

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.

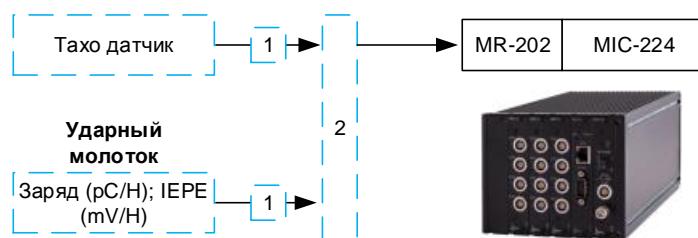


Рисунок 1 Структурная схема системы измерений

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) укладывающихся 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 тела файл может содержать астрономическое время. Если опция отключена время не сохраняется, для удобства сравнения ударных импульсов в WinPOS.

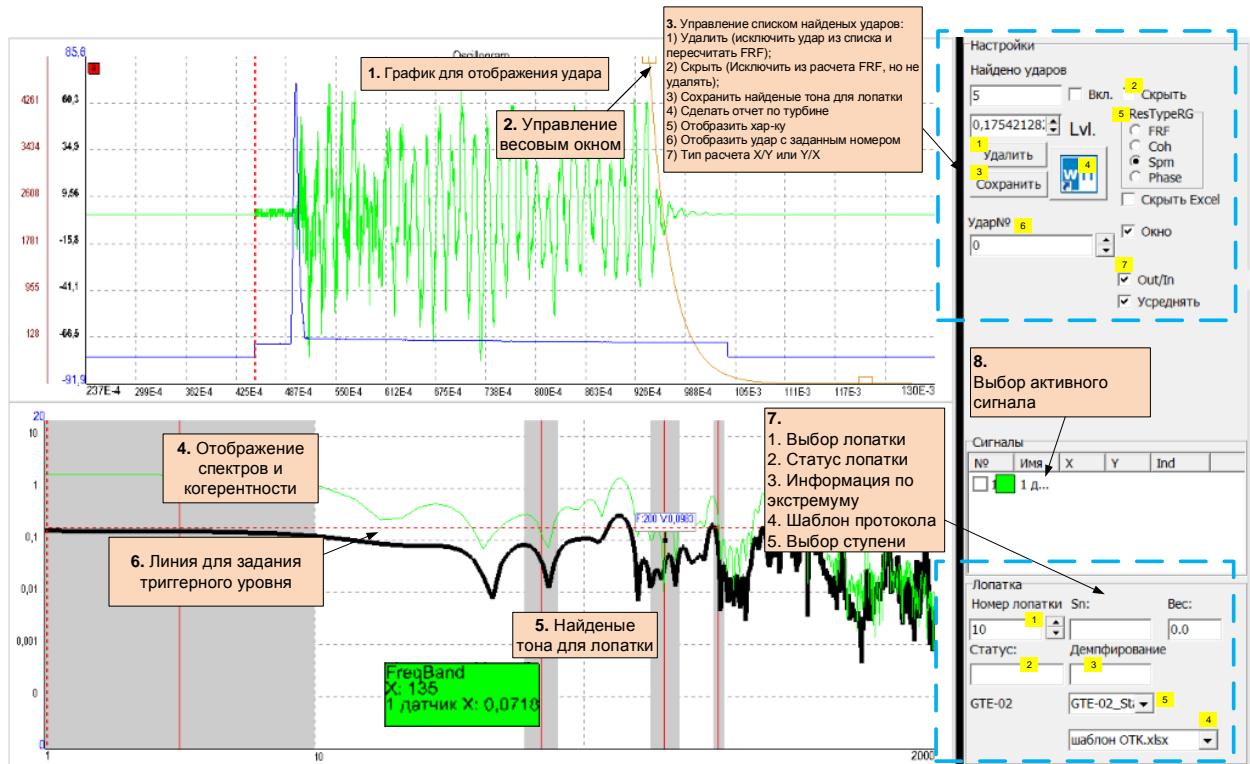


Рисунок 2 Вид компонента для измерения передаточной характеристики

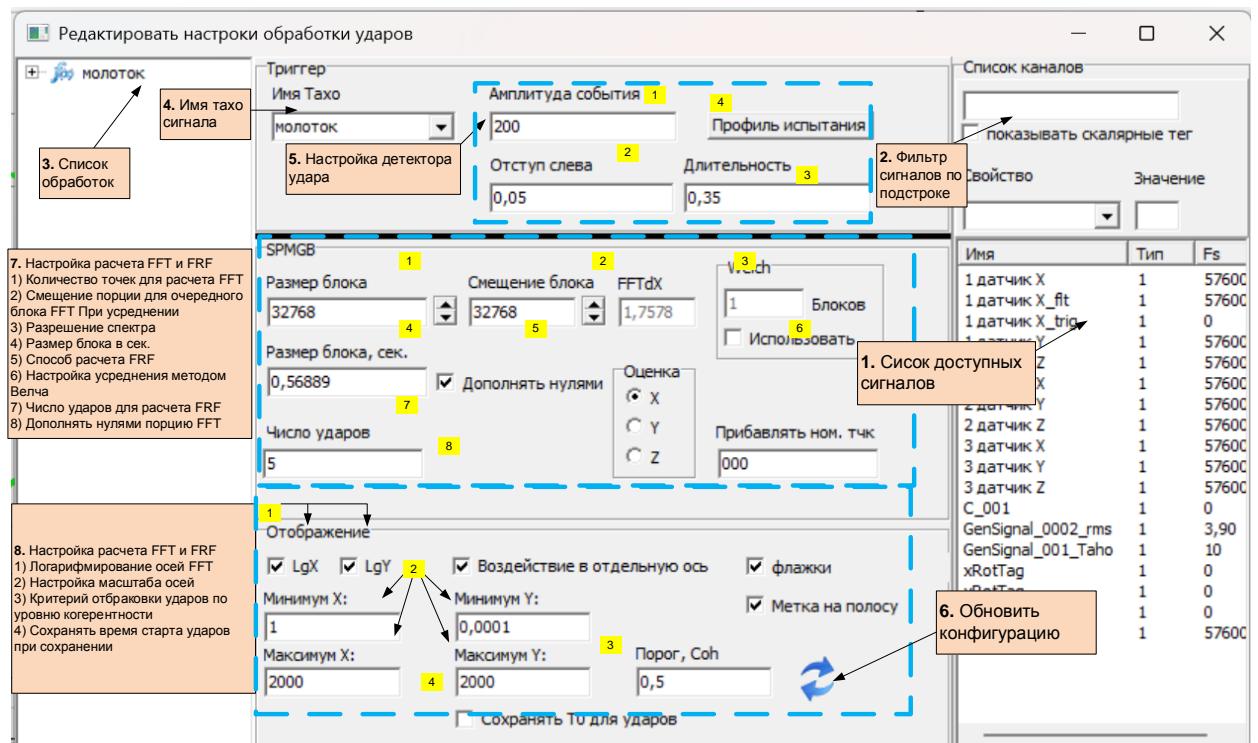


Рисунок 3 Диалог настройки компонента анализа ударов

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	ДКУТК\ОТК производства турбинных лопаток									
проект/СПП/наряд	G-220625-01									
чертеж лопатки										
число лопаток	3									
искомых тонов (всего)	2									
контролируемых тонов	5									
№ контролируемого тона	1	2	3							
минимальный допуск, Fmin, Гц	85	175			c_Tone					
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										
№	инд. номер лопатки	T ₁ , Гц допуск		T ₂ , Гц допуск		T _{d1} справочн., Гц	T _{d2} справочн., Гц	T _{d3} справочн., Гц	декремент затухания для T ₁	годность
		85	-	105	175					
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 Беляева 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 тона	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													
№	инд. номер лопатки	T ₁ , Гц			T ₂ , Гц			T _{d1} справочн., Гц	T _{d2} справочн., Гц	T _{d3} справочн., Гц	декремент затухания для T ₁	годность	
		допуск	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			4	ступени турбины типа	ГТЭ-170.1	зак.№		
Лопатка в строку			1	c_bladeCount	c_date	c_type		
Лопатка №	Частота в Гц	стат. момент g*см	поряд. № лопат.	На диске				
10	1 - - -			1				
2	- - - 200	-		2				
1	- - - -			1				
4	- - - -			4				
5	c_start	- -		5				
6	- - - -			6				
7	- - - -			7				
8	- - - -			8				
9	- - - -			9				
10	- - - -			10				
11	- - - -			1				
c_tones			c_tones_fact					
Вибрационные характеристики								
пределы	разбр	забраков	актичес		логи			
1	-	10	-1	-	-1			
60	-	80	-1	-	-1			
175	225		200,391		200			
300	330		-1	-1				
Заключение								
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

2. Настройка испытания

Допуск, %:	5	Кол-во полос:	3
Исполнитель:	Иванов И.И.		
Дата:	30.01.2026		

Лопатки

№	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

3. Настройка тонов

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

Параметры испытания

Применить

Рисунок 6 Настройка базы 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);

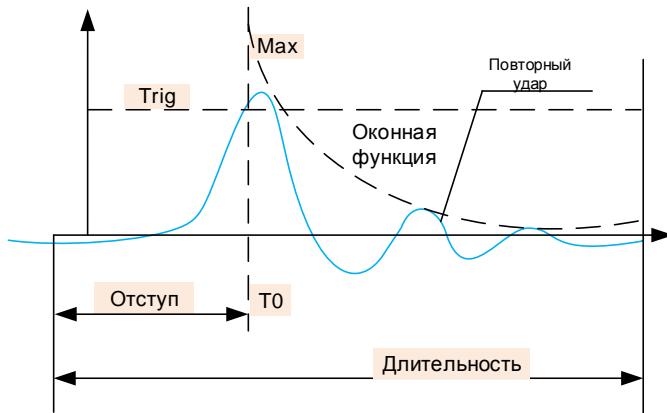


Рисунок 7 Длительность удара

- 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 $f_1..f_2$, где f_1 и f_2 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 совпадает с настроенными тонами, лопатка бракуется;
- 4) Для найденных тонов вычисляется демпфирование;

Расчет демпфирования осуществляется по формуле: $\varepsilon = \frac{f_1 - f_2}{2F}$, где f_1 и f_2 значение частоты с амплитудой на уровне 0,5 от уровня амплитуды экстремума, F – частота которой соответствует экстремуму.

$$\text{Расчет когерентности по серии ударов: } \gamma_{xy} = \frac{|S_{xy}|^2}{S_{xx} * S_{yy}},$$

S_{xy} – кросспектр, S_{xx} и S_{yy} – автоспектр от исходных сигналов. Значение спектра для каждого сигнала это вектора вида $(R; i*Im)$. 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 t_1 и t_2 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 s_1 и s_2 в моменты времени t_1 и t_2 .

$C_{xy} = S_x * (S_y') = (R_x R_y + i I_x I_y; I_x R_y - I_y R_x)$, где (S_y') комплексно сопряженный вектор с S_y

После расчета C_{xy} в моменты времени t_1 и t_2 , C_{xy} усредняется в векторной форме, после чего вычисляется модуль $modC_{xy}$.

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.