

СРАВНЕНИЕ ИМИТАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ



ПАНИН Владимир Иванович

Канд. техн. наук, директор независимых органов по аттестации персонала и лабораторий НК ООО «Аскотехэнерго-диагностика», Хабаровск

Имитатором акустической эмиссии (АЭ), согласно ГОСТ Р ИСО 12716–2021 [1], является устройство искусственного возбуждения в объекте контроля (ОК) акустических волн, моделирующих акустическую эмиссию. Наиболее характерным источником импульсной АЭ являются скачки трещины, развивающейся от поверхности ОК. Рассмотрим наиболее часто практически используемые в России имитаторы импульсов АЭ. К ним относятся «Имитатор АЭ «ИНТЕРЮНИС-ИТ» и «Имитатор Су–Нильсена». Включим в это рассмотрение также имитаторы АЭ-1 и АЭ-N, разработанные автором статьи.

Имитатор АЭ «ИНТЕРЮНИС-ИТ»

Имитатор АЭ «ИНТЕРЮНИС-ИТ», выпускаемый фирмой ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» (Москва), выполнен в виде портативного переносного генератора электрических видеопульсов с внутренним электропитанием от батарейки «Крона» напряжением 9 В. Амплитуда электрических импульсов отрицательной полярности на его выходе регулируется в пределах от 10 до 300 В, а число импульсов в секунду в пределах от 1 до 10 шт. Для возбуждения акустического сигнала к этому генератору обычно подключают один из приемных пьезоэлектрических преобразователей (ПАЭ) многоканаль-

ной аппаратуры АЭ, который используют в режиме излучения. Форма электрического импульса на разъеме пьезоизлучателя зависит от типа подключаемого ПАЭ. Так, например, при подключении ПАЭ типа GT-200 электрический импульс возбуждения имеет крутой передний фронт длительностью ~5 мкс и плавно спадающий задний фронт длительностью > 1000 мкс. Аппроксимация такого импульса функцией Хевисайда («ступенька положения») позволяет считать, что его частотный спектр определяется функцией $1/f$ (где f – частота). Поэтому основная энергия электрического возбуждающего импульса сосредоточена на частотах ниже 20 кГц, хотя верхняя граница спектра теоретически не ограничена. Из этого спектра излучающий ПАЭ резонансного типа формирует акустический сигнал радиоимпульсной формы с неизвестной амплитудой и параметрами фронтов. При традиционном использовании жидкой или гелиевой контактной смазки между ПАЭ и ОК в ОК излучается преимущественно продольная волна в нормальном направлении к поверхности ввода. Исходя из перечисленного данный имитатор может моделировать лишь три параметра АЭ: местоположение источника АЭ, число событий АЭ в секунду (от 1 до 10) и относительное изменение амплитуды волны от источника АЭ в пределах 28 дБ. Но вследствие хорошей воспроизводимости жидкого акустического контакта (± 1 дБ) он дополнительно может быть использован для проверки идентичности чувствительности каналов АЭ многоканальных приборов, а также для оценки затухания и скорости звука в ОК на рабочей частоте ПАЭ.

Имитатор АЭ Су–Нильсена

Имитатор АЭ Су–Нильсена [2–4] генерирует акустический сигнал путем излома опирающегося на поверхность ОК грифеля цангового карандаша. Этот имитатор, с точки зрения автора статьи, является более близкой физической моделью реального импульсного источника АЭ, чем имитатор АЭ «ИНТЕРЮНИС-ИТ», но воспроизводит моделирование с худшей повторяемостью. Рассмотрим подробности этого предположения.

Лучшая степень физического моделирования в первую очередь обусловлена сходством физических процессов при скачке растущей трещины и изломе грифеля карандаша. Точечное импульсное воздействие конца грифеля в точке касания с ОК приводит к генерации в ОК продольной, сдвиговой и поверхностной волн. Этот процесс аналогичен генерации подобных волн от скачка развивающейся поверхностной трещины малого размера. В обоих случаях временная форма излучения имеет видеопульсный (а не радиопульсный) вид. Но в литературных источниках имеются различные предположения о форме генерируемого видеопульса и процессе его возникновения. Так, в работе [4] предполагается, что акустический сигнал возникает от места излома грифеля и что он соответствует акустическому сигналу от скачка трещины. В свою очередь в справочнике [5] считается, что акустический сигнал в ОК возникает в момент разгрузки поверхности ОК от давления конца грифеля, действующего перед его изломом; и параметры этого сигнала близки к параметрам скачка трещины размером, соответствующим диаметру стержня грифеля. Какие-либо экспериментальные факты по измерению фактического вида акустических сигналов от имитатора Су–Нильсена в точке ввода в литературе отсутствуют, за исключением работы [6]. Однако в работе [6] не описаны параметры пьезоприемника, который регистрировал акустические импульсы от имитатора Су–Нильсена через металлическую мембрану толщиной 0,5 мм, вследствие чего корректность измерений не определена.

Чтобы определить параметры акустического импульса от источника Су–Нильсена в точке ввода в ОК автор данной статьи провел прямой эксперимент по их измерению. В качестве широкополосного измерительного приемника звука использовался «тонкий» пьезоэлемент из керамики ЦТС–19 с серебряными электродами. Толщина пьезоэлемента была равна 0,37 мм (частота резонанса по толщине ~5 МГц), диаметр 3 мм (частота радиального резонанса ~740 кГц). Пьезоэлемент со стороны одного электрода был припаян к стальному блоку, а на второй электрод была напаяна медная фольга толщиной 20 мкм для защиты пьезоэлемента от механических повреждений торцом грифеля. Такой пьезоприемник имеет почти равномерную амплитудно-частотную характеристику в полосе частот до 1 МГц, если пренебречь радиальными колебаниями, а входной акустический импеданс практически равен акустическому импедансу стали в этом же диапазоне частот. Электрические провода, припаянные к стальному блоку (потенциальный) и медной фольге (корпусной), подключались к цифровому осциллографу АДС–2061М фирмы «АКТАКОМ». При изломе грифеля, опирающегося на медную фольгу, осцилло-



Рис. 1. Осциллограмма акустического импульса имитатора Су–Нильсена. Масштаб по вертикали 100 мВ/дел, масштаб по горизонтали 5 мкс/дел

граф регистрировал электрический сигнал, вырабатываемый пьезоэлементом. Фотография данного сигнала с экрана осциллографа приведена на рис. 1. Параметры источника Су–Нильсена, генерирующего данный сигнал, были следующие: диаметр грифеля 0,5 мм, длина отламываемого куска грифеля 2,5 мм, угол между осью грифеля и плоскостью пьезоэлемента 30°. Сигнал, изображенный на рис. 1, имеет форму сложного видеопульса, состоящего из двух частей. Сначала наблюдается короткий отрицательный видеопульс треугольной формы, который затем переходит в ступенчатый видеопульс положительной полярности. Отрицательный видеопульс соответствует акустическому импульсу сжатия, пришедшему к концу грифеля от места его излома со скоростью продольной волны в стержне грифеля. Второй ступенчатый положительный импульс расширения формируется за счет силы отталкивания отламываемого куска грифеля от точки ввода. Таким образом, оба механизма возникновения акустического сигнала в имитаторе Су–Нильсена, каждый из которых по отдельности предполагался в работах [4] и [5], присутствуют совместно. Небольшие колебания частотой ~300 кГц, присутствующие на переднем фронте ступенчатого видеопульса, соответствуют переотражениям импульса продольной волны в отламываемом куске грифеля; а наложенные на них колебания частотой ~740 кГц соответствуют радиальным колебаниям пьезоэлемента*. Спектры отдельных составных частей акустического видеопульса Су–Нильсена и спектр

* Проведение более подробного и тонкого анализа процессов возникновения акустических волн, генерируемых имитатором Су–Нильсена, не является задачей данной статьи.

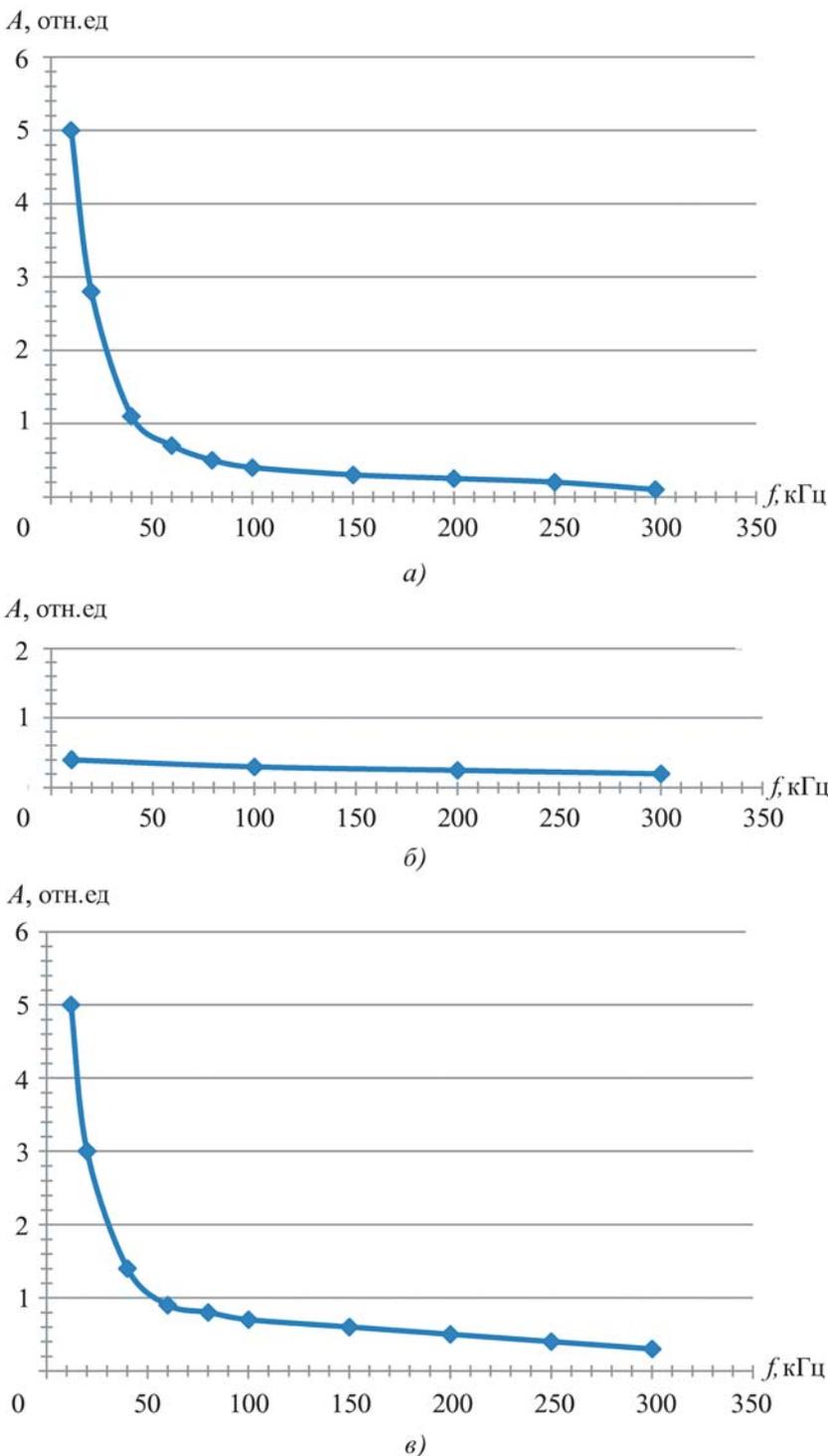


Рис. 2. Спектры акустического сигнала имитатора Су–Нильсена: а – ступенчатого положительного импульса, генерируемого отталиванием отломанного конца грифеля от точки ввода; б – отрицательного импульса треугольной формы, генерируемого от места излома грифеля; в – суммарный (общий) спектр обеих частей генерируемого импульса. По оси ординат в линейном масштабе отложены относительные значения амплитуд A нормального смещения частиц поверхности стального твердого тела на разных частотах (в точке касания конца грифеля имитатора Су–Нильсена). По оси абсцисс в линейном масштабе, обозначены значения частот f в пределах рассматриваемого частотного диапазона спектра

полного импульса, рассчитанные по технологии быстрого преобразования Фурье в диапазоне частот до 300 кГц, приведены на рис. 2.

Для оценки амплитуды импульса в узаконенных физических единицах автором была проведена абсолютная калибровка описанного пьезоприемника акустических сигналов (тонкого пьезоэлемента на стальной основе). Калибровка была выполнена с помощью образцовой стержневой меры МСУС-3 [7], параметры которой были привязаны к Государственному первичному эталону амплитуды ультразвукового смещения [8, 9]. В результате калибровки тонкого пьезоэлемента на стальной основе была определена его чувствительность K на срединной частоте в 417 кГц, которая оказалась равной 0,03 В/нм. Соответственно амплитуда смещения на конце грифеля источника Су–Нильсена в точке ввода, рассчитанная по амплитуде электрического импульса на рис. 1, и при $K=0,03$ В/нм составила 7 нм для отрицательной части импульса треугольной формы и 10 нм для положительной части импульса в виде ступеньки. Соотношение амплитуд для положительной и отрицательной частей акустического импульса Су–Нильсена может изменяться. Так, при увеличении длины отламываемой части грифеля амплитуда положительной части импульса будет уменьшаться при примерном сохранении амплитуды отрицательной части.

Подводя итог анализа данных, полученных при проведенном автором эксперименте, можно констатировать, что моделирование формы импульса скачка трещины источником Су–Нильсена осуществляется некорректно. Это обусловлено наличием двух источников возникновения акустического сигнала – из места излома грифеля и из места оттали-

вания конца грифеля от точки ввода. Причем при длине отламываемого куска грифеля, равном 2,5 мм, основной вклад в энергию спектра, преимущественно сосредоточенного в низкочастотной области, вносит отталкивание конца грифеля (см. рис. 2).

Исследуем повторяемость сигнала имитатора Су–Нильсена при изломе одного и того же грифеля и его погрешность относительно амплитуды ультразвукового смещения при замене грифеля. Пятнадцатикратное повторение излома одного и того же грифеля, проведенное автором, привело к разбросу импульса отрицательной полярности в 5 дБ, а импульса положительной полярности – в 4,5 дБ. Длительность

импульса отрицательной полярности изменялась до 2 раз, а длительность фронта ступеньки – в 1,7 раза. Эти результаты получены при использовании приспособлений для фиксации угла наклона грифеля и длины отламываемого куска грифеля. Без таких приспособлений вариация амплитуды отрицательного импульса доходит до 10 дБ. Предположительно столь значительные величины разброса параметров импульса были обусловлены изменением формы наконечника грифеля после очередного излома, а также направления силы давления руки оператора на карандаш (поперек оси грифеля, поперек поверхности пьезоэлемента или под другим углом). В исследованной литературе автор не нашел упоминаний об этих факторах влияния и рекомендаций по их нормированию.

Рассмотрим возможные причины погрешностей для амплитуды УЗ-смещения имитатора Су–Нильсена (дополнительных к случайной погрешности воспроизведения при изломе одного и того же грифеля). Согласно ГОСТ 19445.1–95 [10], допуск на

диаметр грифеля составляет 10%; следовательно, сила, необходимая для его излома, пропорциональная 3-й степени диаметра, может изменяться на 33%; отклонение от указанной твердости грифеля допускается на одну градацию (в частности, 1Т вместо 2Т). Такой допуск, в соответствии с анализом данных, указанных в РСТ РСФСР 195–82 [11], приводит к изменению силы излома на 16%. На практике эта величина может быть большей, если выполнять излом грифелей разных производителей. Это было проверено автором при замене российских грифелей на идентичные китайские.

Подводя итог рассмотрению имитаторов Су–Нильсена, можно отметить, что ненормированная, изменяемая в значительных пределах величина амплитуды генерируемого импульса не позволяет их использовать в метрологических целях и зачастую даже при настройке приборов АЭ на контроль. Так, например, описанная в ПБ 03–593–03 [12] технология установки преобразователей акустической эмиссии с выбором расстояния между ними (опирающаяся неявным образом на постоянство амплитуды имитатора Су–Нильсена) должна быть, по мнению автора, откорректирована.

Имитаторы АЭ-1 и АЭ-N

Для улучшения моделирования импульсных сигналов АЭ с высокой воспроизводимостью амплитудных и временных параметров автором были разработаны имитаторы АЭ-1 (в нескольких модификациях) и АЭ-N, оба с сухим точечным контактом. Эти имитаторы метрологически обеспечены путем привязки их показаний к Государственному первичному эталону единиц амплитуды ультразвукового смещения [8].

Фотографии одной из модификаций имитатора АЭ-1, на-

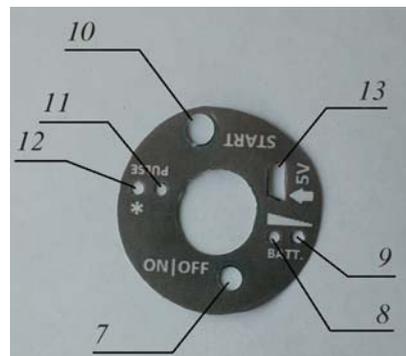
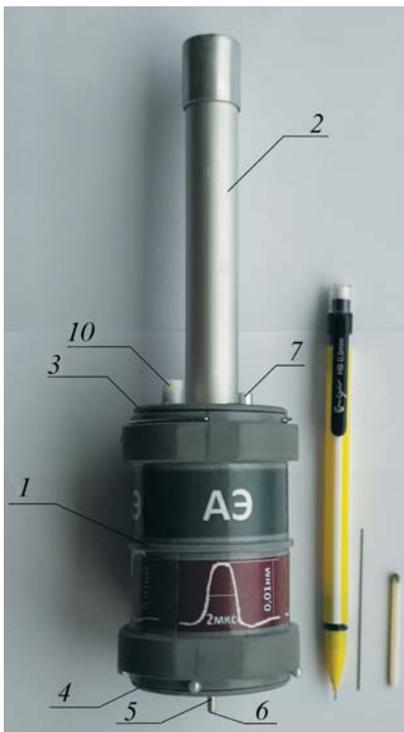


Рис. 3. Внешний вид имитатора АЭ-1:

1 – пластиковый корпус; 2 – дополнительная часть корпуса (дюралюминий, диаметр 19 мм, высота 170 мм); 3 – верхняя крышка корпуса (пластик); 4 – нижняя крышка корпуса (пластик); 5 – подвижный металлический стержень-волновод диаметром 3 мм; 6 – закругленный контактный конец стержень-волновода; 7 – кнопка с фиксацией для подключения электронной схемы к аккумулятору; 8, 9 – светодиодные индикаторы (белый и зеленый) контроля степени заряженности аккумулятора; 10 – кнопка для генерации одиночного импульса; 11 – красный светодиод, индицирующий готовность к генерации акустического импульса; 12 – зеленый светодиод, сопровождающий излучение акустического импульса вспышкой света; 13 – гнездо miniUSB для подключения зарядного устройства

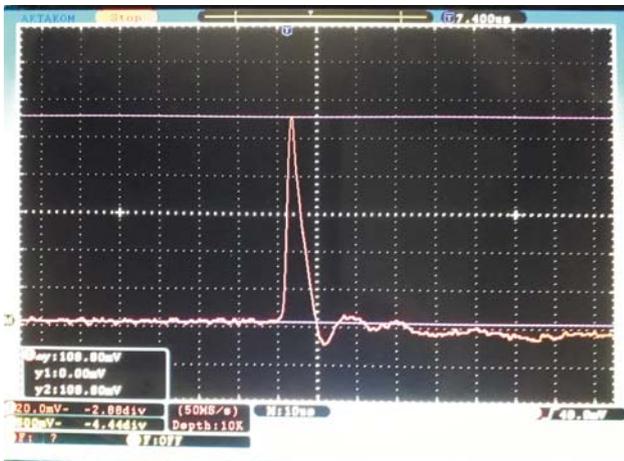


Рис. 4. Осциллограмма акустического импульса имитатора АЭ-1 (масштаб по вертикали 20 мВ/дел, масштаб по горизонтали 10 мкс/дел)

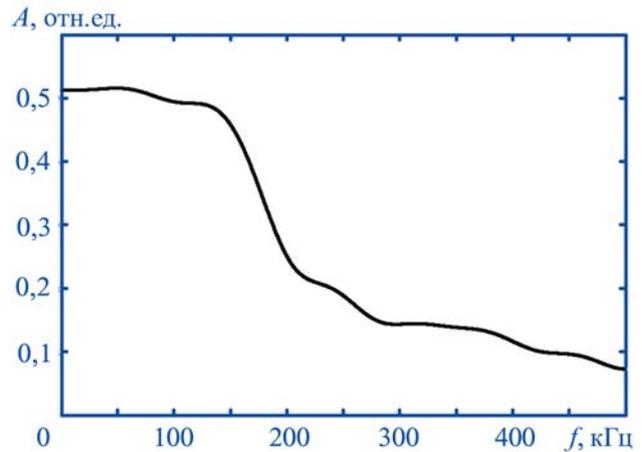


Рис. 5. Спектр акустического импульса имитатора АЭ-1. По оси ординат в линейном масштабе отложены относительные амплитуды A нормального смещения частиц поверхности стального твердого тела на разных частотах (в точке касания закругленного контактного конца стержня-волновода имитатора АЭ-1). По оси абсцисс в линейном масштабе обозначены значения частот f в пределах рассматриваемого частотного диапазона спектра

значением которого является генерация одиночных акустических видеоимпульсов, и его верхней крышки приведены на рис. 3. Внутри пластикового корпуса 1

расположены: источник электропитания напряжением 3,7 В (аккумулятор сотового телефона), генератор одиночного видеоимпульса (одновибратор на мик-

росхеме), усилитель мощности (на транзисторах) и электроакустический преобразователь, который во взаимодействии с усилителем мощности формирует в металлическом стержне-волноводе диаметром 3 мм акустический видеоимпульс треугольной формы. Этот акустический видеоимпульс в виде нулевой симметричной моды бегущей стержневой волны (продольная стержневая волна на низких частотах), распространяясь по стержню 5, поступает на его закругленный конец 6, центр которого является акустическим выходом АЭ-1. Имитатор АЭ-1 устанавливается крышкой 4 на объект контроля из стали, прижимаясь к нему встроенными внутри корпуса 1 постоянными магнитами. При этом подвижный стержень 5 вдвигается внутрь корпуса 1 и прижимается своим концом 6 к объекту контроля с нормированным усилием, с помощью встроенной в корпус 1 пружины. При нажатии фиксирующейся кнопки 7 электронная схема подключается к аккумулятору, а при повторном нажатии отключается. Свето-

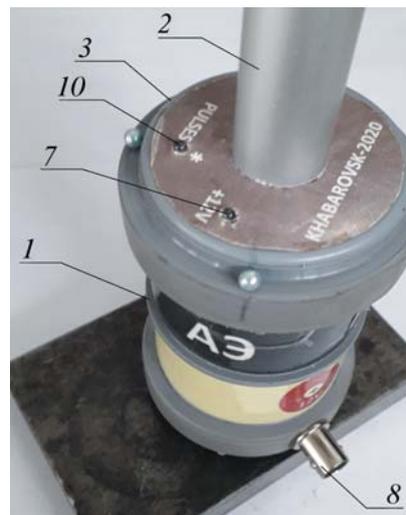
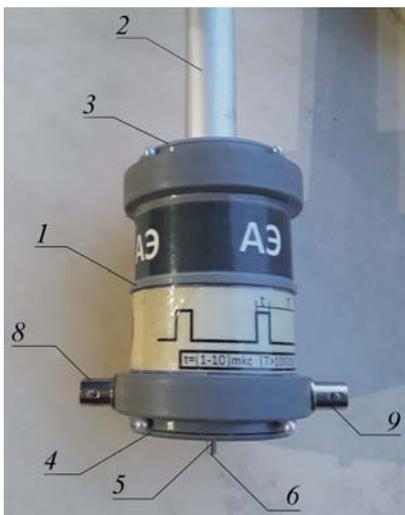


Рис. 6. Фотографии имитатора АЭ-1 и его верхней крышки: 1 – основная часть корпуса (пластик, диаметром 60 мм, высота 70 мм); 2 – дополнительная часть корпуса (дюралюминий, диаметр 19 мм, высота 170 мм); 3 – верхняя крышка корпуса (пластик); 4 – нижняя крышка корпуса (пластик); 5 – подвижный металлический стержень-волновод диаметром 3 мм, выступающий через отверстие в нижней крышке; 6 – закругленный контактный конец стержня-волновода; 7 – красный светодиод, индицирующий наличие электропитания; 8 – разъем для подключения электропитания напряжением 12 В; 9 – разъем для подключения внешнего генератора прямоугольных видеоимпульсов; 10 – зеленый светодиодный индикатор, излучающий импульс света в момент излучения акустического импульса

Таблица ориентировочных значений физических параметров имитаторов АЭ с потребительскими характеристиками и вариантами применения

Показатель	Имитаторы			
	Су-Нильсена	«ИНТЕРЮНИС-ИТ»	Панина	
			АЭ-1	АЭ-N
Физические параметры				
Форма акустического импульса:				
– однополярный треугольный	Нет	Нет	Да	Да
– двухполярный (треугольный переходящий в ступеньку)	Да	Нет	Нет	Нет
– радиои импульсный	Нет	Да	Нет	Нет
Длительность импульса, мкс	2,5+(>100)	–	Модификации от 1 до 5	1 – 10
Регулировка длительности импульса	Нет	Нет	Нет	Да
Амплитуда импульса, нм	~7	–	Модификации от 0,01 до 4	0,5 – 5
Стабильность воспроизведения амплитуды при многократных повторениях, дБ	±2,5	±1	±1	±1
Погрешность амплитуды по отношению к эталону, дБ	>6	–	<6	<6
Диапазон регулировки амплитуды импульса, дБ	0	28	0	20
Погрешность задания координаты точки излучения импульса, мм	0,5	Радиус ПАЭ	1	1
Диапазон регулировки частоты следования импульсов, Гц	Одиночный	1 – 10	Одиночный	1 – 100
Количество генерируемых импульсов при одной зарядке (одной заправке)	≤20	≤3 · 10 ⁴	≤3 · 10 ⁴	Неограниченно
Масса, г	~20	~300	~300	~250
Потребительские характеристики				
Максимальная степень моделирования импульса скачка поверхностной трещины (форма импульса и типы волн)	–	–	Да	Да
Работа без прикосновения руки оператора к имитатору в момент излучения импульса	Нет	Да	Нет	Да
Магнитное крепление к ОК	Нет	–	Да	Да
Низкая стоимость	Да	Нет	Нет	Нет
Простота приобретения	Да	Нет	Нет	Нет
Отсутствие дополнительных подключаемых устройств	Да	Нет	Да	Нет
Полнота и надежность метрологического обеспечения	Нет	Нет	Да	Да
Варианты применения				
Проверка работоспособности ПАЭ и каналов АЭ	Да	Да	Да	Да
Для выравнивания чувствительности каналов АЭ	–	Да	Да	Да
Установление расстояния между ПАЭ при настройке на контроль (выбор зон контроля)	–	Нет	Да	Да
Проверка правильности вычисления координаты источника АЭ	Да	Да	Да	Да
Возможность калибровки ПАЭ и каналов АЭ в импульсном режиме				
– по амплитудным параметрам	–	–	Да	Да
– по временным параметрам	–	–	Да	Да
– по счету импульсов	Да	–	Да	Да
– по счету событий	Да	Да	Да	Да
– по спектральным параметрам	–	Нет	Да	Да
Знак «—» означает неопределенность ответа.				

диодные индикаторы 8 (белый) и 9 (зеленый) используются для контроля степени заряженности аккумулятора. Гнездо 13 типа miniUSB используется для подзарядки аккумулятора от стандартного зарядного устройства для сотовых телефонов. Однократное нажатие и отпускание нефиксирующейся кнопки START сопровождается излучением одиночного акустического импульса. При этом красный светодиод 11 фиксирует готовность к генерации, а зеленый светодиод 12 дает вспышку в момент излучения акустического импульса. Один заряд аккумулятора обеспечивает генерацию не менее 30 000 импульсов. Фотография акустического импульса, излучаемого одной из модификаций АЭ-1, зарегистрированная тонким приемным пьезоэлементом и запоминающим осциллографом, приведена на рис. 4, а его спектр, рассчитанный по технологии быстрого преобразования Фурье, — на рис. 5. Амплитуда смещения импульса, привязанная к ГЭТ 194–2011 [8] с погрешностью, не превышающей 6 дБ, составила 3,9 нм. Воспроизводимость при 15-кратных измерениях находилась в пределах ± 1 дБ. Поэтому АЭ-1 по сравнению с имитатором Су–Нильсена лучше моделирует импульс скачка трещины, обладает хорошей повторяемостью, метрологической обеспеченностью. Следовательно, его целесообразно использовать вместо имитатора Су–Нильсена.

Фотографии имитатора АЭ-N и его верхней крышки приведены на рис. 6. Конструктивно он похож на АЭ-1, но имеет следующие отличия. Внутри корпуса 1 отсутствуют источник питания и генератор одиночных импульсов. Электропитание напряжением 12 В подается от внешнего источника через разъем 8, а запускающие видеосигналы — через разъем 9 от внешнего генератора видеосигналов. Красный свето-

диод 7 сигнализирует о наличии электропитания, а зеленый светодиод дает вспышку в момент излучения акустических импульсов. Частоту повторения импульсов можно регулировать от 1 до 100 Гц, длительность — от 1 до 10 мкс, а амплитуду — от 0,5 до 5 нм. Данный имитатор целесообразно использовать для импульсной калибровки ПАЭ и каналов аппаратуры АЭ.

При несложной доработке можно изготовить и другие варианты импульсных имитаторов с сухим точечным контактом. Так, АЭ-1 можно перестроить на излучение импульса другой длительности и амплитуды. А в корпус АЭ-N можно вмонтировать встроенный перестраиваемый генератор импульсов и источник электропитания.

Подводя итог рассмотрения описанных имитаторов АЭ, составим сводную таблицу ориентировочных значений их физических параметров, с дополнением потребительских характеристик и возможностей их применения в практике АЭ.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 12716–2021. Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный контроль. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019.
2. US Patent 4018084A. Acoustic emission simulator / N.N. Hsu, 1977.
3. Nielson A. Acoustic emission source based on pencil lead breaking. Copenhagen: The Danish Welding Institute Publication, 1980.
4. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Реализация источника Су–Нильсена для проверки работоспособности АЭ-аппаратуры // Вестник ЮУрГУ. 2014. Т. 14, № 2.
5. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии // Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 7. Кн. 1.

2-е изд., дораб. М.: Машиностроение, 2006. С. 235 – 236.

6. Овчарук В.Н. Акустико-эмиссионные информационно-измерительные системы. Пути и методы совершенствования. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2013. 229 с.
7. Панин В.И., Константинов В.А. Образцовые меры для калибровки пьезопреобразователей акустической эмиссии // Тезисы II Всесоюз. науч.-техн. семинара «Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений», Хабаровск, октябрь, 1975 г. Хабаровск, 1975.
8. ГЭТ 194–2011. Государственный первичный талон единиц амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред / разработчики: В.Г. Бакшеев, В.И. Панин, В.Г. Троценко, А.В. Шулатов. Хабаровск: Дальневосточный филиал ВНИИФТРИ, 2011.
9. ГОСТ Р 8.826–2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред. М.: Стандартинформ, 2014.
10. ГОСТ 19445.1–95. Механические карандаши. Часть 2. Черные грифели. Классификация и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1994.
11. РСТ РСФСР 195–82. Стержни пишущие. Технические условия. М.: Госплан РСФСР, 1988.
12. ПБ 03-593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. М.: ПИО ОБТ, 2003. 55 с.