

Исследование частотного спектра сигналов акустической эмиссии методом инфрадинного преобразования

В. Д. Кревчик¹, А. В. Рудин², В. В. Сафонов³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹physics@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Процесс образования и развития микротрещин в стенках резервуара со сжиженными углеводородами неминуемо может привести к нарушению герметичности и, как следствие, созданию пожароопасной ситуации и даже взрыву резервуара. Проводить диагностику герметичности стенок резервуаров, а также деталей машин и конструкций, в режиме их эксплуатации позволяет метод акустической эмиссии. Цель работы состояла в разработке методики снижения влияния низкочастотных сигналов внешних шумов на спектр регистрируемых акустических импульсов и определении типа микродефекта, соответствующего данному спектру частот. *Материалы и методы.* Для снижения влияния низкочастотных сигналов внешних шумов на спектр регистрируемых акустических импульсов предлагается оригинальная методика, основанная на инфрадинном высокочастотном преобразовании сигналов акустической эмиссии с последующим переносом спектра частот принимаемых сигналов акустической эмиссии из области низкочастотного ультразвукового диапазона частот в три отдельные высокочастотные области спектра без изменения параметров частотного спектра акустических сигналов. *Результаты.* Установлено, что инфрадинное высокочастотное преобразование сигналов акустической эмиссии из низкочастотной области частот в высокочастотную с последующим разделением на три полосовые частотные спектры позволило значительно снизить влияние низкочастотных сигналов внешних шумов на спектр регистрируемых акустических импульсов, повысить чувствительность акустической установки, осуществить спектральный анализ регистрируемых сигналов акустической эмиссии и определить тип микродефекта, соответствующий данному спектру частот, в режиме эксплуатации исследуемого образца. *Выводы.* Применение метода инфрадинного преобразования сигналов акустической эмиссии, возникающих в режиме упругой деформации, позволило значительно снизить влияние низкочастотных сигналов внешних шумов на спектр регистрируемых акустических импульсов, повысить чувствительность акустической установки и определить тип образовавшегося микродефекта в различных деталях машин и конструкциях в режиме их эксплуатации.

Ключевые слова: спектр, акустическая эмиссия, конструкции, частота, преобразование, датчик, резонансный усилитель, счетчик импульсов

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0748-2020-0012.

Для цитирования: Кревчик В. Д., Рудин А. В., Сафонов В. В. Исследование частотного спектра сигналов акустической эмиссии методом инфрадинного преобразования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2024. № 3. С. 160–173. doi: 10.21685/2072-3040-2024-3-11

Studying the frequency spectrum of acoustic emission signals by the infradyne transform method

V.D. Krevchik¹, A.V. Rudin², V.V. Safonov³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹physics@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The process of formation and development of microcracks in the walls of a tank with liquefied hydrocarbons can inevitably lead to a breach of tightness and, as a consequence, to the creation of a fire-hazardous situation and, yes, an explosion of the tank. The acoustic emission method allows to diagnose the tightness of the walls of the reservoirs, as well as machine parts and structures, in the mode of their operation. The purpose of the work was to develop a technique for reducing the influence of low-frequency signals of external noise on the spectrum of recorded acoustic pulses and determining the type of microdefect corresponding to this frequency spectrum. *Materials and methods.* To reduce the influence of low-frequency signals of external noise on the spectrum of recorded acoustic pulses, an original technique is proposed based on the infradine RF conversion of acoustic emission signals, followed by the transfer of the frequency spectrum of the received acoustic emission signals from the low-frequency ultrasound frequency range to three separate high-frequency spectral regions without changing parameters of the frequency spectrum of acoustic signals. *Results.* A functional block diagram of an acoustic installation has been developed that allows recording acoustic emission signals with subsequent infradine RF conversion and separation into three separate frequency channels, simultaneously registering the number of pulses and the amplitude of individual acoustic emission pulses. The parameters of LC circuits of bandpass filters of resonant RF amplifiers have been calculated. *Conclusions.* The use of the method of infradine conversion of acoustic emission signals arising in the elastic deformation mode allowed to significantly reduce the influence of low-frequency external noise signals on the spectrum of recorded acoustic pulses, increase the sensitivity of the acoustic installation and determine the type of micro-defect formed in various machine parts and structures in their operation mode.

Keywords: spectrum, acoustic emission, structures, transformation, frequency, sensor, resonant amplifier, pulse counter

Financing: the research was financed by the grant of the Ministry of Sciences and Higher Education of the Russian Federation No. 0748-2020-0012.

For citation: Krevchik V.D., Rudin A.V., Safonov V.V. Studying the frequency spectrum of acoustic emission signals by the infradyne transform method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2024;(3):160–173. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2024-3-11

Введение

В нефтяной и газовой промышленности широко применяются резервуары и хранилища газообразных и сжиженных углеводородов большого объема, находящиеся под высоким давлением до нескольких сотен атмосфер. При этом на стенки сосудов непрерывно действуют большие растягивающие механические напряжения, которые со временем приводят к образованию и развитию микродефектов и трещин в металлических стенках резервуара. Микродефекты и микротрещины постепенно накапливаются в металле и приводят к образованию трещин и полостей, что со временем может привести как к утечке углеводородов, так и к разрушению стенки сосуда. Таким образом, неконтролируемый процесс образования и развития микротрещин в стенках резервуара со сжиженными углеводородами может привести к нарушению

герметичности и, как следствие, к созданию пожароопасной ситуации и даже взрыву резервуара [1].

Проводить диагностику герметичности стенок резервуаров, а также деталей машин и конструкций как в лабораторных условиях, так и в режиме их эксплуатации позволяет метод акустической эмиссии. Акустико-эмиссионный метод относится к современным неразрушающим методам диагностики, который позволяет проводить дефектоскопию различных деталей, узлов и конструкций без нарушения их целостности и непосредственно в процессе их эксплуатации. Метод акустической эмиссии основан на регистрации и последующем анализе амплитудно-частотных параметров акустических сигналов в ультразвуковом диапазоне частот, возникающих в деталях машин и конструкциях, находящихся в упругодеформированном состоянии. Режим упругодеформированного состояния может быть обеспечен как условиями эксплуатации детали, так и действием внешней механической силы. Частотный спектр и количество сигналов акустической эмиссии определяются как типом, так и размером микродефекта. Поэтому анализ амплитудно-частотных параметров сигналов акустической эмиссии, полученных в режиме упругодеформированного состояния исследуемого образца, позволит заблаговременно обнаружить микродефект и проследить этапы его развития [2, 3].

Преимущество метода акустической эмиссии в сравнении с методом ультразвуковой дефектоскопии и рентгенографическим методом заключается еще и в том, что метод акустической эмиссии позволяет регистрировать только развивающиеся микродефекты, которые представляют наибольшую опасность для резервуаров и конструкций.

Образование и развитие микродефекта, т.е. движение в объеме детали, например, микротрещины, сопровождается возникновением и распространением ультразвуковых волн достаточно высокой мощности и амплитуды, которую можно зарегистрировать с помощью несложного электронного оборудования. Регистрация и спектральный анализ сигналов акустической эмиссии позволяют не только обнаружить микродефект на ранней стадии его развития, но и локализовать его в объеме исследуемой детали или конструкции, а также и определить тип дефекта [4–6].

В связи с этим выявление процесса образования и развития микродефектов и микротрещин в резервуарах высокого давления, а также в деталях машин и конструкциях, подвергающихся как непрерывным, так и периодическим механическим воздействиям, является актуальной задачей.

Цель данной работы состояла в разработке методики снижения влияния низкочастотных сигналов внешних шумов на спектр регистрируемых акустических импульсов, которая позволяет повысить чувствительность акустической установки, а также путем инфрадинного преобразования сигналов акустической эмиссии из низкочастотной области частот в высокочастотную с последующим разделением на три полосовые частотные спектры осуществить спектральный анализ регистрируемых сигналов акустической эмиссии и определить тип микродефекта, соответствующий данному спектру частот.

1. Описание методики инфрадинного высокочастотного преобразования сигналов акустической эмиссии

Для снижения влияния низкочастотных сигналов внешних шумов на спектр регистрируемых акустических импульсов, возникающих в деталях

машин и конструкциях, предлагается оригинальная методика, основанная на инфрадинном высокочастотном (ВЧ) преобразовании сигналов акустической эмиссии с последующим переносом спектра частот принимаемых сигналов акустической эмиссии из области низкочастотного ультразвукового диапазона частот в три отдельные высокочастотные области спектра без изменения параметров частотного спектра акустических сигналов.

Методика инфрадинного преобразования реализована в акустической установке, которая позволяет проводить диагностику образования и развития микродефектов, типа микротрещин на ранней стадии их развития в различных деталях машин и конструкциях. Акустическая установка образована акустическим датчиком сигналов акустической эмиссии, который подключен к электронному блоку – трехканальному анализатору частот, состоящему из трех отдельных высокочастотных каналов, выходы которых подключены к счетчикам импульсов и регистрирующим приборам амплитуды сигналов [7].

При воздействии растягивающих (сжимающих) или изгибающих механических напряжений в исследуемом образце, например продольной балке, происходит процесс образования и развития микродефектов, типа линейных дислокаций или микротрещин, который сопровождается распространением упругих волн в ультразвуковом диапазоне частот $f = (30-300)$ кГц. Акустический датчик, закрепленный на поверхности исследуемого образца, преобразует ультразвуковые колебания в электрические той же частоты. Выход акустического датчика через коаксиальный кабель подключен к электронному блоку акустической установки. Электронный блок образован трехканальным анализатором спектра частот, которые позволяют одновременно регистрировать число импульсов и их амплитуду в заданном интервале частот [7].

Каждый из трех каналов анализатора спектра частот образован смесителем частоты, который осуществляет инфрадинное высокочастотное преобразование сигналов акустической эмиссии, ВЧ-полосовым фильтром, резонансным усилителем высокой частоты, формирователем прямоугольных импульсов, измерителем амплитуды и счетчиком числа импульсов [7].

Инфрадинное ВЧ-преобразование сигналов акустической эмиссии осуществляет перенос спектра частот принимаемых сигналов акустической эмиссии из области низкочастотного ультразвукового диапазона частот $\Delta f_c = (0,05-0,375)$ МГц, в три отдельные высокочастотные области спектра с полосой частот: $\Delta f_{П1} = (1,7552-0,0375)$ МГц, $\Delta f_{П2} = (1,6307-0,0375)$ МГц, $\Delta f_{П3} = (1,5057-0,0375)$ МГц, без изменения параметров частотного спектра акустических сигналов [7].

На рис. 1 изображена функциональная блок-схема акустической установки, позволяющей осуществлять регистрацию сигналов акустической эмиссии с последующим ВЧ-преобразованием и разделением на три отдельных частотных канала.

Введение новых элементов и связей между ними в акустической установке обеспечивает разделение в автоматическом режиме низкочастотного спектра сигналов акустической эмиссии на три отдельные высокочастотные полосы частот. Это позволило существенно снизить влияние низкочастотных шумов на спектр сигналов акустической эмиссии и определить тип образовавшегося микродефекта в различных деталях машин и конструкциях в режиме их эксплуатации [7], соответствующего данному спектру частот.

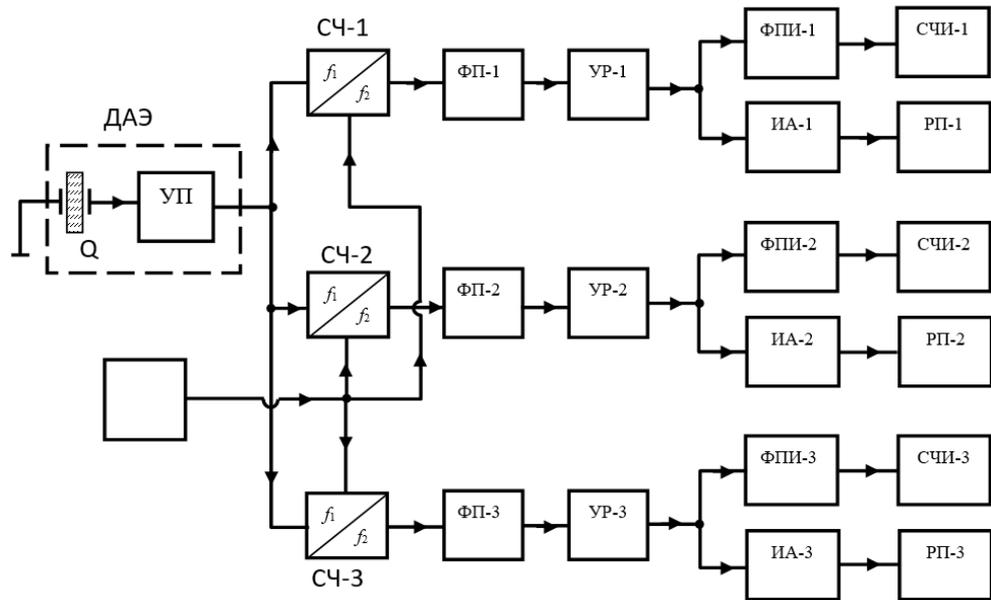


Рис. 1. Блок-схема акустической установки с последующим ВЧ-преобразованием сигналов акустической эмиссии

На рис. 2,*а* приведен низкочастотный спектр сигналов акустической эмиссии, а на рис. 2,*б* приведены высокочастотные интервалы частотного спектра сигналов акустической эмиссии после инфрадинного ВЧ-преобразования.

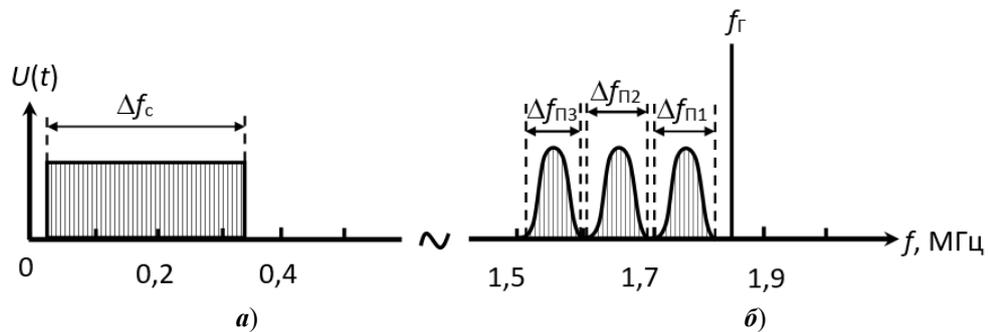


Рис. 2. Низкочастотный спектр сигналов акустической эмиссии (*а*); высокочастотные интервалы частотного спектра сигналов акустической эмиссии после инфрадинного ВЧ-преобразования (*б*)

Инфрадинное ВЧ-преобразование низкочастотных сигналов акустической эмиссии в высокочастотные сводится к умножению сигналов акустической эмиссии непрерывных синусоидальных колебаний гетеродина, частоты которых отличаются на величину промежуточной частоты [8].

Рассмотрим процесс ВЧ-преобразования сигнала акустической эмиссии, который описывается гармонической функцией:

$$U_C(t) = U_0 \cos(\omega_C t + \varphi_C), \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда гармонических колебаний акустического сигнала; ω_C – циклическая частота колебаний акустического сигнала.

Непрерывные электрические колебания гетеродина описываются гармоническим уравнением:

$$U_{\Gamma}(t) = U_{\Gamma} \cos(\omega_{\Gamma}t + \varphi_{\Gamma}), \quad (2)$$

где U_{Γ} – амплитуда высокочастотных гармонических колебаний гетеродина; ω_{Γ} – циклическая частота электрических колебаний гетеродина.

После умножения напряжения колебаний акустических сигналов и напряжения гармонических колебаний гетеродина в блоке гетеродинного смесителя получается выражение, содержащее два слагаемых [8]:

$$\begin{aligned} U_{\text{ПР}}(t) &= U_0 U_{\Gamma} \cos(\omega_C t + \varphi_C) \cos(\omega_{\Gamma} t + \varphi_{\Gamma}) = \\ &= \frac{1}{2} U_0 U_{\Gamma} \left\{ \cos[(\omega_C - \omega_{\Gamma})t + (\varphi_C - \varphi_{\Gamma})] + \cos[(\omega_C + \omega_{\Gamma})t + (\varphi_C + \varphi_{\Gamma})] \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

Первое слагаемое в уравнении (3) соответствует гармоническим колебаниям с разностной частотой $(\omega_C - \omega_{\Gamma})$ и разностной фазой $(\varphi_C - \varphi_{\Gamma})$ сигналов акустической эмиссии и электрических колебаний гетеродина. Второе слагаемое в уравнении (3), напротив, имеет частоту, равную сумме частот акустического сигнала и электрических колебаний гетеродина $(\omega_C + \omega_{\Gamma})$, и фазу, равную сумме фаз указанных сигналов $(\varphi_C + \varphi_{\Gamma})$. Причем спектр как первого, так и второго слагаемого полностью соответствует спектру частот акустического сигнала, который смещен как в область разностной (на рис. 2 не показан), так и в область суммарной частоты (см. рис. 2) [8].

Выделение суммарной составляющей на выходе электронного блока гетеродинного смесителя заданной полосы частот ВЧ-преобразованных сигналов обеспечивается полосовым фильтром, в качестве которого используется резонансный LC-контур [8].

Это позволяет почти полностью отфильтровать низкочастотные сигналы внешних механических шумов и тем самым повысить чувствительность акустической установки при исследовании спектра сигналов акустической эмиссии исследуемого образца в режиме его эксплуатации.

Данная методика также позволила одновременно фиксировать число импульсов акустической эмиссии и их амплитуды в каждом отдельном интервале частот и определить природу и тип микродефекта, соответствующего данному спектру частот [9].

2. Описание основных элементов акустической установки

Основным элементом акустической установки является датчик сигналов акустической эмиссии – акустическая ячейка (ДАЭ). Конструкция ДАЭ представлена на рис. 3.

Конструкция акустической ячейки ДАЭ представляет собой полый металлический цилиндр 2 диаметром $d = 30$ мм и длиной $l = 65$ мм. К первому основанию цилиндра навинчивается резьбовая цилиндрическая ступенчатая пластина 1 толщиной $h = 5,3$ мм, к внутренней поверхности которой соосно

закреплен пьезоэлектрический дисковый преобразователь 3 типа BaTiO_3 с основной гармоникой $f_1 = 7$ МГц, который на низких ультразвуковых частотах $f = (30\text{--}300)$ кГц работает как широкополосный преобразователь, почти с линейной амплитудно-частотной характеристикой. Ступенчатая пластина 1 одновременно выполняет функцию звукопровода ультразвуковых волн. Акустический контакт пьезопреобразователя 3 со звукопроводом 1 и с поверхностью исследуемого образца обеспечивается тонким слоем иммерсионной жидкости (машинного масла). Внутри полости акустической ячейки размещен электронный усилитель 4, обеспечивающий предварительное усиление сигналов акустической эмиссии и согласование высокого сопротивления пьезоэлектрического преобразователя, с низким волновым сопротивлением коаксиального кабеля, сопротивление которого равно $R = 50$ Ом, посредством которого осуществляется соединение акустической ячейки с электронным блоком акустической установки. Вход усилителя 4 тонкой пластинкой 5 соединен с преобразователем 3, а выход подключен к ВЧ-разъему 6 типа СР-50, который ввинчен во второе основание цилиндра акустической ячейки [4–6].

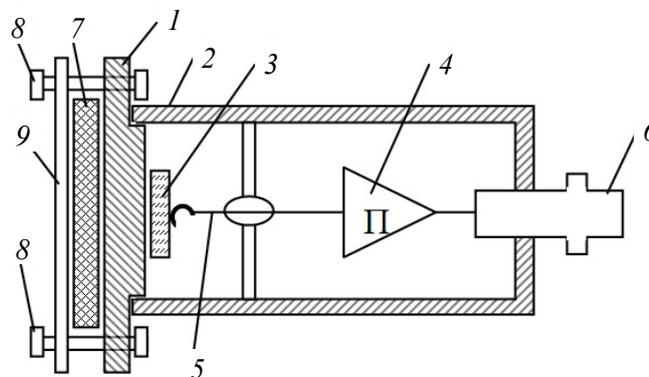


Рис. 3. Конструкция акустической ячейки – датчика сигналов акустической эмиссии ДАЭ

Исследуемый образец 7, например протяженная металлическая тонкая балка, прижимается к ступенчатому звукопроводу 1 упорной пластиной 9 посредством винтов 8.

Принципиальная электрическая схема предварительного усилителя акустической ячейки представлена на рис. 4.

Электрическая схема предварительного усилителя представляет собой однокаскадный усилитель с общим эмиттером и большим входным сопротивлением. Выход усилителя совмещен с проводом питания и непосредственно подключен к ВЧ-разъему СР-50. Конструкция акустической ячейки с совмещенным электронным усилителем обеспечивает удаленность на расстояние порядка 50 м от основного электронного блока акустической установки с сохранением необходимого уровня сигналов АЭ [4–6].

Принципиальная электрическая схема блока формирования прямоугольных импульсов приведена на рис. 5. Электрическая схема преобразователя образована триггером Шмидта, собранного на двух транзисторах Т2 и Т3, входная цепь которого содержит транзисторный ключ, выполненный на

транзисторе T1, и RC-цепочку, которая и формирует длительность прямоугольных импульсов на выходе преобразователя. Выходной каскад преобразователя представляет собой транзисторный ключ, выполненный на транзисторе T4. В качестве транзисторов использованы кремневые *n-p-n*-транзисторы обратной проводимости типа КТ-315В [10].

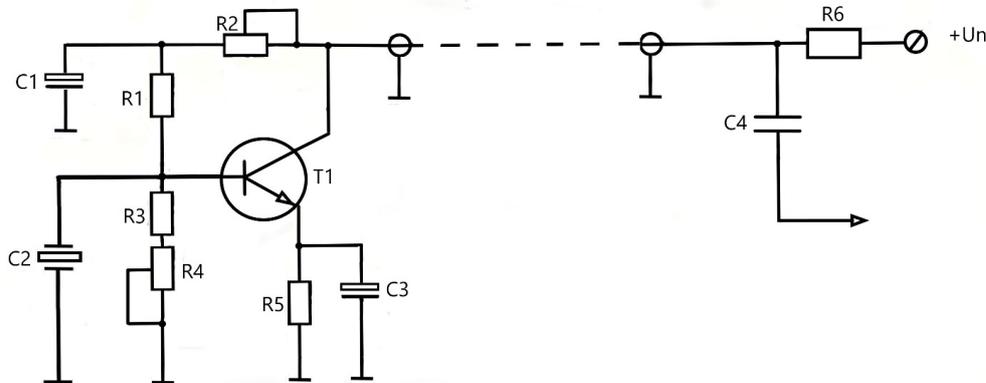


Рис. 4. Принципиальная схема предварительного усилителя

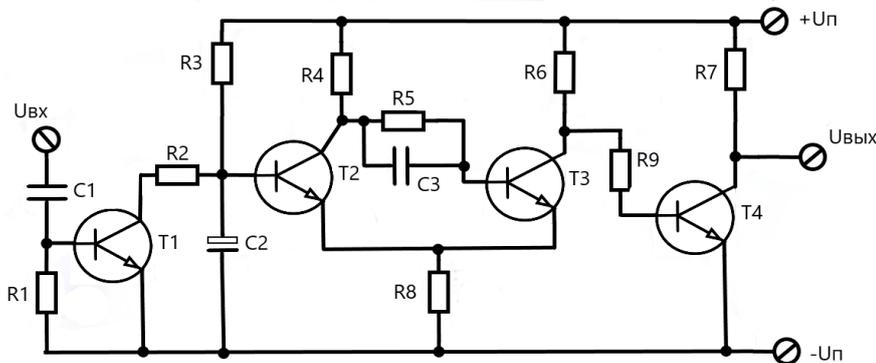


Рис. 5. Принципиальная схема формирователя прямоугольных импульсов

Измерение числа импульсов акустической эмиссии осуществляется электронным счетчиком прямоугольных импульсов типа I-8080-GR, работающим как в режиме непрерывного счета импульсов, так и в режиме автоматического сброса показаний.

На рис. 6 представлена временная диаграмма волнового пакета отдельного акустического сигнала до и после преобразования, т.е. на входе и выходе электронного блока формирователя прямоугольных импульсов (ФПИ).

На рис. 7 изображены графические зависимости приведенного числа импульсов акустической эмиссии от величины относительной деформации исследуемого образца, где N – суммарное число импульсов; $\dot{N} = \frac{dN}{d\varepsilon}$ – скорость счета импульсов – число импульсов, отнесенных к единичному интервалу относительной деформации [2].

Электронный блок измерения амплитуды отдельного импульса акустической эмиссии состоит из последовательно соединенных пикового детекто-

ра, усилителя постоянного тока и регистрирующего прибора – цифрового милливольтметра типа ЕМ-362. В качестве пикового детектора используется полупроводниковый диод типа D9A. Усилитель постоянного тока собран на полевом транзисторе типа КП-303Е по схеме с общим истоком [10].

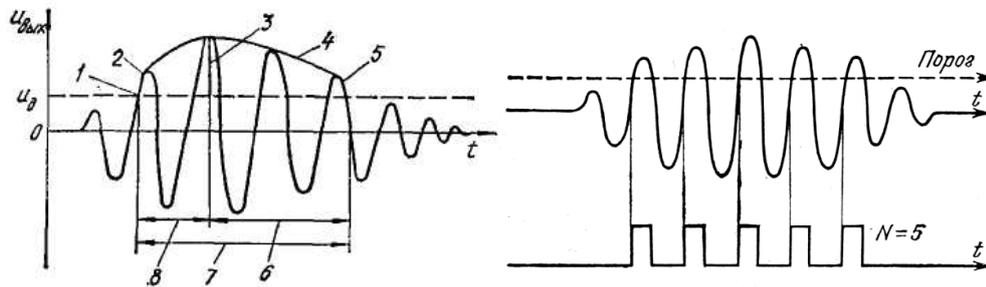


Рис. 6. Временная диаграмма волнового пакета акустического сигнала до и после преобразования на выходе блока ФПИ

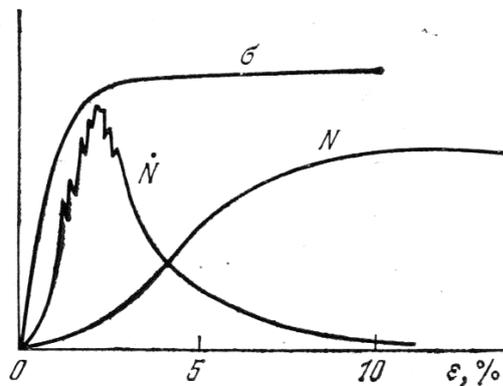


Рис. 7. Графические зависимости приведенного числа импульсов акустической эмиссии от величины относительной деформации

Основными элементами гетеродинного преобразователя – смесителя частоты – является однокаскадный усилитель резонансного типа с LC -колебательным контуром, настроенный на одну из трех резонансных полос частот. Смеситель частоты и резонансный усилитель собраны в одном электронном блоке. Принципиальная электрическая схема резонансного усилителя сигналов акустической эмиссии, совмещенного со смесителем частоты, приведена на рис. 8 [10].

В качестве смесителя частоты используется первый каскад резонансного усилителя, выполненный на полупроводниковом транзисторе обратной $n-p-n$ -проводимости типа КТ-342Б. Полезный сигнал подается непосредственно на базу транзистора первого каскада, а сигнал гетеродина через резистивный делитель напряжения также подается на базу транзистора первого каскада. Выделение заданной полосы частот преобразованного сигнала осуществляется резонансным LC -контуром, который через разделительные конденсаторы подключен к коллектору транзистора первого каскада и к базе транзистора второго каскада резонансного усилителя. Установление заданной

полосы частот осуществляется подстроечным керамическим конденсатором типа КТК-2 номинальной емкостью (5–15) пФ, который параллельно подключается к конденсатору C_k . Выходной ВЧ-преобразованный сигнал снимается с коллектора транзистора T_2 второго каскада через разделительную емкость C_6 [10].

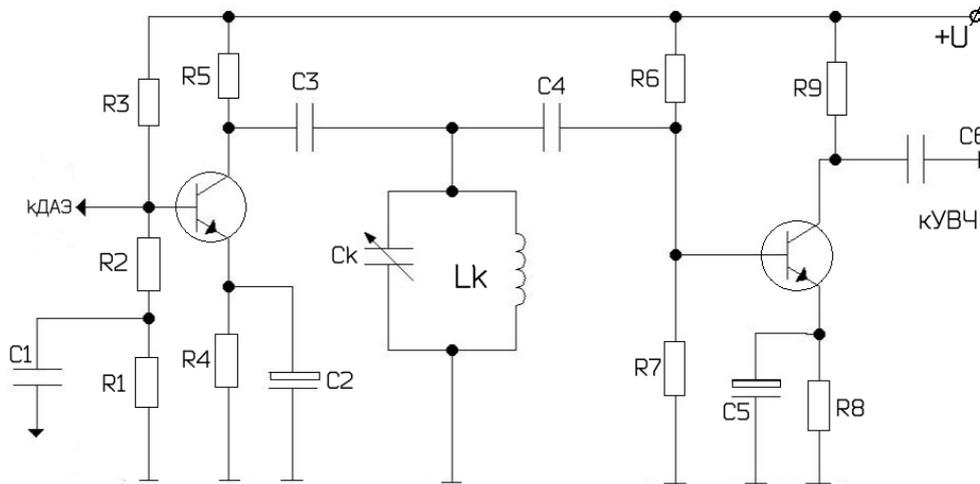


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема резонансного усилителя, совмещенного со смесителем частоты

В качестве гетеродина используется генератор синусоидальных колебаний высокой частоты с кварцевой стабилизацией частоты, электрическая схема которого собрана на двух высокочастотных кремниевых транзисторах типа КТ-342Б обратной $n-p-n$ -проводимости по схеме емкостной трехточки. Принципиальная электрическая схема гетеродина приведена на рис. 9.

В качестве кварцевого стабилизатора частоты используется прецизионный кварцевый резонатор с рабочей частотой $f_r = (1,8432 \pm 0,00005)$ МГц. Выходной сигнал снимается с эмиттерного повторителя второго транзистора [10]. Уровень выходного сигнала составляет 0,3 В.

Далее приводится расчет параметров резонансных LC -контуров полосовых фильтров резонансных ВЧ-усилителей.

Период колебаний резонансного LC -контура описывается известной формулой Томсона [10]:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (4)$$

где L – индуктивность контура; C – емкость конденсатора.

Из формулы (4) найдем выражение для индуктивности колебательного контура:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f^2}, \quad (5)$$

где f – частота ВЧ-колебаний, которая связана с периодом колебаний следующим выражением: $T = 1/f$.

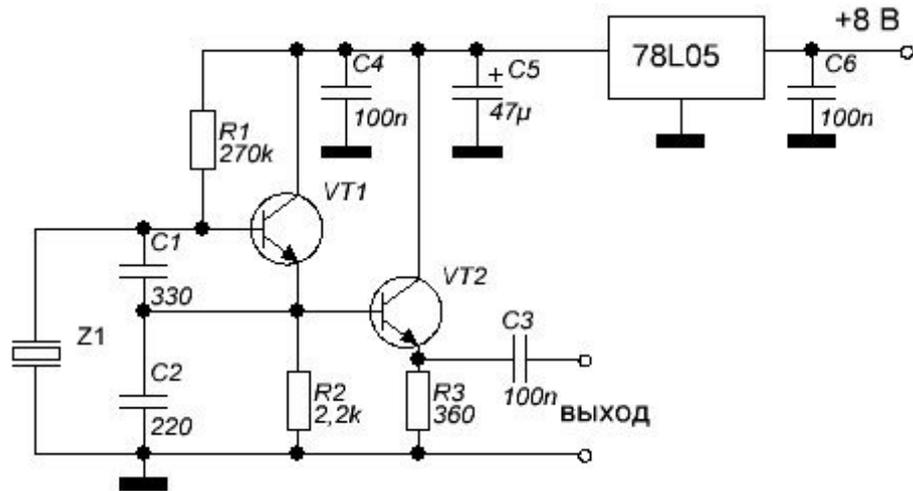


Рис. 9. Принципиальная схема гетеродина

Величина емкости конденсаторов для всех резонансных контуров полосовых фильтров находится в интервале $C = (250-500)$ пФ.

Величина индуктивности для однослойной цилиндрической катушки определяется по известной формуле [10]:

$$L = \frac{N^2 d}{\left(\frac{l}{d} + 0,45\right) \cdot 10^2}, \quad (6)$$

где d – диаметр катушки [мм]; l – длина катушки [мм]; N – число витков катушки, при этом индуктивность катушки имеет размерность [мкГн].

Решая обратную задачу, из выражения (6) найдем число витков однослойной катушки индуктивности и получим следующее выражение:

$$N = 32 \sqrt{\frac{L}{d} \left(\frac{l}{d} + 0,45\right)}. \quad (7)$$

Расчет численных значений параметров катушек индуктивностей резонансных контуров полосовых фильтров приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Расчет числа витков катушки индуктивности для ВЧ-преобразованных сигналов акустической эмиссии

f , МГц	λ , м	C , пФ	L , мкГн	l , мм	d , мм	N
1,5057	199,2	250	44,7	28	10	183
1,6307	184,0	250	38,1	26	10	167
1,7552	170,9	250	32,9	25	10	154

Как видно из приведенных табл. 1 и 2, длина катушки индуктивности резонансного LC-контра полосового фильтра на низких ультразвуковых частотах акустического сигнала составляет $l = 380$ мм, а длина катушки индук-

тивности резонансного LC -контура полосового фильтра на высоких частотах после ВЧ-преобразования составляет $\ell = 28$ мм.

Таблица 2

Расчет числа витков катушек индуктивности контуров полосового фильтра для низкочастотных сигналов акустической эмиссии

f , МГц	λ , м	C , пФ	L , мкГн	ℓ , мм	d , мм	N
0,188	1595,7	500	1434,8	380	10	2499
0,213	1408,5	500	1117,8	300	10	1987
0,338	887,6	500	443,9	160	10	965

Из сопоставления числа витков и геометрических размеров катушек индуктивности резонансных LC -контуров полосовых фильтров (табл. 1 и 2) на низких и высоких частотах ультразвуковых сигналов до и после преобразования следует, что диаметр катушек и число витков полосовых фильтров почти в 20 раз больше диаметра катушек и числа витков полосовых фильтров на высоких частотах после ВЧ-преобразования, что с конструкторско-технической точки зрения совершенно неприемлемо.

Таким образом, методика инфрадинного ВЧ-преобразования сигналов акустической эмиссии с последующим переносом спектра частот принимаемых сигналов акустической эмиссии из области низкочастотного ультразвукового диапазона частот в три отдельные высокочастотные области спектра без изменения параметров частотного спектра акустических сигналов вполне оправдана как в конструкторско-техническом, так и методическом аспекте.

Заключение

Разработаны оригинальная методика и функциональная блок-схема акустической установки, позволяющая осуществлять регистрацию сигналов акустической эмиссии, образующихся в твердом теле в режиме упругого механического воздействия, с последующим инфрадинным ВЧ-преобразованием сигналов акустической эмиссии и разделением на три отдельные высокочастотные полосы частот.

Разработаны принципиальные схемы электронных блоков и элементов акустической установки.

Проведен расчет параметров LC -резонансных контуров полосовых частотных спектров приемлемых геометрических размеров на высоких частотах.

Показано, что метод инфрадинного преобразования сигналов акустической эмиссии, возникающих при упругой деформации различных деталей, узлов машин и конструкций позволил значительно снизить влияние низкочастотных сигналов внешних шумов на спектр регистрируемых акустических импульсов и тем самым повысить чувствительность акустической установки.

Установлено, что инфрадинное ВЧ-преобразование сигналов акустической эмиссии из низкочастотной области частот в высокочастотную с последующим разделением на три полосовые частотные спектры позволяет осуществить спектральный анализ регистрируемых сигналов акустической эмиссии и определить тип микродефекта, соответствующий данному спектру частот, в режиме эксплуатации исследуемого образца.

Список литературы

1. Алешин Н. П., Щербинский В. Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий : учебник для ПТУ. М. : Высш. шк., 1991. 271 с.
2. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н. [и др.]. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / под ред. д.т.н., проф. Л. Н. Степановой. М. : Радио и связь, 2000. 280 с.
3. Артемов И. И., Кревчик В. Д. Акустическая эмиссия в условиях «скрытого» подрастания микротрещин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 4. С. 92–95.
4. Рудин А. В., Артемова Н. Е., Келасьев В. В. Исследование микронеоднородной структуры деталей машин методом акустической эмиссии // Проблемы исследования и проектирования машин : сб. ст. IV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2008. С. 68–72.
5. Артемов И. И., Кревчик В. Д., Рудин А. В. Прибор для исследования процесса образования и развития микротрещин на ранней стадии // Новые промышленные технологии «Качество и надежность» – Заречный. 2010. № 1. С. 38–46.
6. Krevchik V. D., Rudin A. V., Zadera A. V., Semenov M. B., Aringazin A. K., Semenov I. M. Method for Measuring the Acoustic Emission of Developing Microcracks in Machine Parts // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT, March 11–13). Moscow, 2020. 5 p.
7. Патент 2788311 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/14, G 01 B 17/04. Устройство для ранней диагностики образования и развития микротрещин в деталях машин и конструкциях / Кревчик В. Д., Семенов М. Б., Рудин А. В. № 2022102912 ; зарег. 17.01.2023.
8. Смогилев К. А., Вознесенский И. В., Филиппов Л. А. Радиоприемники СВЧ. М. : Воениздат, 1967. 556 с.
9. Брагинский А. П., Евсеев Д. Г., Зданьски А. К. [и др.]. Распознавание дефектов по спектральным характеристикам акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1984. № 1. С. 47–54.
10. Борисов Н. М., Бокуняев А. А., Варламов Р. Г. [и др.]. Справочник радиолюбителя-конструктора. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1983. 560 с.

References

1. Aleshin N.P., Shcherbinskiy V.G. *Radiatsionnaya, ul'trazvukovaya i magnitnaya defektoskopiya metalloizdeliy: uchebnik dlya PTU = Radiation, ultrasonic and magnetic flaw detection of metal products: textbook for vocational schools*. Moscow: Vyssh. shk., 1991:271. (In Russ.)
2. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N. et al. *Akustiko-emissionnaya diagnostika konstruktсий = Acoustic emission diagnostics of structures*. Moscow: Radio i svyaz', 2000:280. (In Russ.)
3. Artemov I.I., Krevchik V.D. Acoustic emission under conditions of “hidden” growth of microcracks. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Issues of mechanical engineering and machine reliability*. 2005;(4):92–95. (In Russ.)
4. Rudin A.V., Artemova N.E., Kelas'ev V.V. Study of micro-heterogeneous structure of machine parts by acoustic emission method. *Problemy issledovaniya i proektirovaniya mashin: sb. st. IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of research and design of machines: proceedings of the 4th International scientific and engineering technologies*. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2008:68–72. (In Russ.)
5. Artemov I.I., Krevchik V.D., Rudin A.V. Device for studying the process of formation and development of microcracks at an early stage. *Novye promyshlennye tekhnologii «Kachestvo i nadezhnost'» – Zarechnyy = New industrial technologies “Quality and reliability” - Zarechny*. 2010;(1):38–46. (In Russ.)

6. Krevchik V.D., Rudin A.V., Zadera A.V., Semenov M.B., Aringazin A.K., Semenov I.M. Method for Measuring the Acoustic Emission of Developing Microcracks in Machine Parts. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT, March 11–13)*. Moscow, 2020:5.
7. Patent 2788311 Russian Federation, MPK G 01 N 29/14, G 01 B 17/04. *Ustroystvo dlya ranney diagnostiki obrazovaniya i razvitiya mikrotreshchin v detalyakh mashin i konstruktivnykh = Device for early diagnostics of formation and development of microcracks in machine parts and structures*. Krevchik V.D., Semenov M.B., Rudin A.V. № 2022102912; appl. 17.01.2023. (In Russ.)
8. Smogilev K.A., Voznesenskiy I.V., Filippov L.A. *Radiopriemniki SVCh = Microwave radio receivers*. Moscow: Voenizdat, 1967:556. (In Russ.)
9. Braginskiy A.P., Evseev D.G., Zdan'ski A.K. et al. Recognition of defects by spectral characteristics of acoustic emission. *Defektoskopiya = Defectoscopy*. 1984;(1):47–54. (In Russ.)
10. Borisov N.M., Bokunyaev A.A., Varlamov R.G. et al. *Spravochnik radiolyubitelya-konstruktora. 3-e izd., pererab. i dop. = Handbook of the amateur radio designer. The 3rd edition, revised and supplemented*. Moscow: Radio i svyaz', 1983:560. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Дмитриевич Кревчик

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики, декан факультета
информационных технологий
и электроники, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: physics@pnzgu.ru

Vladimir D. Krevchik

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of the
sub-department of physics,
dean of the faculty of information
technology and electronics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Александр Васильевич Рудин

кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры физики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

Aleksandr V. Rudin

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor, associate
professor of the sub-department of physics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Вячеслав Владимирович Сафонов

преподаватель кафедры физики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

Vyacheslav V. Safonov

Lecturer of the sub-department of physics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.07.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.08.2024

Принята к публикации / Accepted 30.09.2024