

# 1. Введение

Испытания ударным молотком применяются для измерения амплитудно-частотных и передаточных характеристик объектов. Ударный молоток создает импульс, который передается материалу, и затем измеряется отклик в виде звука или вибрации.

По этим данным можно судить о прочности и целостности материала. Метод испытаний ударным молотком широко применяется в строительстве, машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности, а также в лабораторных условиях для научных исследований и контроля качества продукции.

Преимуществом метода испытаний с помощью ударного молотка является возможность проведения испытаний в полевых условиях и скорость подготовки испытания, поскольку не требует длительной процедуры препарирования объекта испытаний множеством датчиков и развертыванием системы возбуждения объекта модальным вибростендом.

## 2. Назначение программы

Данная программа предназначена для анализа вибраций, связанных с лопатками турбин и других вращающихся механизмов. Она позволяет проводить тесты, анализировать частотные характеристики (FRF), работать с профилями и параметрами, а также формировать отчёты.

## 3. Описание метода

Для получения передаточных характеристик в различных точках исследуемого объекта

На объект испытаний устанавливается датчик, в точке в которой отсутствуют резонансы. В дальнейшем сигнал с датчика используется в качестве опорного.

В качестве портативной системы измерения можно использовать MIC-224, MIC-200 или MIC-355. С помощью модального молотка выполняется серия ударов в каждой исследуемой точке с целью построения передаточной характеристики относительно опорного датчика. ПО позволяет отфильтровать «неудачные» удары, участвующие в расчете передаточной характеристики.

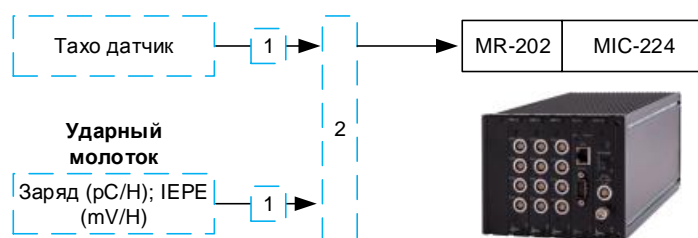


Рисунок 1 Структурная схема системы измерений

## 4. Описание ПО

Алгоритм измерения передаточной характеристики состоит из этапов:

- 1) Настройка компонента;
- 2) Выполнение серии ударов;
- 3) Отбраковка ударов и сохранение передаточной характеристики в БД;
- 4) Сравнение передаточной характеристики удара с БД;

## 5. Настройка

Окна обработки ударов и настройки показаны на Рисунок 2 и Рисунок 3. Назначение элементов окон представлены в таблице:

Таблица 1 Назначение элементов окна построения передаточных характеристик

№	Наименование	Назначение
1	График отображения удара	Синим цветом отображается осциллограмма импульса удара, зеленым – отклик. Оранжевым цветом отображается весовая функция (2).
2	Управление весовым окном	При включении опции «весовое окно», отображается функция весового окна (оранжевым цветом), длительность и крутизну которой можно регулировать интерактивно, перетаскивая маркеры старта и стопа. При этом интерактивно обновляется расчет спектральных характеристик (FRF/ Когерентность)
3	Выбор спектральных функций	Кнопка 1 удаляет выбранный удар из обработки (кнопка 6 убирает из обработки без удаления); Отображение спектра/ передаточной (в зависимости от элемента 5) характеристики. Толстой линией отображается усредненная по серии ударов передаточная характеристика. Желтым цветом отображается функция когерентности. Когерентность в измеряемом диапазоне ниже 0,7 обычно говорит о низкой корреляции воздействия и отклика и может служить основанием для отбраковки удара. Кнопка 3 вызывает построение отчета по лопатке; Кнопка 4 вызывает построение отчета по турбине; Элемент 7 – переключает отображаемый и обрабатываемый удар; Элемент 8 включает/ выключает оконную функция для фильтрации исходного сигнала;
4	Окно отображения частотных характеристик	На графике отображается выбранная частотная характеристика по указанным в п.8 каналам. По двойному клику в области окна производится возврат к преднастроенному масштабу. При перемещении курсора в окне 8 отображаются параметры сигналов - x, y значения частотной характеристики в точке на которую установлен курсор. Если курсор находится в области преднастроенного частотного тона (отображается серым цветом (5 на рисунке 2)), в 8.3 отображается результат вычисления коэффициента демпфирования ( $\varepsilon = \frac{f_1 - f_2}{2F}$ ), где f1 и f2 значение частоты с амплитудой на уровне 0,5 от уровня амплитуды экстремума, F – частота которой соответствует экстремум.
5	Частотная полоса	Серым цветом показана заданная в настройках частотная полоса, зеленым – флаг с характеристиками полосы (главная частота F, значения сигналов в точке F)
6	Триггерный порог	Отображается красной пунктирной линией. Может перемещаться с помощью мыши. Позволяет указать уровень который должен пересечь сигнал, чтобы зафиксировать экстремум.
7	Выбор лопатки	Выбор обрабатываемой лопатки с помощью SpinBtn; В окно Статус показывается состояние лопатки: Годен/ не годен/ не испытан; Демпфирование – частота, индекс точки и значение демпфирования в полосе;
8	Выбор активного сигнала	Выбрать сигнал можно кликом по сигналу, если необходимо отобразить сигналы по нескольким каналам, то необходимо установить галочки напротив каналов;

Таблица 2 Назначение элементов окна настройки

№	Наименование	Назначение
1	Список доступных сигналов	Список сигналов для обработки. При перемещении сигнала с помощью Drag&Drop в список обработок (3) изначально добавляется Тахо сигнал (воздействие). Сигналы отклика добавляются к Тахо сигналу в качестве дочерних элементов.
2	Фильтр по имени	При наборе строки в списке сигналов (1) остаются элементы в имени которых содержится подстрока.
3	Список обработок	Для добавления новых сигналов необходимо перетащить сигналы из списка доступных сигналов (1) с помощью D&Drop. Выбранные элементы можно удалять клавишей del.
4	Имя Тахо сигнала	При выборе элемента в дереве обработок (3) в элементе отображается имя корневого элемента.
5	Настройка детектора удара	1 Амплитуда сигнала. Уровень при превышении которого срабатывает детектор удара. Интервала обработки определяется правилом: максимальное значение амплитуды после срабатывания триггера принимается за T0, далее производится отступ влево от T0 на время «Отступ слева» (2) и от него производится отступ вправо равный длительности интервала (3) 4 – открыть диалог настройки базы данных испытания;
6	Кнопка «Обновить»	Переносит настройки из диалогов в выбранные элементы обработки
7	Настройки расчета спектра	7.1 Размер блока FFT – коли-во точек кратное степени 2; 7.2 Смещение блока при расчете. Используется при усреднении (включена опция Welch (7.6)). Например, если смещение в 2 раза меньше порции FFT, это значит что обработка ведется с 5-и процентным перекрытием и удастся посчитать больше порций FFT. Количество блоков с длиной «Размер блока» (7.1), с учетом «Смещения блока» (7.2) укладываемых в «Длительность» (5.3) удара; 7.3 Разрешение спектра – справочное поле определяется по формуле «Частота дискретизации»/«Размер блока»; 7.4 Размер блока автоматически высчитывается исходя из частоты дискретизации и размера блока; 7.5 Оценка – тип характеристики при расчете FRF 7.6 Усреднение при расчете FRF. Число блоков высчитывается автоматически по размеру блока, длительности удара, смещению порции. 7.7 Число ударов – количество импульсов которое участвует в усреднении передаточной характеристики; 7.8 Дополнять нулями;
8	Отображение результатов расчета	8.1 Логарифмические оси для отображения спектральных характеристик; 8.2 Масштаб осей. Переход к масштабу по умолчанию по dblClick. 8.3 Критерий отбраковки ударов; 8.4 Сохранять T0 для ударов. При нажатии кнопки сохранить замер тега файл может содержать астрономическое время. Если опция отключена время не сохраняется, для удобства сравнения ударных импульсов в WinПОС.

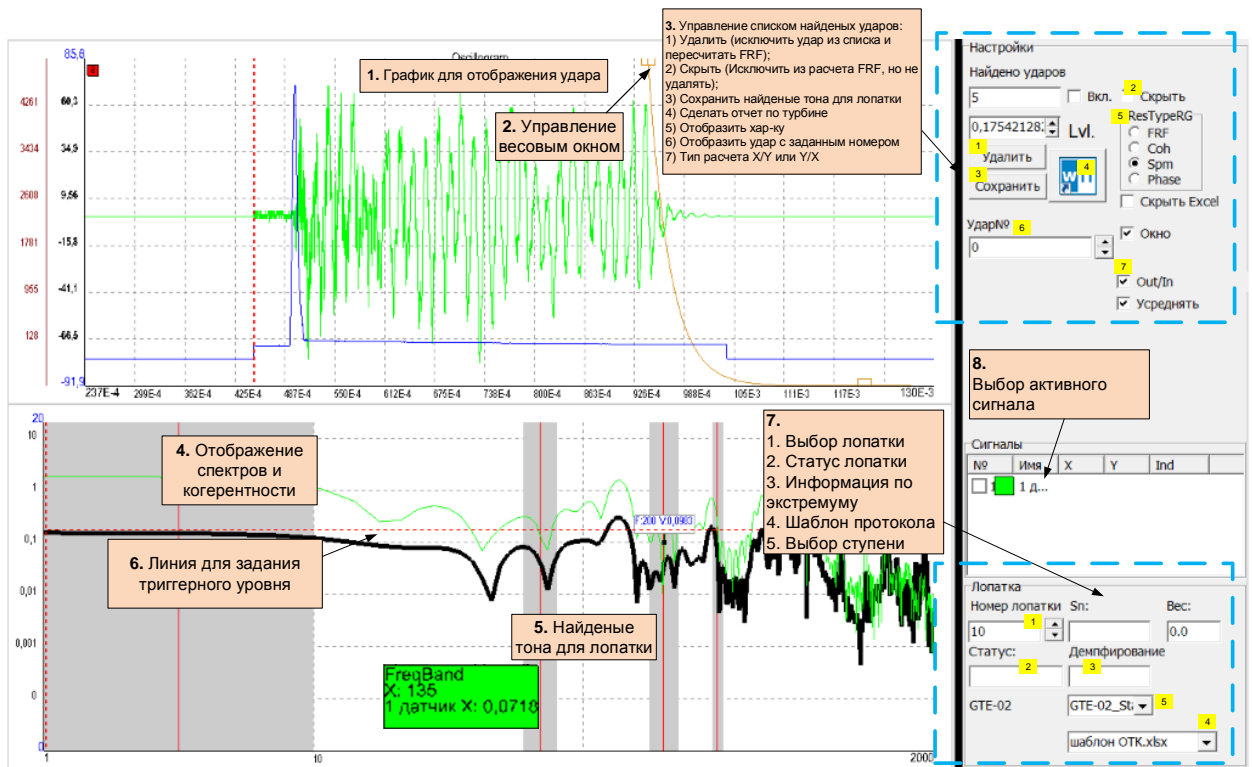


Рисунок 2 Вид компонента для измерения передаточной характеристики

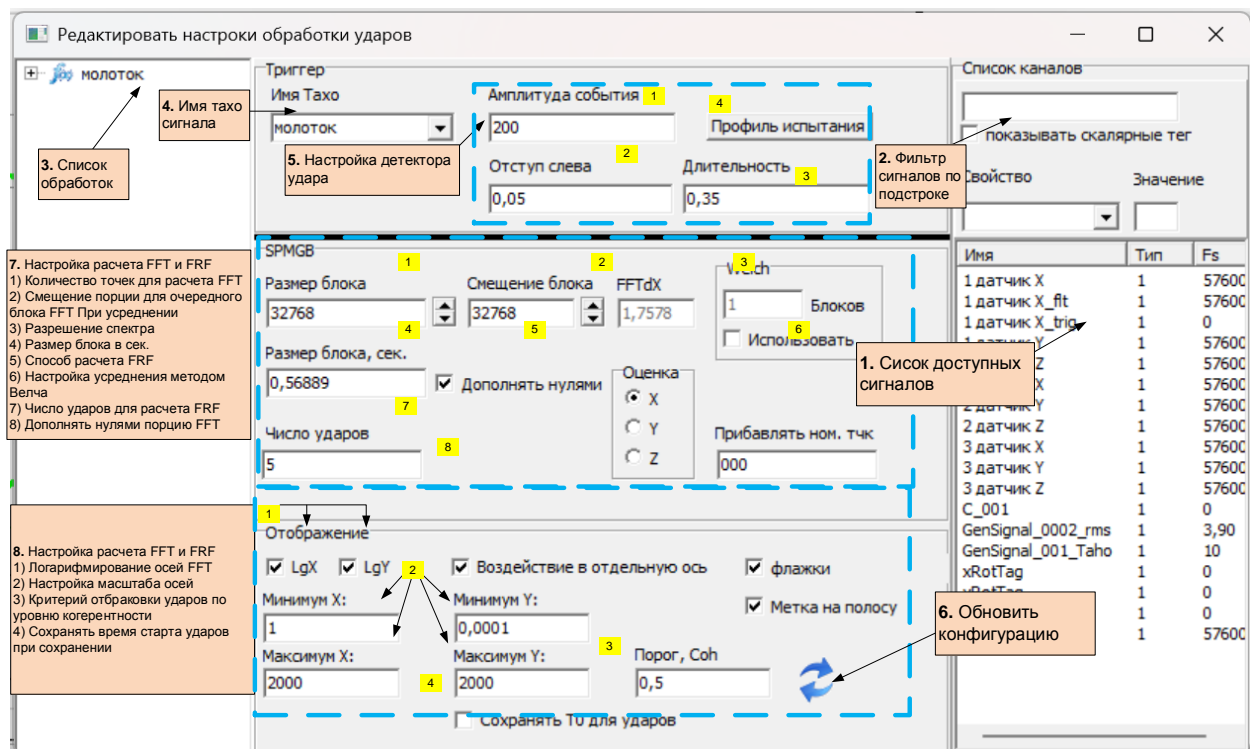


Рисунок 3 Диалог настройки компонента анализа ударов

## 6. База данных испытаний

База данных испытаний реализована в виде структуры каталогов, расположена по пути C:\Mera files\BladeMdb\

Каждому объекту базы данных сопоставляется каталог с именем, совпадающим с именем объекта и файл описатель в формате xml.

В корневом каталоге хранится описатель базы данных bladeMdb.xml. Файл содержит настройки типов турбин, ступеней и соответствующих лопаток;

В каталогах турбин, ступеней и лопаток содержатся свойства и результаты испытаний конкретных образцов испытаний и отчеты в формате .xlsx.

При построении отчета по турбине используется шаблон расположенный в каталоге C:\Mera files\BladeMdb\Templates\.

Пример

шаблона

показан

на

### Шаблон конструктора

Отчет по результатам вибрационных испытаний												
дата		02.04.2025 18-18										
исполнитель		ведущий инспектор Беляева Е.П.										
подразделение		ДК\УТК\ОТК производства турбинных лопаток										
проект/СПП/наряд		G-220625-01										
чертеж лопатки		c_Sketch										
число лопаток		3 c_BlCount										
искомых тонов (всего)		2 c_ToneCount										
контролируемых тонов		5										
№ контролируемого тон					1	2	3	c_Tone				
минимальный допуск, Fmin, Гц					85	175						
максимальный допуск, Fmax, Гц					105	215						
зажим		123456										
усилие затяжки, бар		120										
примечание		лопатки НИОКР для ЦКТИ										
тип изделия		ГТУ										
изделие		ГТЭ-170.1 c_Type										
узел изделия		турбина										
ступень		1 c_Stage										
деталь узла		рабочая лопатка										
доп.поле		доп.										
c_Start		c_decr										
№	инд. номер лопатки	T <sub>1</sub> , Гц допуск			T <sub>2</sub> , Гц допуск			T <sub>д1</sub> справочн., Гц	T <sub>д2</sub> справочн., Гц	T <sub>д3</sub> справочн., Гц	декремент затухания для T <sub>1</sub>	годность
		85	-	105	175	-	215					
1	45623	95			199			145	256	341	0.019	Да
2	45628	84			180			141	245	339	0.018	Нет
3	45627	101			197			147	268	344	0.021	Да

Рисунок 4 и Рисунок 5. В зависимости от выбранного шаблона используется разная логика при построении отчета: отчет конструктора или отчет ОТК. Решение о типе протокола программа осуществляет по подстроке в имени файла «ОТК».

При построении отчета выполняется поиск областей, в которых должна располагаться информация (настройки объектов, тонов, результаты обработки лопаток);

В шаблоне ОТК присутствует область c\_bladeCount, изменение определяет количество лопаток отображаемое в строку. Если область отсутствует, то будет 1.

# Шаблон конструктора

Отчет по результатам вибрационных испытаний												
дата	02.04.2025 18-18											
исполнитель	ведущий инспектор Белыева Е.П.											
подразделение	ДК\УТК\ОТК производства турбинных лопаток											
проект/СПП/наряд	G-220625-01											
чертеж лопатки												
число лопаток	3											
искомых тонов (всего)	2											
контролируемых тонов	5											
№ контролируемого тон	1	2	3									
минимальный допуск, Fmin, Гц	85	175										
максимальный допуск, Fmax, Гц	105	215										
зажим	123456											
усилие затяжки, бар	120											
примечание	лопатки НИОКР для ЦКТИ											
тип изделия	ГТУ											
изделие	ГТЭ-170.1											
узел изделия	турбина											
ступень	1											
деталь узла	рабочая лопатка											
доп.поле	доп.											
c_Start	c_decr											
№	инд. номер лопатки	T <sub>1</sub> , Гц допуск			T <sub>2</sub> , Гц допуск			T <sub>д1</sub> справочн., Гц	T <sub>д2</sub> справочн., Гц	T <sub>д3</sub> справочн., Гц	декремент затухания для T <sub>1</sub>	годность
		85	-	105	175	-	215					
1	45623	95			199			145	256	341	0.019	Да
2	45628	84			180			141	245	339	0.018	Нет
3	45627	101			197			147	268	344	0.021	Да

Рисунок 4 Шаблон протокола по турбине;

# Шаблон ОТК

Протокол вибрационных испытаний отдельных лопаток											
Лопатка в строку		1		c_bladeCount		Испытания произведены		28.01. апрел 2025г		c_date	
Лопатка №		Частота в Гц		стат. момент г*см		Поряд. № лопат. На диске		4		ступени турбины типа	
		1 2 3						ГТЭ-170.1		зак.№	
10		-		-		-		-		c_type	
2		-		-		200		-			
1		-		-		-		-			
4		-		-		-		-			
5		-		-		-		-			
6		-		-		-		-			
7		-		-		-		-			
8		-		-		-		-			
9		-		-		-		-			
10		-		-		-		-			
11		-		-		-		-			
c_tones		c_tones_fact									
Вибрационные характеристики											
пределы		разбр		забраков		фактичес		допа			
1		-		10		7л		-1		-	
60		-		80				-1		-	
175		225						200,391		200	
300		330						-1		-1	
Заклучение											
c_tones_name											
Испытания проводили: Иванов И.И.											

Рисунок 5 Шаблон протокола ОТК

1. Настройка объекта испытаний

Тип турбины: ГТЭ-170.2 Имя: GTE-02

Ступень: 1 Кол-во: 2

Чертеж лопатки: 62.403-0010.001 Кол-во лопаток: 13

Номер лопатки: 0

☒ Правая лопатка

Лопатки

☐ Выбрать все

№	sn	Тип
0		Правая
1	1	Левая
2	2	Правая
3	3	Левая
4	4	Правая
5	5	Левая
6	6	Левая
7	7	Левая
8	8	Левая
9	9	Левая

2. Настройка испытания

Параметры испытания

Допуск, %: 5 Кол-во полос: 3

Исполнитель: Иванов И.И.

Дата: 30.01.2026

Параметры испытания

Применить


3. Настройка тонов

Тон №	F1	F2	Допуск. %
1	10	5	
60	80	5	
175	225	5	

Рисунок 6 Настройка база данных испытаний

## 7. Алгоритм работы:

Произвести настройку компонента:

- 1) Добавить компонент обработки ударов; 
- 2) Нажать правой кнопкой на компоненте и зайти в настройку.
- 3) Добавить в список обработок канал к которому подключен ударный молоток в корневой узел (3.1);
- 4) Настроить амплитуду детектирования, длительность удара, отступ слева (Рисунок 7);

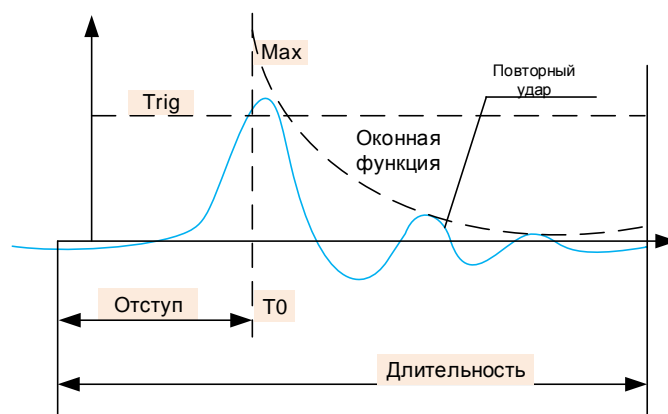


Рисунок 7 Длительность удара

- 5) Настроить амплитуду детектирования, длительность удара, отступ слева (Рисунок 7);
- 6) Настроить параметры вычисления спектра: размер блока, смещение блока, число ударов;

Произвести серию ударов. При обнаружении удара обновляется счетчик «Удар №», отображается осциллограмма и спектр удара. При ударе молотком часто возникает повторный удар (отскок молотка от испытываемого объекта). Паразитный удар и отклик можно зафильтровать с помощью оконной функции (перетащить мышкой элементы в окне с временной реализацией). При этом для удара используется прямоугольное окно, а для отклика экспоненциальное.

При поиске экстремумов применяется алгоритм:

- 1) Производится вычисление экстремумов по активному сигналу. Активный сигнал задается в окне 8;
- 2) При поиске экстремума производится сравнение сигнала FRF с уровнем, заданным с помощью Триггера (элемент 6 на рис.2); Если произошло превышение уровня включается поиск максимума в полосе  $f1..f2$ , где  $f1$  и  $f2$  точки пересечения FRF и триггера;
- 3) Список найденных экстремумов сравнивается с экстремумами в частотных полосах заданных в БДИ для выбранного типа лопатки; При сравнении экстремумы сопоставляются по номеру, т.е. первый найденный экстремум по частоте должен попасть в первую частотную полосу. Если частота хотя бы одного экстремума не совпала с настроенными тонами, лопатка бракуется;
- 4) Для найденных тонов вычисляется демпфирование;

Расчет демпфирования осуществляется по формуле:  $\varepsilon = \frac{f1-f2}{2F}$ , где  $f1$  и  $f2$  значение частоты с амплитудой на уровне 0,5 от уровня амплитуды экстремума,  $F$  – частота которой соответствует экстремум.

Расчет когерентности по серии ударов:  $\gamma_{xy} = \frac{|S_{xy}|}{S_{xx} \cdot S_{yy}}$ ,

$S_{xy}$  – кроссспектр,  $S_{xx}$  и  $S_{yy}$  – автоспектр от исходных сигналов. Значение спектра для каждого сигнала это вектора вида  $(R; i \cdot Im)$ .  $S_{xx}$  и  $S_{yy}$  могут быть найдены как модули соответствующих векторов  $S_{xx} = Re^2 + Im^2$

После расчета  $S_{xx}$  и  $S_{yy}$  в моменты  $t1$  и  $t2$  требуется произвести усреднение  $S_{xx}$  и  $S_{yy}$   $S_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(t_i)$

Для расчета числителя формулы когерентности  $S_{xy}$  необходимо посчитать комплексное произведение  $s1$  и  $s2$  в моменты времени  $t1$  и  $t2$ .

$S_{xy} = S_x \cdot (S_y)' = (R_x R_y + i I_x I_y)$ , где  $(S_y)$  комплексно сопряженный вектор с  $S_y$

После расчета  $S_{xy}$  в моменты времени  $t1$  и  $t2$ ,  $S_{xy}$  усредняется в векторной форме, после чего вычисляется модуль  $mod S_{xy}$ .

Таким образом если фаза между сигналами сохраняется когеренция стремится к 1, т.к. в знаменателе усреднение сигналов  $S_{xx}$  и  $S_{yy}$  идет без учета фазы.