поле:

$$J_r = -\frac{c^2}{\omega} \text{grad}V_r, \quad (5.3)$$

где V_r – потенциальная энергия между двумя точками в поле, ω – угловая частота колебаний звука.

5.2 АППАРАТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКА

Для стационарных шумовых полей составляющая вектора интенсивности вдоль выбранного направления x может быть выражена через взаимную корреляционную функцию $R_{pv_x}(\tau)$ звукового давления и составляющую колебательной скорости вдоль того же направления:

$$N_x = p(t)v_x(t) = p(t)v_x(t + \tau)|_{\tau=0} = R_{pv_x}(\theta), \quad (5.4)$$

где τ – временная задержка.

Взаимная корреляционная функция $R_{pv_x}(\tau)$ связана Фурье-преобразованием с взаимным спектром $S_{pv_x}(f)$ давления и скорости:

$$R_{pv_x}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pv_x}(f) e^{i\omega\tau} df, \quad (5.5)$$

где f – линейная частота.

Интенсивность связана с взаимным спектром соотношением

$$N_x = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pv_x}(f) df \quad (5.6),$$

т. е. взаимный спектр представляет собой не что иное, как спектральную плотность интенсивности. Для активной и реактивной составляющих интенсивности соответственно получаем:

$$I_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Re}[S_{pv_x}(f)] df, \quad (5.7)$$

$$J_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Im}[S_{pv_x}(f)] df. \quad (5.8)$$

Выражения для плотности кинетической и потенциальной энергии через автокорреляционные функции звукового давления $R_{pp}(\tau)$ и составляющей v_x колебательной скорости $R_{v_x v_x}(\theta)$, а также через соответствующие этим корреляционным функциям спектры $S_{pp}(f)$ и $S_{v_x v_x}(f)$ могут быть получены аналогичным образом и имеют вид:

$$U = \frac{R_{pp}(\theta)}{2\rho_0 c_0^2} = \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pp}(f) df, \quad (5.9)$$

$$T_{xx} = \rho_0 \frac{R_{v_x v_x}(\theta)}{2} = \frac{\rho_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{v_x v_x}(f) df. \quad (5.10).$$

Наиболее распространенным способом измерения интенсивности в настоящее время является так называемый, «метод двух микрофонов», заключающийся в использовании двух приемников звукового давления, расположенных друг против друга на расстоянии значительно меньшем длины волны (рисунок 5.1). Сумма сигналов, снимаемых с микрофонов такого прибора, определяет среднее значение звукового давления в точке, находящейся между микрофонами.

$$P = \frac{P(A) + P(B)}{2} \quad (5.11)$$

где $P(A)$, $P(B)$ – звуковые давления в точках расположения микрофонов.

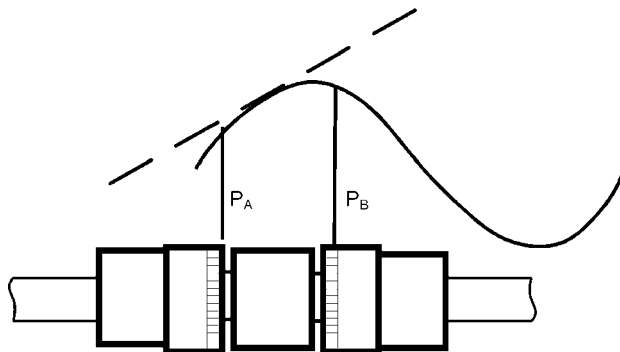


Рисунок 5.1 - Определение интенсивности звука методом двух микрофонов

Для вычисления интенсивности необходимо знать величину колебательной скорости. Согласно уравнению Эйлера, эта величина связана с градиентом давления, составляющая которого вдоль оси, соединяющей микрофоны, может быть, приблизительно, определена с помощью двух микрофонов путем, конечно - разностной аппроксимации.

Тогда

$$V_x = \frac{1}{\rho_0} \int \frac{P(A) + P(B)}{2\Delta r} df, \quad (5.12)$$

где Δr – расстояние между микрофонами; ρ_0 - плотность среды.

Тогда составляющая вектора активной интенсивности вдоль оси, соединяющей микрофоны, может быть вычислена по формуле:

$$I_x = - \frac{P(A) + P(B)}{2\rho_0\Delta r} \int [P(B) - P(A)] df \quad (5.13)$$

Вычисление реактивной интенсивности:

$$J_x = -\frac{1}{\pi} \frac{P(A) + P(B)}{2\rho_0\Delta r} \int \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{P(A) - P(B)}{t - \tau} d\tau \right] df \quad (5.14)$$

Таким образом, для определения интенсивности методом двух микрофонов необходимо располагать следующими блоками: формирования суммы и разности сигналов, интегрирования, перемножения, усреднения и другими. Следует отметить, что при измерении интенсивности в практике часто ограничиваются активной составляющей.

Помимо, так называемых, прямых измерений интенсивности, получили распространение алгоритмы, основанные на спектральных представлениях.

Соответствующие выражения активной и реактивной интенсивности через взаимный спектр G_{AB} и автоспектры G_{AA} , G_{BB} имеют вид

$$I_x = \frac{1}{\rho_0\Delta r} \int \frac{\text{Im} G_{AB}}{\omega} df \quad (5.15)$$

$$J_x = \frac{1}{\rho_0\Delta r} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_{BB} - G_{AB}}{\omega} df \quad (5.16)$$

Для использования этих соотношений весьма эффективны алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Для практической реализации данного метода необходимо иметь 2-х канальное устройство обработки сигналов и акустический зонд.

Направленные свойства интенсивметра определяются его возможностью измерить лишь ту составляющую колебательной скорости, которая соответствует оси, соединяющей микрофоны.

Описание интенсивметра

Интенсивметр (рисунок 5.2) включает пару согласованных по фазе микрофонов, два предусилителя, распорные втулки различной длины.

Микрофоны и предусилители установлены на прочной рамке друг напротив друга. Расстояние между микрофонами фиксируется с помощью распорок из твердого пластика, прикрепленных резьбовыми шпильками к решетке микрофонов. Звук воздействует на каждый микрофон, проходя сквозь узкую щель между распоркой и решеткой микрофона. Благодаря этому достигается вполне определенное акустическое разделение микрофонов и минимальное проявление эффектов затенения и дифракции.



Рисунок 5.2. Интенсиметрический зонд

Верхний предел частотного диапазона зонда для измерения интенсивности определяется длиной микрофонной распорки. Градиент давления при использовании двух микрофонов, разнесенных в звуковом поле на небольшое расстояние, приводит к заниженному уровню интенсивности звука, но связанная с этим ошибка составляет менее одного децибела, до тех пор, пока расстояние между микрофонами будет меньше одной шестой длины волны. Это означает, что при измерениях в высокочастотном диапазоне необходимо применять более короткие распорки. Интенсиметр включает противозетровое приспособление, которое используется при измерении в присутствии воздушных движений.

5.3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКА

При измерении интенсивности на измерительной поверхности обычно используется один из двух методов: измерения в фиксированных точках или измерения путем непрерывного сканирования вдоль измерительной поверхности. В первом случае интенсивность измеряется в одной фиксированной точке на каждом сегменте измерительной поверхности, во втором – зонд интенсивности движется над сегментом в процессе измерений. Первый метод имеет ряд преимуществ, особенно если необходимо провести измерения, сравнимые со стандартными измерениями. Однако метод сканирования осуществляет усреднение внутри каждого сегмента измерительной поверхности, что дает лучшее приближение к истинному поверхностному интегралу.

При практическом определении звуковой мощности на точность интегрирования интенсивности по измерительной поверхности влияет ряд дополнительных факторов, которые необходимо учитывать. Так, если отсутствует подробная информация о характере звукового поля, рекомендуется разбивать измерительную поверхность на сегменты равной площади, и если измерения производятся по точкам, точки измерений выбирают на равном расстоянии. Предварительные измерения могут показать существенную нерегулярность поля интенсивности на измерительной поверхности, например, из-за избирательной направленности. В таких случаях желательно сконцентрировать внимание на детальном исследовании этих неоднородностей поля интенсивности, что дает максимальную точность при минимальном числе измерений.

Преимущество метода измерений в фиксированных точках состоит в том, что сохраняется вся имеющаяся информация о пространственной структуре поля интенсивности на измерительной поверхности. Эта информация может затем использоваться не только для вычисления искомого значения звуковой мощности, но и для оценки того, является ли данное число выборок достаточным для достижения требуемой точности измерений.

При точечном измерении интенсивности эффективный интервал измерения пропорционален среднему расстоянию между позициями измерений и, следовательно, непосредственно связан с физическим размером сегмента поверхности. И напротив, эффективный интервал при сканировании пропорционален среднему расстоянию между линиями сканирования. Любая связь с размером сегмента площади произвольна. Это еще больше затрудняет построение процедуры оценки адекватности экспериментальных данных, полученных методами измерений в фиксированных точках и сканирования.

Для достижения максимальной эффективности измерений методом сканирования желательно провести два измерения с пересекающимися линиями сканирования. При этом нужно исходить из того, что различные способы сканирования должны приводить к одному и тому же результату, так как истинная усредненная по пространству величина интенсивности единственна. Это действительно дает возможность проверить точность сканирования: если сходимость двух измерений удовлетворительна, полученный результат считается правильным. Если возможно сканирование только вдоль одного ряда параллельных линий, то необходимо их расположить перпендикулярно любой из осей симметрии источника.

Хотя теоретически метод сканирования обеспечивает более высокую точность, чем измерения в фиксированных точках, расположенных на линии сканирования, на практике такой метод используется редко. В настоящее время в основном сканирование осуществляется вручную, поэтому реальные результаты могут отличаться от идеальных. Это обстоятельство, возможно, оказывает влияние на общее мнение, что измерения в фиксированных точках часто дают лучшую повторяемость результатов, чем измерения сканированием.

Влияние потока воздуха на измерение интенсивности звука

Если число Маха потока воздуха мало ($M < 0,05$) и поле не сильно реактивно, то интенсивность звука может быть измерена с достаточной точностью.

Турбулентные потоки вблизи акустического зонда вызывают сигнал псевдоинтенсивности звука, поэтому следует применять ветровые экраны на микрофоны, особенно на частотах ниже 200 Гц. Турбулентные потоки ведут также к нестабильности результатов измерения.

5.4 АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА БАЗЕ МЕТОДА ИНТЕНСИМЕТРИИ

Измерения звуковой мощности следует проводить по ИСО 9614. Согласно стандарту измерения должны проводиться на расстоянии не менее 0,5 метра. Однако при локализации источников шума необходимо проводить измерения реактивной составляющей интенсивности звука на расстоянии 5-20 см.

Приведем основные определения стандарта ИСО 9614.

Определение показателей поля

5.4.1 Показатель временной нестабильности звукового поля

Показатель F_1 временной нестабильности звукового поля в точке измерительной поверхности вычисляют по формуле:

$$F_1 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{n_k} - \bar{I}_n)^2}, \quad (5.17)$$

где \bar{I}_n — среднее значение нормальной составляющей интенсивности звука для M средних кратковременных выборок I_{n_k} , вычисляемое по формуле

$$\bar{I}_n = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_{n_k}, \quad (5.18)$$

Примечание — M принимают равным 10. Рекомендуемое

время усреднения — от 8 до 12 с или время любого целого числа периодов для периодических сигналов.

5.4.2 Показатель давления — интенсивности звука на измерительной поверхности

Показатель F_2 в децибелах давление — интенсивность звука на измерительной поверхности вычисляют по формуле:

$$\bar{F}_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|n|}, \quad (5.19)$$

где \bar{L}_p — уровень звукового давления на поверхности в децибелах, определяемый по формуле:

$$\bar{L}_p = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_p} \right), \quad (5.20)$$

$\bar{L}_{|n|}$ — уровень нормальной составляющей интенсивности звука на поверхности в децибелах, определяемый по формуле

$$\bar{L}_{|n|} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_{n_i}}{I_0} \right), \quad (5.21)$$

где I_{n_i} — абсолютное значение нормальной составляющей интенсивности звука в точке измерения i .

5.4.3 Показатель отрицательной составляющей звуковой мощности

Показатель F_3 в децибелах отрицательной составляющей звуковой мощности вычисляют по формуле:

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n} \quad (5.22)$$

где \bar{L}_p — уровень звукового давления на поверхности, вычисляемый по формуле (5.20);

\bar{L}_{I_n} — уровень нормальной составляющей интенсивности звука на поверхности в децибелах с учетом знака, вычисляемый по формуле:

$$\bar{L}_{I_n} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_{n_i}}{I_0} \right), \quad (5.23)$$

где I_{n_i} - составляющая нормальной интенсивности звука, измеренная в точке i с учетом знака;

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт} / \text{м}^2$$

Если $\sum_{i=1}^N I_{n_i} / I_0$ имеет отрицательное значение в какой-либо полосе частот, то условия испытаний не удовлетворяют требованиям данного стандарта в этой полосе частот.

5.4.4 Показатель неравномерности поля

Показатель неравномерности поля F_4 в децибелах вычисляют по формуле

$$F_4 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{n_i} - \bar{I}_n)^2}; \quad (5.24)$$

где \bar{I}_n - нормальная составляющая интенсивности звука на поверхности, вычисляемая по формуле:

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{n_i}. \quad (5.25)$$

5.5 ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКА

Рассмотрим несколько примеров локализации источников шума. На рисунках 5.4 и 5.5 показаны графики активной и реактивной интенсивности по фронтальной поверхности двух громкоговорителей в противофазе. Определить расположение динамиков по активной интенсивности невозможно, в то время как карта реактивной интенсивности ясно показывает регионы с высоким давлением по фронту громкоговорителя. В данном примере нижний громкоговоритель более мощный, чем верхний. В этом случае поток энергии направлен от нижнего к верхнему громкоговорителю. Другими

словами, слабый источник становится акустическим сливом, т.е. поглощает некоторую энергию излученную сильным громкоговорителем. Это явление называется акустическим коротким замыканием.

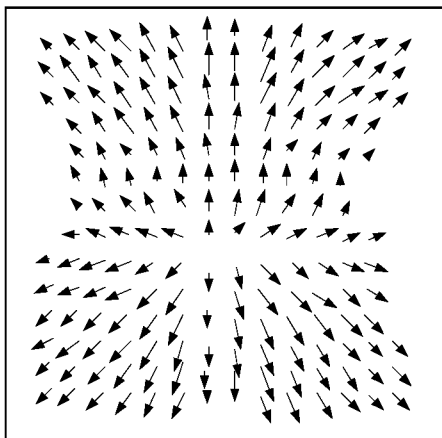


Рисунок 5.4 - Распределение векторов активной интенсивности

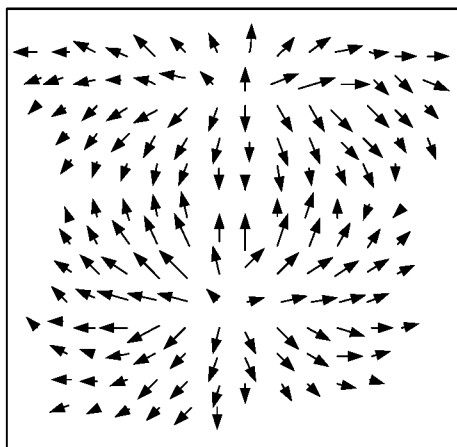


Рисунок 5.5 - Распределение векторов реактивной интенсивности

Дальнейший пример визуализации звуковых полей дизельного двигателя описан ниже .

Сетка размером 13 на 19 измеряемых точек была расположена в плоскости, находящейся перед восьмицилиндровым V-образным

дизельным двигателем.

Активная и реактивная интенсивность были измерены одновременно в треть октавных полосах в каждой точке в частотном диапазоне 100 Гц – 5 кГц, используя линейное усреднение по времени 8с. Полное время измерения, включая перемещение зонда от точки до точки, составило около 1 часа.

Векторная графика активной и реактивной интенсивности в треть октавной полосе 400 Гц изображена на рисунках 5.6 и 5.7.

Плоскость измерения расположена приблизительно в 20 см от поверхности двигателя. Сильное излучение шума, показанные на рисунке 5.6, обусловлено левым рукавом блока цилиндров. Правый рукав блока цилиндра, очевидно, заглушается этим излучением. На рисунке 5.7, однако, график реактивной интенсивности показывает несколько областей высокого давления: по левому и правому блоку цилиндра и перед вращающимся демпфером. Таким образом, левый рукав цилиндра – хоть и главный источник шума в этой частотной полосе, но не единственный.

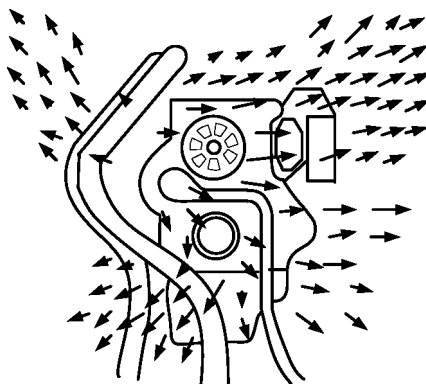


Рисунок 5.6 - Карта активной интенсивности на 400 Гц

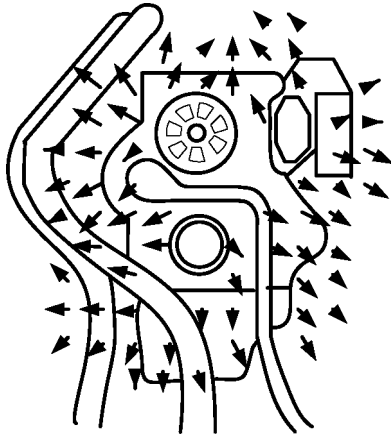


Рисунок 5.7 - Карта реактивной интенсивности на 400 Гц

В качестве следующего примера рассмотрим звуковое поле более сложного агрегата – комбинированного насоса, состоящего из шнекоцентробежной и шестеренной ступеней (ШС). Измерения интенсивности звука проводились по горизонтальной поверхности на расстоянии 25 см от верхней части корпуса насоса (рисунок 5.8). Помещение, в котором расположен стенд имеет размеры 6х4х3,5м.

Исследуемые режимы соответствуют частоте вращения ротора насоса 2100 об/мин и различным давлениям на входе в шестеренную ступень ($P_{вх}=2.1 \cdot 10^5$ Па, $P_{вх}=0,66 \cdot 10^5$ Па, $P_{вх}=0,18 \cdot 10^5$ Па). Данные режимы выбраны из соображений выявления влияния пульсационного состояния на акустическое поле.

В третьоктавной полосе частот 800 Гц максимальный уровень 88 дБ соответствует ШС (рисунок 5.9). На рисунке 5.10 изображены линии уровня при частичной кавитации. Уровень шума принадлежит шестеренной ступени и по интенсивности увеличился. При развитой кавитации источник шума на 800 Гц соответствует МЗК (рисунок 5.11).

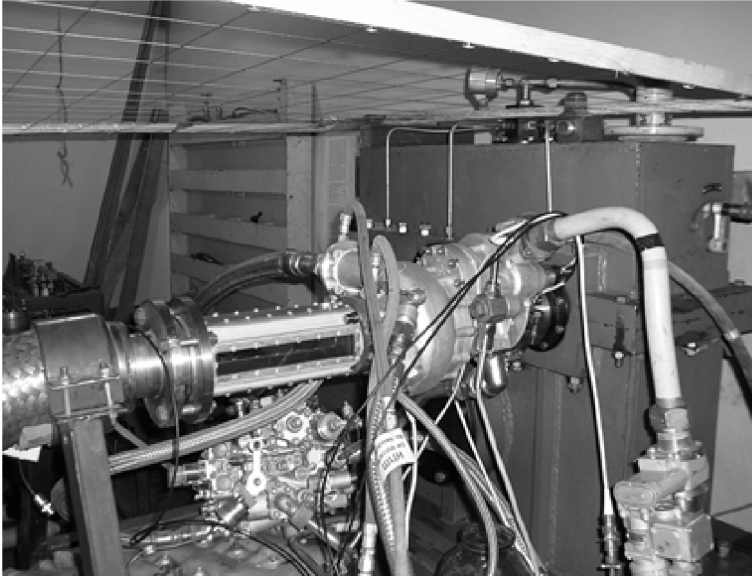


Рисунок 5.8 - Комбинированный насосный агрегат с измерительной сеткой

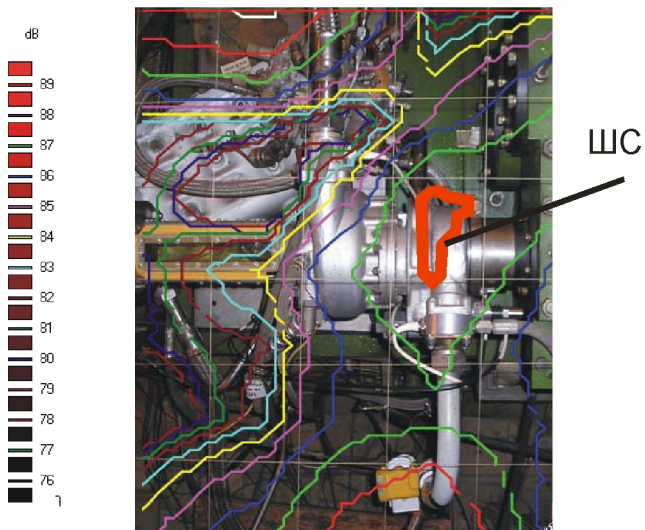


Рисунок 5.9 - Линии уровня на в трет октавной полосе частот 800 Гц, значение между линиями 2 дБ, штатный режим, $L_{max} = 86$ дБ

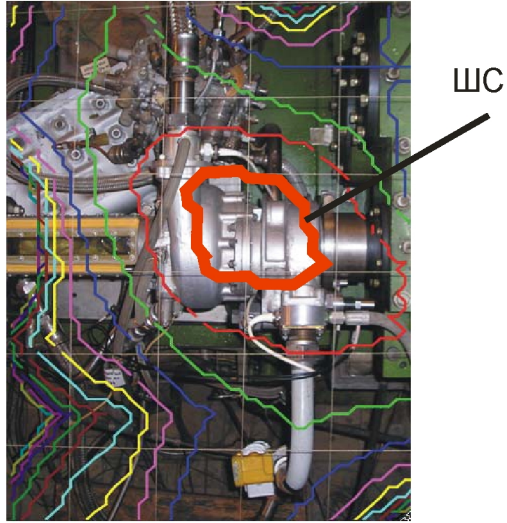


Рисунок 5.10 - Линии уровня в третьоктавной полосе частот 800 Гц, значение между линиями 1 дБ, режим частичной кавитации, $L_{max} = 92$ дБ

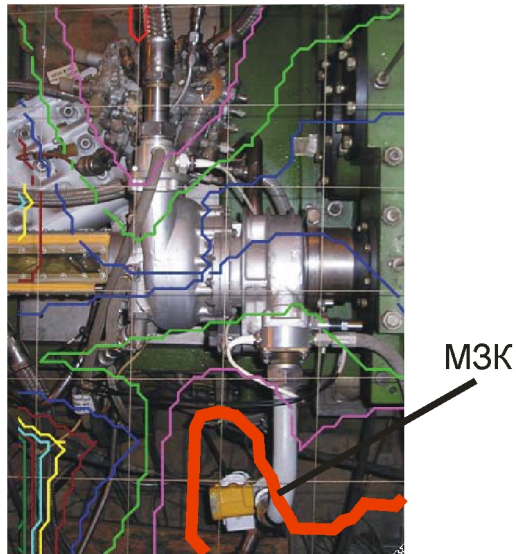


Рисунок 5.11 - Линии уровня в третьоктавной полосе частот 800 Гц, значение между линиями 1 дБ, режим развитой кавитации, $L_{max} = 85$ дБ

Интересные результаты получены при использовании интенсиметрии для исследования собственных колебаний объектов с пространственной распределенностью параметров, то есть объектов, размеры которых сопоставлены или больше длины звуковой волны. С помощью цифрового спекл-интерферометра с непрерывным лазером (на рисунке 5.12 представлена часть спекл-интерферометрического стола) исследованы собственные формы и частоты колебаний, а также карты возбуждаемых звуковых полей модельного объекта в виде жестко зажатой по контуру мембраны (рисунок 5.13). Массивная металлическая чаша имела дно, выполненное в виде тонкой мембраны толщиной 0,7 мм. Характерный вид спеклограмм с формами колебаний на частотах 395, 800, 1614 Гц представлен на рисунке 5.14-5.16,а). На этих же частотах просканировано звуковое поле в параллельной плоскости на расстоянии 30 мм от мембраны. Карты активной интенсивности никакой полезной информации в себе не несут, в то время как звуковые поля реактивной интенсивности (рисунки 5.14-5.16,б) соответствуют вибрационным полям, полученным методом цифровой спекл-интерферометрии.

На рисунке 5.17 представлена интерпретация полученных отрицательных значений реактивной интенсивности звука. Энергия от источника вибрации «сливается» в область нулевых перемещений.

Таким образом, показана принципиальная возможность применения реактивной интенсивности звука для идентификации структуры звукового поля и, тем самым, локализации источников шума.

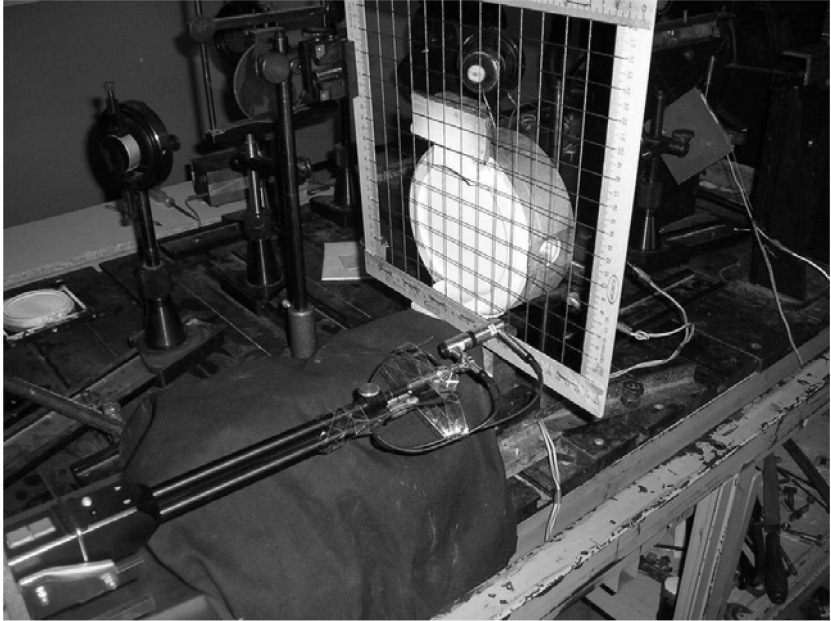


Рисунок 5.12. Экспериментальная установка

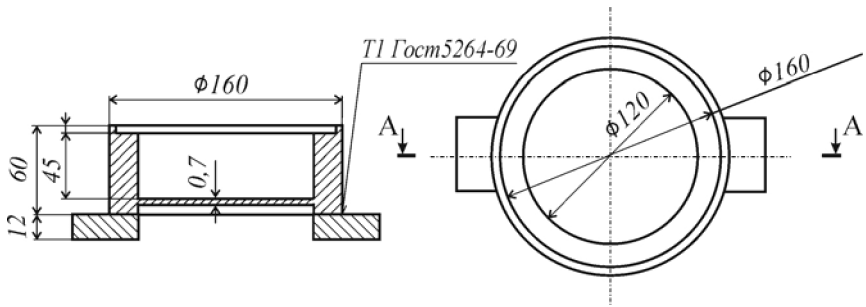
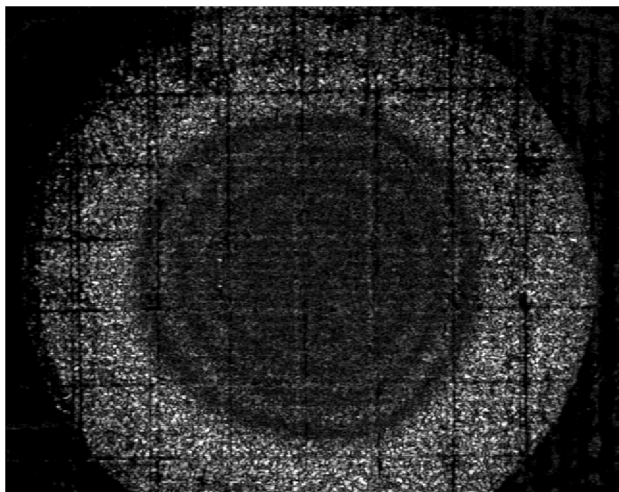
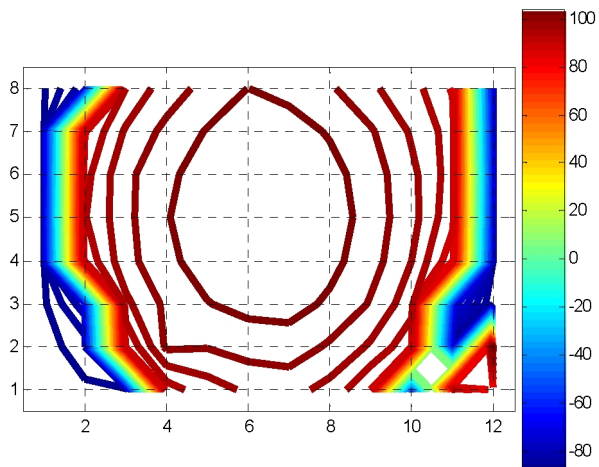


Рисунок 5.13 – Схема модельного объекта – чаши

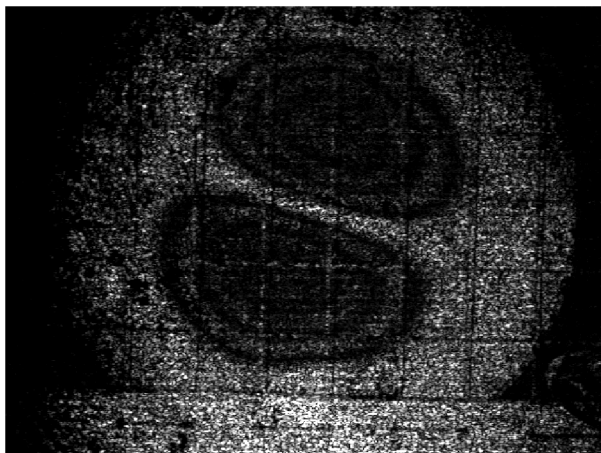


а)

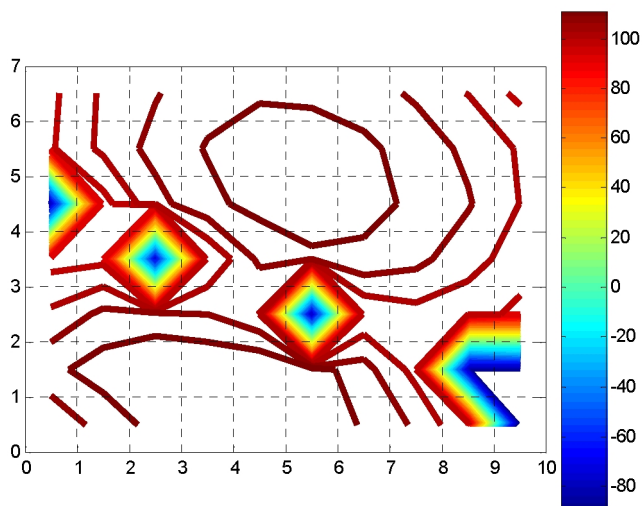


б)

Рисунок 5.14 - Спектрограмма мембраны на частоте 395 Гц (а), и соответствующая ей карта реактивной интенсивности звука ($L_p=45$ дБ, $L_I=40$ дБ, $L_J=100$ дБ), (б)

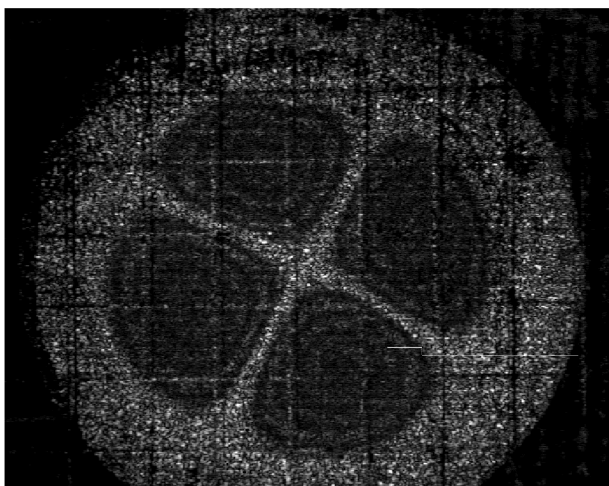


а)

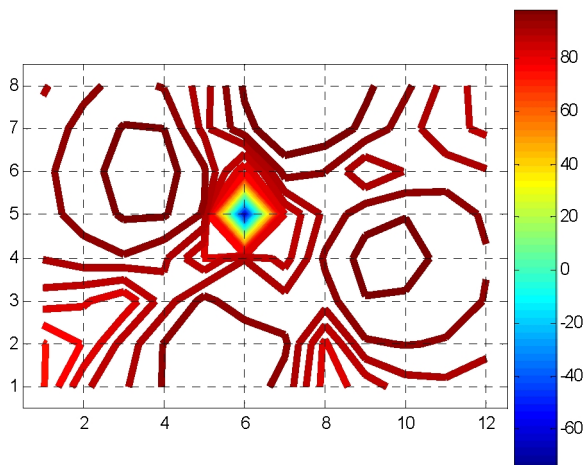


б)

Рисунок 5.15 - Спеклограмма мембраны на частоте 800 Гц (а), и соответствующая ей карта реактивной интенсивности звука ($L_p=45$ дБ, $L_I=40$ дБ, $L_J=100$ дБ), (б)



а)



б)

Рисунок 5.16 - Спектрограмма мембраны на частоте 1614 Гц (а), и соответствующая ей карта реактивной интенсивности звука ($L_p=45$ дБ, $L_I=40$ дБ, $L_J=100$ дБ), (б)

Вибрирующая
поверхность

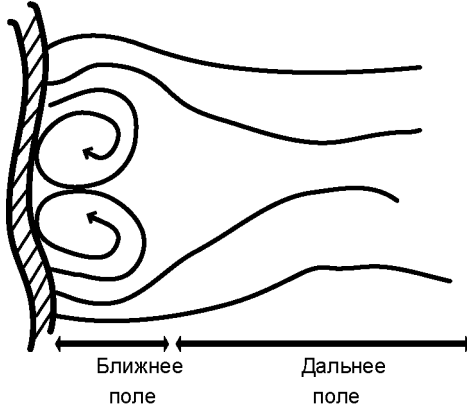


Рисунок 5.17 - Схема измерения интенсивности звука

6 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

6.1 ВИДЫ СИГНАЛОВ

Сигнал определяется как напряжение или ток, который может быть передан как сообщение или как информация. По своей природе все сигналы являются аналоговыми, будь то сигнал постоянного или переменного тока, цифровой или импульсный. Тем не менее, принято делать различие между аналоговыми и цифровыми сигналами.

Цифровым сигналом называется сигнал, определённым образом обработанный и преобразованный в цифры. Обычно эти цифровые сигналы связаны с реальными аналоговыми сигналами, но иногда между ними и нет связи. В качестве примера можно привести передачу данных в локальных вычислительных сетях (LAN) или в других высокоскоростных сетях.

В случае цифровой обработки сигнала (ЦОС) аналоговый сигнал преобразуется в двоичную форму устройством, которое называется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). На выходе АЦП получается двоичное представление аналогового сигнала, которое затем обрабатывается арифметическим цифровым сигнальным процессором (DSP). После обработки содержащаяся в сигнале информация может быть преобразована обратно в аналоговую форму с использованием цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Другой ключевой концепцией в определении сигнала является тот факт, что сигнал всегда несет некоторую информацию. Это ведет нас к ключевой проблеме обработки физических аналоговых сигналов – проблеме извлечения информации.

Главная цель обработки сигналов заключается в необходимости получения содержащейся в них информации. Эта информация обычно присутствует в амплитуде сигнала (абсолютной или отно-

сительной), в частоте или в спектральном составе, в фазе или в носительных временных зависимостях нескольких сигналов.

Как только желаемая информация будет извлечена из сигнала, она может быть использована различными способами. В некоторых случаях желательно переформатировать информацию, содержащуюся в сигнале.

Промышленные системы сбора данных и системы управления используют информацию, полученную от датчиков, для выработки соответствующих сигналов обратной связи, которые, в свою очередь, непосредственно управляют процессом. В некоторых случаях в сигнале, содержащем информацию, присутствует шум, и основной целью является восстановление сигнала. Такие методы, как фильтрация, автокорреляция, свертка и т.д., часто используются для выполнения этой задачи и в аналоговой, и в цифровой областях.

Сигналы могут быть обработаны с использованием аналоговых методов, цифровых методов или комбинации аналоговых и цифровых методов.

6.2 ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПАКЕТЕ MATLAB

Рассмотрим способы обработки сигналов в программном комплексе MATLAB. Обработка сигналов всегда являлась одной из самых главных прикладных областей применения данной системы.

Выражение "спектральный анализ" в сознании многих пользователей прочно ассоциируются с функцией `fft`, выполняющей дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Однако это всего лишь линейное преобразование, дающее *представление* детерминированного сигнала в частотной области. Если же анализируемый сигнал является *случайным*, для него имеет смысл только *оценка* спектральной плотности *мощности*, для расчета которой приходится тем или иным способом выполнять усреднение имеющихся данных. Кроме того, в ряде случаев нам известна некоторая дополни-

тельная информация об анализируемом сигнале, и эту информацию желательно учесть при спектральном анализе.

Методы спектрального анализа случайных сигналов делятся на два больших класса - **непараметрические** и **параметрические**. В *непараметрических* методах используется только информация, содержащаяся в отсчетах анализируемого сигнала. *Параметрические* методы предполагают наличие некоторой статистической *модели* случайного сигнала, а процесс спектрального анализа в данном случае включает в себя определение *параметров* этой модели.

В пакете Signal Processing (обработка сигналов) имеются функции, реализующие разнообразные методы спектрального анализа – как параметрические, так и непараметрические. Кроме того, имеются функции для получения других усредненных характеристик случайных дискретных сигналов.

Для определения спектральных характеристик дискретного случайного процесса вычисляется средний спектр мощности его ограниченного по длине фрагмента. Кроме того, этот спектр можно выразить через корреляционную функцию случайного процесса:

$$W(\omega) = \sum_{k \rightarrow \omega}^{\omega} R(k) e^{-j\omega k T} .$$

Это выражение представляет собой дискретный аналог теоремы Винера—Хинчина: *спектр дискретного случайного процесса является преобразованием Фурье от его корреляционной функции.*

6.2.1 Непараметрические методы

Как уже говорилось, при использовании непараметрических методов расчета спектра случайного процесса используется только информация, заключенная в отсчетах сигнала, без каких-либо дополнительных предположений. В пакете Signal Processing реализованы три таких метода— периодограмма, метод Уэлча (Welch) и метод Томсона (Thomson).

Периодограммой (periodogram) называется оценка спектраль-

ной плотности мощности, полученная по N отсчетам *одной реализации* случайного процесса. Если при расчете спектра используется весовая функция (окно), полученная оценка спектра мощности называется *модифицированной периодограммой* (modified periodogram):

В пакете Signal Processing вычисление периодограммы (в том числе модифицированной) производится с помощью функции **periodogram**.

Для уменьшения изрезанности периодограммы необходимо применить какое-либо усреднение. Бартлетт (Bartlett) предложил разделять анализируемый сигнал на неперекрывающиеся сегменты, вычислять для каждого сегмента периодограмму и затем эти периодограммы усреднять. Если корреляционная функция сигнала на длительности сегмента затухает до пренебрежимо малых значений, то периодограммы отдельных сегментов можно считать независимыми. Уэлч (Welch) внес в метод Бартлетта два усовершенствования: использование весовой функции и разбиение сигнала на *перекрывающиеся* фрагменты. Применение весовой функции позволяет ослабить растекание спектра и уменьшить смещение получаемой оценки спектра плотности мощности ценой незначительного ухудшения разрешающей способности. Перекрывание сегментов введено для того, чтобы увеличить их число и уменьшить дисперсию оценки.

Вычисления при использовании метода Уэлча (он называется еще методом усреднения модифицированных периодограмм — averaged modified periodogram method) организуются следующим образом: вектор отсчетов сигнала делится на перекрывающиеся сегменты, каждый сегмент умножается на используемую весовую функцию, для взвешенных сегментов вычисляются модифицированные периодограммы, периодограммы всех сегментов усредняются.

Метод Уэлча является наиболее популярным периодограммным методом спектрального анализа. В пакете Signal Processing он реализуется с помощью функции **pwelch**.

Метод Томсона, реализуемый функцией **pmtm**, основан на использовании *вытянутых сфероидальных функций* (prolate spheroidal functions). Эти функции конечной длительности обеспечивают максимальную концентрацию энергии в заданной полосе частот. Помимо собственно спектральной оценки, функция **pmtm** может возвращать ее доверительный интервал.

В качестве примера сформируем реализацию экспоненциально-коррелированного случайного процесса и произведем ее спектральный анализ тремя перечисленными методами. Необходимый нам случайный сигнал формируется путем пропускания нормального дискретного белого шума через рекурсивный фильтр первого порядка:

$$\begin{aligned} X0 &= \text{randn}(1, 1000); \\ a &= 0.9; \\ X &= \text{filter}(1, [1 -a], X0); \end{aligned}$$

Строим периодограмму (рисунок 6.1):

$$\text{periodogram}(X, [], [], 1)$$

Как видите, периодограмма оказывается весьма изрезанной. Теперь выполним оценку спектра той же реализации методом Уэлча (рисунок 6.2):

$$\text{pwelch}(X, [], [], [], 1)$$

На выводимом функцией **pmtm** графике вместе с оценкой спектра мощности показаны границы доверительного интервала.

Изрезанность графика оказывается значительно меньшей.

Наконец, используем метод Томсона (рисунок 6.3):

$$\text{pmtm}(X, [], [], 1)$$

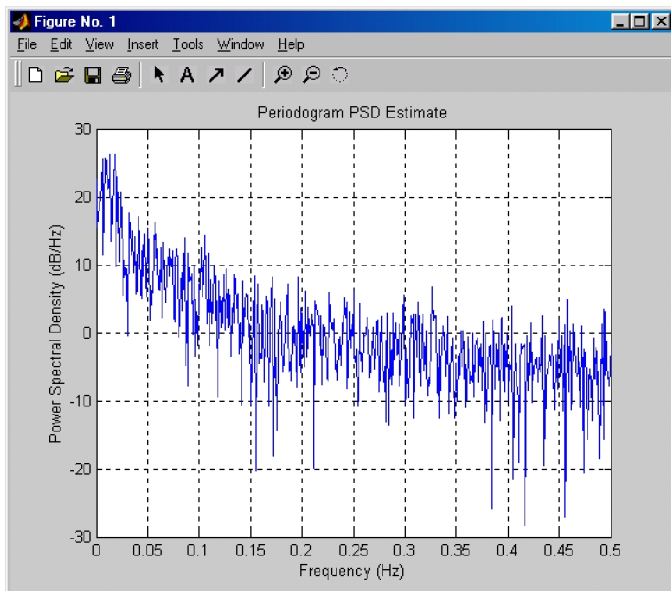


Рисунок 6.1 - Спектр, полученный методом периодограммы

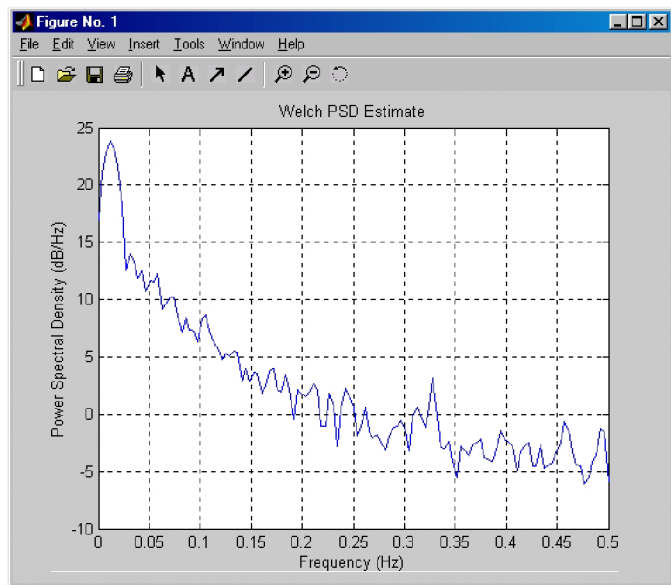


Рисунок 6.2 - Спектр, полученный методом Уэлча

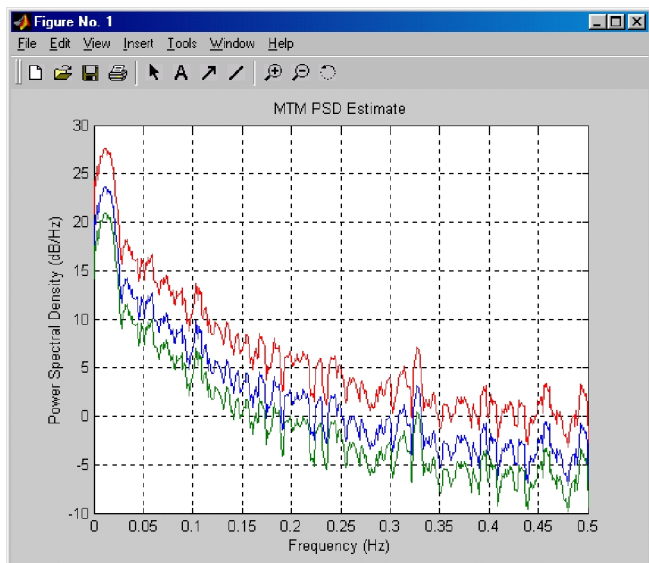


Рисунок 6.3. Спектр, полученный методом Томсона

6.2.2 Параметрические методы

Использование параметрических методов подразумевает наличие некоторой математической *модели* анализируемого случайного процесса. Спектральный анализ сводится в данном случае к решению оптимизационной задачи, то есть поиску таких *параметров* модели, при которых она наиболее близка к реально наблюдаемому сигналу. В пакете Signal Processing реализован ряд разновидностей авторегрессионного анализа и два метода, основанных на анализе собственных чисел и векторов корреляционной матрицы сигнала: MUSIC (Multiple Signal Classification) и EV (EigenVectors).

Авторегрессионные методы

Согласно *авторегрессионной модели* сигнал формируется путем пропускания дискретного белого шума через "чисто рекурсивный" фильтр N -го порядка. Спектральная плотность мощности такого сигнала пропорциональна квадрату модуля коэффициента функции передачи формирующего фильтра. Таким образом, дан-

ный метод спектрального анализа сводится к определению коэффициентов фильтра заданного порядка, оценке мощности возбуждающего белого шума и аналитическому расчету спектральной плотности мощности. Для определения коэффициентов модели производится минимизация ошибки *линейного предсказания* сигнала. Теоретический анализ показывает, что оптимальные коэффициенты модели определяются лишь корреляционной функцией сигнала.

Был разработан целый ряд методов авторегрессионного анализа, отличающихся в основном подходом к обработке краевых эффектов (то есть к способу вовлечения в вычисления тех краевых отсчетов сигнала, для которых при вычислении КФ не оказывается сдвинутой пары). В пакете Signal Processing реализованы метод Берга (Burg), ковариационный метод, модифицированный ковариационный метод и авторегрессионный метод Юла—Уолкера (Yule—Walker).

Авторегрессионные методы анализа спектра больше всего подходят для сигналов, действительно являющихся авторегрессионными процессами. Вообще, хорошие результаты эти методы дают тогда, когда спектр анализируемого сигнала имеет четко выраженные пики. В частности, к таким сигналам относится сумма нескольких синусоид с шумом.

При использовании авторегрессионных методов важно правильно выбрать порядок авторегрессионной модели - он должен быть в два раза больше числа синусоидальных колебаний, которые предположительно содержатся в анализируемом сигнале.

Каждому методу авторегрессионного анализа в пакете Signal Processing соответствуют две функции — функция вычисления коэффициентов модели и функция собственно спектрального анализа. Функция спектрального анализа вызывает функцию расчета коэффициентов модели, а затем производит вычисление спектра. Имена функций сведены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 - Функции расчета коэффициентов модели и

спектрального анализа

Название метода	Функция расчета коэффициентов модели	Функция спектрального анализа
Ковариационный метод	acov	pcov
Модифицированный ковариационный метод	amcov	pmcov
Метод Берга	arburg	pburg
Авторегрессионный метод Юла—Уолкера	aryule	pyulear

Сформированный в приведенном выше примере экспоненциально-коррелированный случайный сигнал является авторегрессионным процессом первого порядка, поэтому перечисленные методы спектрального анализа являются для него вполне адекватными. Применим метод Берга, задав порядок авторегрессионной модели, равный единице (это второй параметр функции **pburg**) (рисунок 6.4):

$$pburg(X, 1, [], 1)$$

Полученная гладкая кривая практически совпадает с теоретическим спектром данного случайного процесса.

Рассмотрим методы, основанные на анализе собственных чисел и векторов корректирующей матрицы.

Метод MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) предназначен для спектрального анализа сигналов, представляющих собой сумму нескольких синусоид (точнее, в общем случае — нескольких комплексных экспонент) с белым шумом. Целью спектрального анализа подобных сигналов, как правило, является не расчет спектра как такового, а определение частот и уровней (амплитуд или мощностей) гармонических составляющих. Метод MUSIC предназначен именно для этого, поэтому получаемая с его помощью зависимость уровня сигнала от частоты называется *псевдоспектром* (pseudospectrum).

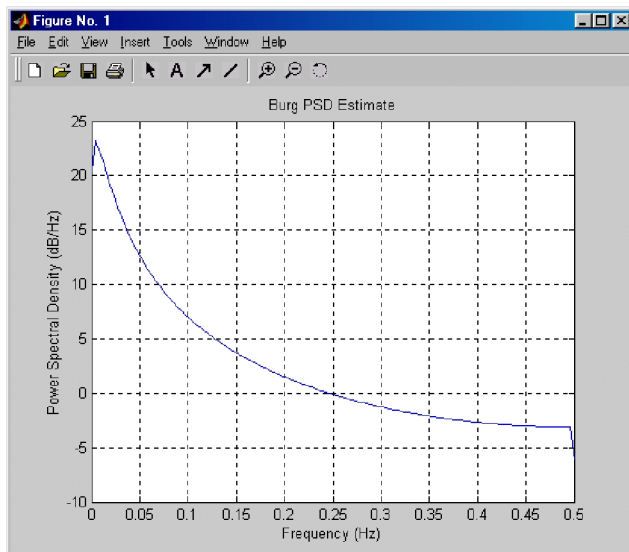


Рисунок 6.4 - Спектр, полученный методом Берга

В основе метода лежит анализ собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы сигнала. При выполнении анализа необходимо указать порядок модели, то есть число комплексных экспонент, предположительно содержащихся в сигнале.

В пакете Signal Processing метод MUSIC реализован с помощью функции **pmusic**, а функция **rootmusic** позволяет получить оценки частот и мощностей гармонических составляющих сигнала.

Близким родственником MUSIC является метод анализа собственных векторов (eigenvectors, EV). Его отличие состоит лишь в том, что в расчетных формулах собственные векторы умножаются на весовые коэффициенты, обратно пропорциональные соответствующим собственным числам. В литературе приводятся сведения о том, что метод EV порождает меньше ложных спектральных пиков, чем MUSIC, и, как правило, лучше передает форму спектра шума.

В пакете Signal Processing метод EV реализован с помощью функции **peig**, а функция **rooteig** позволяет получить оценки частот и мощностей гармонических составляющих сигнала.

Следует подчеркнуть, что псевдоспектры не являются оценками истинного спектра плотности мощности, а представляют собой лишь спектральные *псевдооценки*, позволяющие оценивать частоты синусоидальных или узкополосных составляющих сигнала с разрешением, несколько превосходящим разрешение авторегрессионных методов.

6.2.3 Весовые функции (окна)

Дискретное преобразование Фурье, используемое во всех непараметрических методах спектрального оценивания, подразумевает периодическое продолжение анализируемого фрагмента сигнала. При этом на стыках фрагментов могут возникать скачки, приводящие к появлению боковых лепестков значительного уровня в спектральной области. Для ослабления этого эффекта сигнал перед выполнением ДПФ умножают на спадающую от центра к краям *весовую функцию (окно)*. В результате величина скачков на стыках сегментов уменьшается, меньше становится и уровень нежелательных боковых лепестков спектра - платой за это является некоторое расширение спектральных пиков.

Простейшим является прямоугольное окно, реализуемое функцией **rectwin**. Прямоугольное окно соответствует отсутствию взвешивания, данная функция включена в состав пакета лишь для формальной полноты набора весовых функций. Треугольное окно реализуется функцией **triang**, треугольную форму имеет и окно Бартлетта (функция **bartlett**), оно лишь несколько отличается способом расчета.

Несколько весовых функций являются комбинациями гармонических составляющих. Перечислим их в порядке возрастания числа косинусоидальных слагаемых:

- Окно Ханна (функция **hann**), иногда неправильно называемое окном Хэннинга - одно косинусоидальное слагаемое.
- Окно Хэмминга (функция **hamming**) - одно косинусоидальное слагаемое.

- Окно Блэкмена (функция **blackman**) - два косинусоидальных слагаемых.
- Окно Блэкмена - Харриса (функция **blackmanharris**) - три косинусоидальных слагаемых.
- Окно Наттолла (альтернативная версия окна Блэкмена - Харриса, функция **nuttallwin**) - три косинусоидальных слагаемых.

Остальные окна описываются более сложными математическими соотношениями. Форма гауссова окна (функция **gausswin**) не требует пояснений. Модифицированное окно Бартлетта—Ханна (функция **barthannwin**) представляет собой линейную комбинацию окон Бартлетта и Ханна. Окно Бомена (функция **bohmanwin**) является сверткой двух одинаковых косинусоидальных импульсов. Окно Чебышева (функция **chebwin**) обладает боковыми лепестками фиксированного (задаваемого при расчете) уровня и рассчитывается путем обратного преобразования Фурье частотной характеристики окна. Окно Кайзера (функция **kaiser**) также обладает параметром, регулирующим уровень боковых лепестков и ширину главного лепестка, при расчете данного окна используются модифицированные функции Бесселя. Окно Тьюки (функция **tukeywin**) является прямоугольником с косинусоидально сглаженными краями. При крайних допустимых значениях коэффициента сглаживания оно превращается в прямоугольное окно или окно Ханна.

6.2.4 Функции корреляционного анализа

Функции, относящиеся к данной категории, вычисляют различные статистические параметры сигналов. Функции можно разделить на несколько групп.

Первая группа относится к вычислению корреляционных и ковариационных функций (здесь следует напомнить, что в отечественной и зарубежной терминологии эти понятия не совпадают; в данном обзоре используется зарубежный вариант, принятый в MATLAB). Функция **xcorr** позволяет оценить корреляционную функцию сигнала или взаимную корреляционную функцию двух

сигналов. Вариант этой функции, предназначенный для работы с двумерными сигналами, имеет имя **xcorr2**. Функция **xcov** предназначена для оценивания ковариационной функции сигнала или взаимной ковариационной функции двух сигналов. Функции **cov** и **corrcoef**, входящие в базовую библиотеку MATLAB, позволяют получить соответственно ковариационную матрицу и матрицу коэффициентов корреляции путем усреднения нескольких реализаций случайных данных. Функция **corrmtx** возвращает матрицу промежуточных данных для оценки корреляционной матрицы сигнала, а также может возвращать и саму эту матрицу.

6.2.5 Кепстральный анализ

В том случае, когда изменение состояния проявляется недостаточно четко и не распознается по амплитудному спектру или по корреляционной функции, целесообразно применять кепстральный анализ. Математически кепстр определяется как спектр мощности сигнала от логарифма спектра мощности. Независимой переменной кепстра является квефренси, имеющая размерность времени.

Кепстр $C(q)$ описывается выражением:

$$C(q) = F(\log_2[G(w)])^2,$$

где F - преобразование Фурье.

В пакете *Signal Processing* имеется несколько функций, связанных с кепстральным анализом.

Функция **rceps** рассчитывает вещественный кепстр сигнала, при этом игнорируется информация, содержащаяся в фазовом спектре. Комплексный кепстр, вычисляемый с помощью функции **scceps**, учитывает как амплитудную, так и фазовую информацию, поэтому его связь с исходным сигналом является взаимно-однозначной. Применение кепстра целесообразно в области, связанной с импульсным проявлением дефекта, например дефект в подшипнике (рисунок 6.5, 6.6).

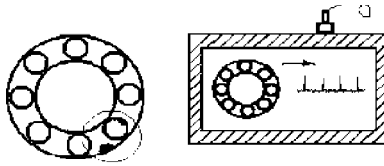


Рисунок 6.5 - Подшипник с дефектом

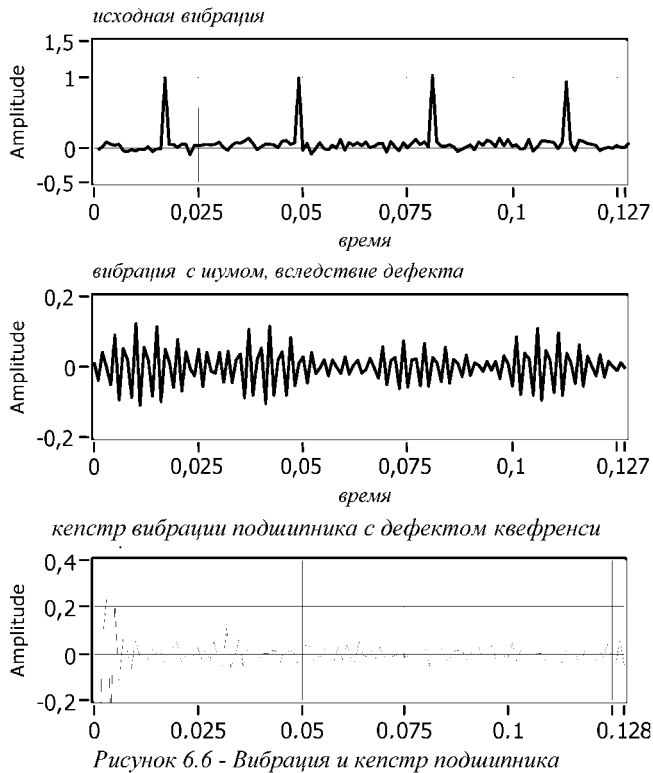


Рисунок 6.6 - Вибрация и кепстр подшипника

6.2.6 Программа обработки сигналов - SPTool (Signal Processing Tool)

Программа обработки сигналов SPTool (Signal Processing Tool) позволяет выполнять следующие операции: импортировать сигналы из MAT-файлов или рабочей области MATLAB; просматривать графики сигналов (в том числе нескольких одновременно); применять к сигналам различные методы спектрального анализа и про-

смаивать полученные графики; рассчитывать дискретные фильтры с использованием функций пакета (в том числе путем прямого редактирования расположения нулей и полюсов); пропускать сигналы через фильтры и анализировать получающиеся выходные сигналы.

Следует отметить, что в части анализа и синтеза фильтров возможности программы SPTool являются более узкими, чем у программы FDATool (единственным исключением является отсутствующая в FDATool возможность прямого редактирования расположения нулей и полюсов). Впрочем, эти ограничения компенсируются возможностью экспорта рассчитанного фильтра из FDATool в SPTool.

На приведенных ниже рисунках показан вид окна программы SPTool при просмотре графика сигнала (рисунок 6.7), при анализе спектра (рисунок 6.8).

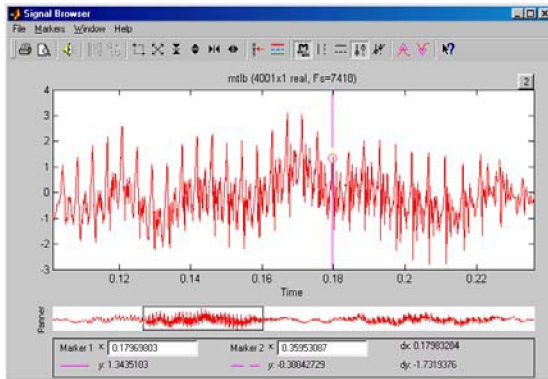


Рисунок 6.7 - Окно просмотра сигнала

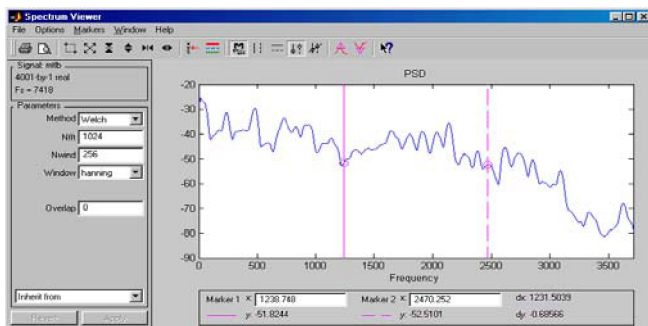


Рисунок 6.8 - Окно выбора параметров спектра

6.3 ВРЕМЯ-ЧАСТОТНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ СИГНАЛА

Важным моментом в исследованиях динамических систем является время - частотное разложение сигнала.

6.3.1 Оконное преобразование Фурье

При оконном преобразовании Фурье (ОПФ) сигнал делится на отрезки («окна»), в пределах которых его можно считать стационарным. Для этого к сигналу применяется оконная функция w , ширина которой должна быть равной ширине окна.

Пусть ширина оконной функции T сек. Тогда в момент времени $t=0$ она перекрывается с $T/2$ сек. сигнала. Оконная функция и сигнал перемножаются. Если оконная функция прямоугольная и единичной высоты, то сигнал не изменяется. В противном случае он взвешивается с оконной функцией. Затем произведение подвергается преобразованию Фурье.

В результате мы получаем ПФ первых $T/2$ сек исходного сигнала. Если этот отрезок стационарен, как мы и предполагали, то полученный результат преобразования корректно отображает частотное наполнение первых $T/2$ сек сигнала.

Следующим шагом является сдвиг оконной функции на некоторую величину $t1$ сек. Сдвинутая функция вновь умножается с сигналом, выполняется ПФ произведения. Эта процедура повторяется до достижения конца исходного сигнала. Все вышесказанное

об ОПФ можно записать в следующем виде:

$$STFT_x^{(\omega)}(t, f) = \int_t [x(t) \cdot \omega^*(t - t')] \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

На рисунке 6.9, 6.10 показаны спектрограммы сигнала при различных значениях окна.

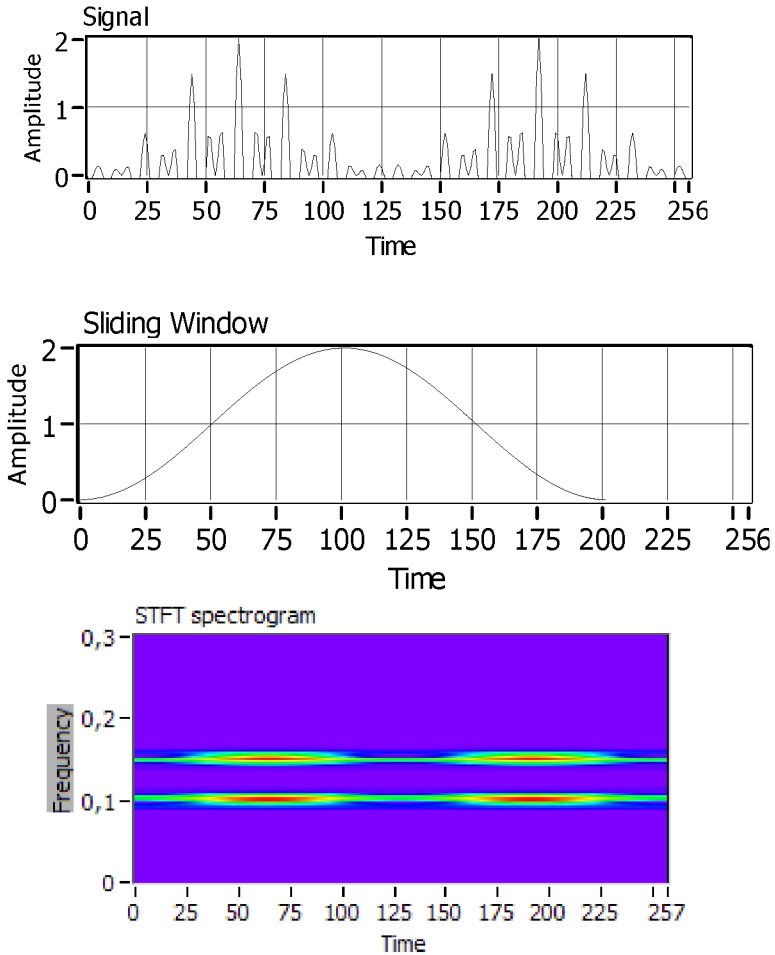


Рисунок 6.9 - Сигнал, окно и спектрограмма при высоком разрешении по частоте

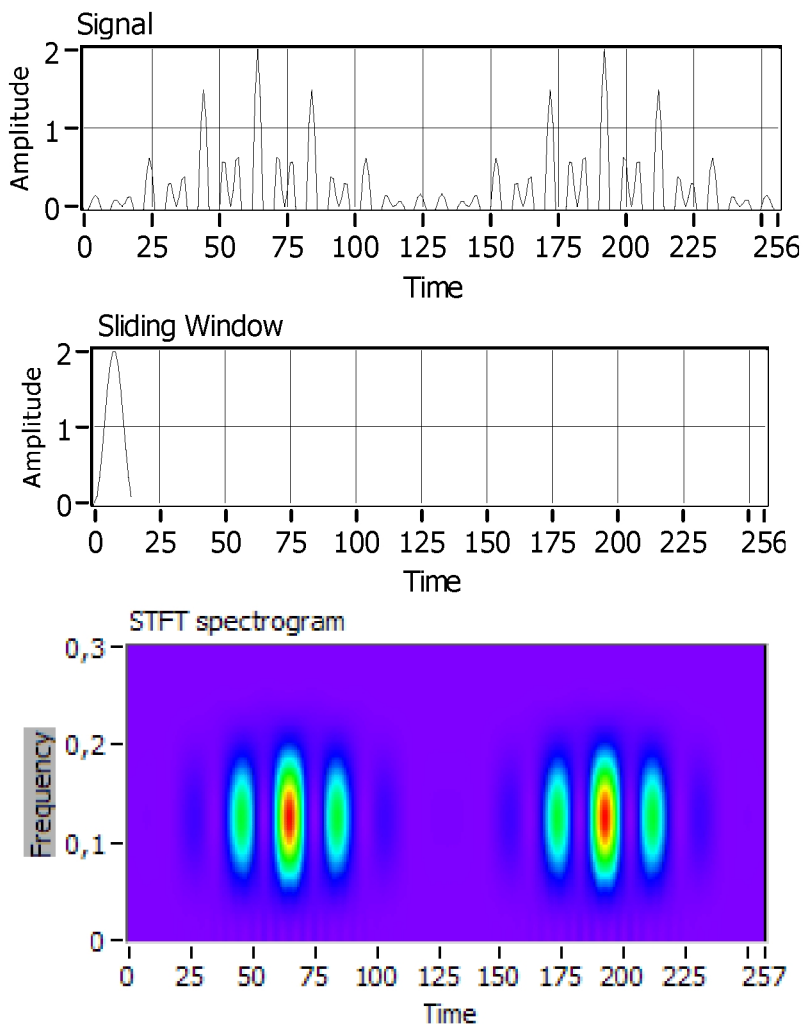


Рисунок 6.10 - Сигнал, окно и спектрограмма при высоком разрешении по времени

6.3.2 Непрерывный вейвлет-анализ

Непрерывный вейвлет-анализ представляет собой достаточно гибкий и в то же время весьма мощный инструмент временного и спектрального анализа, целью которого является построение частотно-временных характеристик сигналов. Можно назвать по край-

ней мере 2 характерные особенности, присущие непрерывному вейвлет-анализу.

Первой такой особенностью является трехмерное представление сигнала в спектральной области. Другой отличительной чертой является существование ряда возможностей уменьшения избыточности информации, приводящей к алгоритмам сжатия и выделения сигналов из шума, посредством введения техники статистического анализа.

Вейвлет-анализ – это исследование сигнала $f(t)$ при помощи вычисления величин, но с другими «пробными функциями». Сигнал $f(t)$ интерпретируется, как функция из $L^2(\mathbb{R})$, а вместо гармоник $\{e^{im}\}$ используется система функций $\psi_{a,b}(t) = \psi\left(\frac{b-t}{a}\right)$, занумерованных не целыми числами, а двумя непрерывными параметрами. Эта система получается из фиксированной функции $\psi(t)$ всевозможными сдвигами и растяжениями. Функция $\psi(t)$ называется *вейвлетом* (по-английски – *wavelet*; в русской математической литературе используется также термин *всплеск*), если:

- A. $\psi(t)$ непрерывна;
- B. $\psi(t)$ интегрируема на всей прямой;
- C. $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$

Вейвлет-преобразованием $f(t)$ называется функция двух переменных:

$$Wf(b, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{b-t}{a}\right) dt$$

Итак, в отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование определено неоднозначно: каждому вейвлету соответствует свое преобразование. Условие C означает, что Фурье-

образ $\hat{\psi}(\omega)$ вейвлета обращается в 0 при $\omega = 0$; это нужно для того, чтобы в Фурье-области вейвлет был локализован вокруг некоторой ненулевой частоты ω_0 . В качестве анализирующих вейвлетов обычно выбираются функции, хорошо локализованные также и в «пространственной области» (т.е. по t). На рисунке 6.11 изображен типичный график вейвлета и его Фурье-образа.

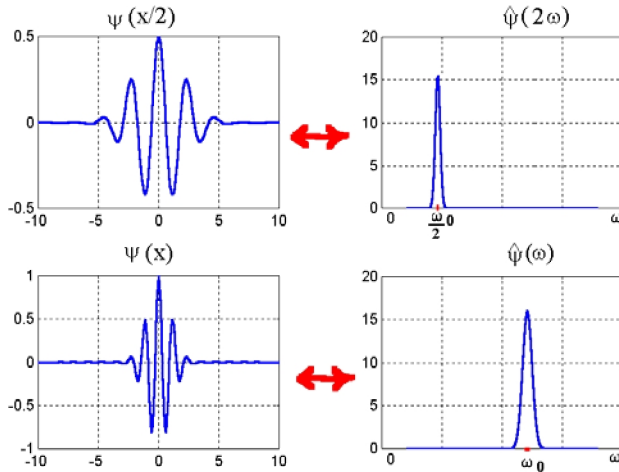


Рисунок 6.11 - Вейвлет в пространственной и частотной областях

Следующие рисунки показывают, какую информацию о сигнале можно получить при помощи вейвлет-преобразования. Вертикальная ось отвечает «масштабной» переменной a (на рисунках указаны значения $-\log_2(a)$, так что внизу находятся точки, отвечающие малым масштабам, а сверху – большим). По горизонтальной оси – переменная b (совпадающая с t). Условными цветами показано распределение абсолютных значений $Wf(b, a)$. Рассмотрим сначала простейшие сигналы. «Чистым гармоникам» вида e^{iat} соответствуют яркие горизонтальные полосы, где модуль $Wf(b, a)$ велик. Локальным особенностям (нарушениям гладкости) отвечают вертикальные полосы.

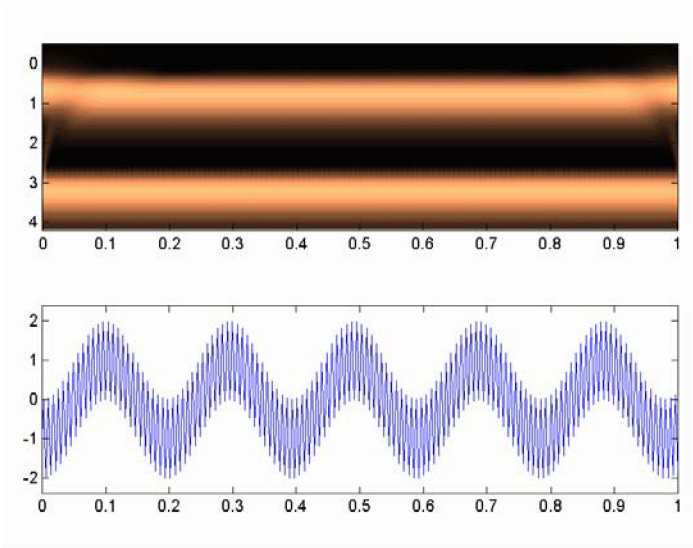


Рисунок 6.12 - График суммы двух гармоник (внизу) и его вейвлет-преобразование (вверху)

На рисунке 6.13 приведен другой пример сегментации различных частотных компонент сложного сигнала с помощью вейвлет-преобразования.

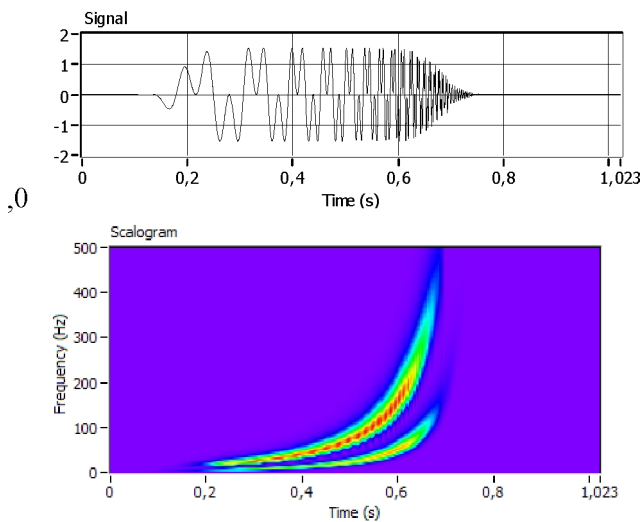


Рисунок 6.13 - Сигнал и его вейвлет-преобразование

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии изложены материалы лекций, практических и лабораторных работ учебной дисциплины «Динамические измерения и обработка экспериментальных данных», преподаваемой в Самарском государственном аэрокосмическом университете для студентов специальности 15.08.02 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика». Данная дисциплина относится к специальным и является частью цикла дисциплин, направленных на углубленное изучение динамики и виброакустики гидравлических и пневматических систем. В учебном пособии представлены материалы, иллюстрирующие классификацию динамических измерений, средств и погрешностей, приборы и первичные преобразователи, используемые при динамических измерениях, дано описание методов обработки экспериментальных данных. При этом следует помнить, что инженерная и научная область динамических измерений и обработки экспериментальных данных в настоящее время очень быстро развивается, претерпевает качественные изменения. Поэтому авторами ведется настоящее обновление используемое в учебном курсе материала, что будет отражено в последующих изданиях учебного пособия.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Пронкин Н.С. Основы метрологии динамических измерений: Учеб. пособие для вузов. - М.: Логос, 2003 – 256 с.
2. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта и др.; Под общ. ред. Т. М. Башты. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
3. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2 кн. Кн. 1 / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. – 448 с.
4. Аппаратура тензометрическая на несущей частоте 4АНЧ-22. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
5. Грановский В.А. Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 224 с.
6. ГОСТ 31169 – 2003. Измерение уровней звукового давления излучения на рабочем месте и в других контрольных точках. Ориентировочный метод измерения на месте установки.
7. ГОСТ 31172 - 2003. Измерение уровней звукового давления излучения на рабочем месте и в других контрольных точках. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью.
8. ГОСТ 30683 - 2000. Измерение уровней звукового давления излучения на рабочем месте и в других контрольных точках. Метод с коррекциями на акустические условия.
9. ГОСТ Р 51402 – 99. Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению. Ориентировочный метод с использованием измерительной поверхности над звукопоглощающей плоскостью.
10. ГОСТ 23941-2002. Методы определения шумовых характеристик. Общие требования.
11. ГОСТ 3 51400-99 Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению. Технические методы для малых переносных источников шума в реверберационных полях в

помещениях с жёсткими стенами и в специальных реверберационных камерах.

12. Active and Reactive Intensity Measurements using the Dual Channel Real-Time Frequency Analyzer\ Bruel&Kjer application notes.

13. Кравчун П.Н. Генерация и методы снижения шума и звуковой вибрации. М.: Изд-во МГУ, 1991. 184 с.

14. Sound Intensity. Internet: www.bksv.com/publication.

15. Методика и техника измерения звуковой мощности источников шума.: Обзор ЦАГИ. № 683. Писаревский Н.Н., Каурова Н.Ф., Марчик Н.А..

16. Моделирование динамических режимов работы насосов / БЕЛНИИНТИ. – 1986. № 542/2. - 10с.

17. Сергиенко А.Б. Signal Processing Toolbox – обзор. www.matlab.ru.

18. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. – М.: Физматлит, 2003.-171 с.

19. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: Солон-Р, 2002. - 448 с.

20. Левкович-Маслюк Л., Переберин А. Введение в вейвлет-анализ. ИПМ РАН. - Москва, 1999 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
ПРОТОКОЛ ТАРИРОВКИ ДАТЧИКОВ

Дата: _____

Место проведения испытания: _____

Испытатель: _____

Тип датчика: _____

Номер датчика: _____

Канал 4-АНЧ-
22: _____

Установки 4-АНЧ-22: _____

Канал
АЦП: _____

Рабочее давление, Па					
Имя файла					
Напряжение, В					

Результаты тарировки
при текущих установках 4-АНЧ-22: _____

Результаты тарировки
при установках 4-АНЧ-22: ст.-дин. 1/1: _____

Результаты тарировки
при установках 4-АНЧ-22: дин. 1/1: _____

Ответственный испытатель: _____

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРОТОКОЛ ЗАМЕРОВ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Дата: _____

Место проведения испытания: _____

Испытатель: _____

Объект и его рабочие параметры: _____

Таблица 1

№ параметра	Место установки датчика	Тип датчика	Номер датчика	Прибор	№ канала прибора	№ канала АЦП	Отображение на экране

Таблица 2

№ замера	Имя файла	Установки прибора для измеряемого параметра №1	Установки прибора для измеряемого параметра №2	Установки прибора для измеряемого параметра №3	Характеристики объекта	Примечание (частота дискр., время записи и т.д.)

Ответственный исполнитель: _____

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Образец протокола поверки капсюля.

ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ КАПСЮЛЯ М101 №6798

1. Определение номинального уровня чувствительности капсюля.

Таблица 1.

Наименование и единица измерения поверяемой характеристики	Величина, дБ		
	Номинальная	Предельного отклонения	Фактическая
Номинальный уровень чувствительности капсюля по холостому ходу на частоте 300 ± 15 Гц относительно $1\text{В}\cdot\text{Па}^{-1}$, дБ	-26	± 2	-24,8

Вывод: годен.

2. Определение максимального отклонения уровня чувствительности.

Таблица 2.

Наименование и единица измерения поверяемой характеристики	Величина, дБ		
	Номинальная	Предельного отклонения	Фактическая
Максимальное отклонение уровня чувствительности в номинальном диапазоне частот по свободному полю для капсуля от уровня чувствительности на частоте 300 ± 15 Гц в диапазоне частот:			
1) от 2 до 20 Гц		± 2	-0,2
2) св.20 до 80 Гц		± 1	0,3
3) св.80 до 4000 Гц		$\pm 0,8$	-0,5
4) св.4000 до 8000 Гц		$\pm 1,3$	0,8
5) св.8000 до 18000 Гц		+1,5...-2	-1,1
6) св.18000 до 20000 Гц		+2...-5	-2,7

Вывод: годен.

**Протокол измерения звукового давления излучения
в контрольных точках.**

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЕЙ ЗВУКОВОГО ДАВ-
ЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧКАХ**

1. Исследуемый объект.

Обозначение, тип _____

Размеры, м _____ Серийный номер _____

2. Условия испытаний (точное качественное описание режима работы, операционных периодов и рабочего стола цикла) _____

3. Акустические внешние условия.

Обработка стен, потолка и пола испытательного помещения _____

Показатель акустических условий и его соответствия _____

Схема расположения объекта испытаний и находящихся в помещении других объектов

4. Аппаратура, применяемая при измерениях (наименование, тип, серийный номер, предприятие – изготовитель) _____

5. Расположение контрольных точек _____

6 Акустические данные _____

№ контрольной точки	L'_{pA}	K_{1A}	K_{3A}	L_{pA}

7. *Результат измерения* _____

8. *Место и дата проведения испытаний* _____

9. *Фамилия ответственного за испытания* _____

Подпись _____

Учебное издание

*Гаспаров Маркар Сергеевич,
Крючков Александр Николаевич,
Прокофьев Андрей Брониславович,
Шахматов Евгений Владимирович*

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ
ГИДРОСИСТЕМ**

Учебное пособие

Редакторская обработка О. Ю. Дьяченко
Корректорская обработка Т. Ю. Деппова
Компьютерная верстка Н. Ю. Лысенкова
Доверстка Т. К. Кретьнина

Подписано в печать 15.12.06 Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,44. Усл. кр.-отг. 7,56. Печ.л. 8,0.
Тираж 50 экз. Заказ ИП-23/2006

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.