

УЧРЕДИТЕЛИ

ФГБУ науки
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН,
НП “Национальная технологическая палата”,
ООО “Сенсидат-Плюс” (издатель)

Гл. редактор **Ф. Ф. Пашенко**
Зам. гл. редактора **А. Ф. Каперко**
Отв. секретарь **Г. М. Баранова**
Выпускающий редактор **С. В. Суханова**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.В. Андришин, д. т. н., проф.,
Э.К. Аракелян, д. т. н., проф.,
Г. М. Баранова,
С. Н. Васильев, акад. РАН,
Г. И. Джанджгава, д. т. н., проф.,
Е. Л. Ерёмин, д. т. н., проф.,
А. Н. Житков, к. т. н., доц.,
А. А. Ищенко, к. э. н.,
С. И. Касаткин, д. т. н., проф.,
А. М. Касимов, д. т. н.,
А. Ф. Каперко, д. т. н., проф.,
Б. В. Лункин, к. т. н.,
В. П. Мешалкин, акад. РАН,
В. П. Морозов, д. т. н.,
Д. А. Новиков, акад. РАН,
Ф. Ф. Пашенко, д. т. н., проф.,
А. Ф. Пашенко, к. т. н.,
Г. А. Пикина, д. т. н., проф.,
Б. И. Подлепский, к. т. н., доц.,
В. В. Поляков
Н. Л. Прохоров, д. т. н., проф.,
А. Ф. Резчиков, чл.-корр. РАН,
О. С. Сироткин, чл.-корр. РАН,
Кукджин Чун, д. т. н., проф.,
М.В. Улянов, д. т. н., проф.,
В. А. Шахнов, чл.-корр. РАН,
М. С. Шкабардня, д. т. н., проф.,
И. Б. Ядыкин, д. т. н., проф.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕДСОВЕТЫ

(руководители)

Санкт-Петербург

В. Г. Кнорринг, д. т. н., проф. — (812) 297-60-01

Нижний Новгород

С. М. Никулин, д. т. н., проф. — (831) 436-78-40

Екатеринбург

С. В. Поршнев, д. т. н., проф. — (343) 375-97-79

Новосибирск

Ю. В. Чугуй, д. т. н., проф. — (383-3) 33-73-60

Красноярск

В. Г. Патоков, д. т. н., проф. — (391-2) 912-279

Бийск

Ю. А. Галенко, д. т. н., проф. — (3854) 43-25-69

В. А. Абанин, д. т. н., проф. (3854) 43-25-71

Пенза

М. А. Шербаков, д. т. н., проф. — (841-2) 56-37-08

Рязань

С. Н. Кириллов, д. т. н., проф. — (491-2) 92-04-55

Ульяновск

Н. Г. Ярушкина, д. т. н., проф. — (842-2) 43-03-22

Ижевск

В. А. Алексеев, д. т. н., проф. — (341-2) 21-29-33

Оренбург

М. Г. Кучеренко, д. т. н., проф. — (353-2) 77-34-19

Тула

В. Я. Распопов, д. т. н., проф. — (487-2) 35-19-59

Воронеж

В. К. Битюков, д. т. н., проф. — (473-2) 55-36-94

Курск

В. С. Титов, д. т. н., проф. — (471-2) 58-71-12

Тамбов

С. В. Мищенко, д. т. н., проф. — (475-2) 72-10-19

Липецк

Ю. И. Кудинов, д. т. н., проф. — (4742) 32-80-53

Астрахань

И. Ю. Петрова, д. т. н., проф. — (851-2) 25-73-11

Минск

И. С. Манах, к. ф.-м. н. — (417) 278-13-13

Уфа

А. И. Гулин, д. т. н., проф. — (347-2) 43-14-70

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

*Представляет Нижегородский региональный
редакционный совет*

- Пальгубев Д. А.** Особенности построения интегрированной цифровой телекоммуникационной сети обработки и обмена радиолокационной информации в едином информационном поле 4
- Ширяев А. А., Воротынцев В. М., Шоболов Е. Л.** Метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния в КМОП-микросхемах на основе анализа вольтамперных характеристик 11
- Пальгубев Д. А., Фитасов Е. С., Ильясафов А. Д.** Система распознавания малоразмерных малоскоростных воздушных объектов по объединенной разнородной информации и неполным данным от пространственно-разнесенных датчиков 16

* * *

- Аракелян Э. К., Пашенко Ф. Ф., Косой А. А.** Оптимальное распределение активной и реактивной нагрузок ТЭС и пути их интеллектуализации с применением цифровых моделей 23
- Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Курбатов А. Н.** и др. Ультразвуковая система для определения продольных механических напряжений в рельсах 31
- Филонов О. М., Бестугин А. Р., Киришина И. А.** и др. Акустолазерный модуль для обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в урбанизированной среде 40
- Аристова Н. И., Чадеев В. М.** Моделирование процесса технологической подготовки матричного производства 46
- Мещеряков А. Ю.** Технологии управления качеством воздуха в средах обитания человека 50

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПУБЛИЦИСТИКА

- Кнорринг В. Г.** Сравнение 58

ХРОНИКА

- Баранова Ю. А.** Новые технологии неразрушающего контроля 63

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых изданий ВАК и в RSCI на базе Web of Science

Подписные индексы: 79363 в каталоге Роспечати; 40874 в каталоге “Пресса России”

АДРЕС РЕДАКЦИИ: 117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, 65, к. 383. Тел./факс: (495) 198-17-20 доб. 11-60
www.datsys.ru. E-mail: datsys@mail.ru

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены ООО “Авансдсел солюшнз”

Отпечатано в типографии ООО “Авансдсел Солюшнз”, www.aov.ru. Заказ ds123. Подписано в печать 28.03.2023.
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 26.12.2013.
ПИ № ФС 77-56548. ISSN 1992-7185

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). На сайте Научной электронной библиотеки (www.elibrary.ru) доступны полные тексты статей.

FOUNDERS

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences,
Russian Academy of Sciences,
Non-commercial partnership
“National technological house”,
LLC “Sensidat-Plus” (publisher)

Editor-in-Chief **Pashchenko F. F.**
Deputy Editor-in-Chief **Kaperko A. F.**
Executive Secretary **Baranova G. M.**
Managing editor **Sukhanova S. V.**

EDITORIAL BOARD

Andryushin A.V., D.Sc. (Tech.), Prof.,
Arakelyan E. K., D.Sc. (Tech.), Prof.,
Baranova G. M.,
Vasilyev S. N., Acad., RAS,
Dzhandzhgava G. I., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Eremin E. L., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Zhitkov A. N., Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.,
Ishchenko A. A., Ph. D.,
Kasatkin S. I., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Kasimov A. M., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Kaperko A. F., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Lunkin B. V., Ph. D. (Tech.),
Meshalkin V. P., Acad., RAS,
Morozov V. P., D. Sc. (Tech.),
Novikov D. A., Acad., RAS,
Pashchenko, F. F., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Pashchenko, A. F., Ph. D. (Tech.),
Pikina G. A., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Podlepetskiy B. I., Ph. D. (Tech.),
Polyakov V. V.,
Prokhorov N. L., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Chun Kukjin, D. Sc. (Tech.), Prof.,
Rezhnikov A. F., Corr. mem., RAS,
Sirotkin O. S., Corr. mem., RAS,
Ulyanov M.V., D.Sc. (Tech.), Prof.,
Shakhnov V. A., Corr. mem., RAS,
Shkabardnya M. S., D. Sc. (Tech.), Prof.,
Yadykin I. B., D. Sc. (Tech.), Prof.

REGIONAL EDITORIAL COUNCILS

(leaders)

Saint-Petersburg

Knorring, V. G., D. Sc. (Tech.), Prof. — (812) 297-60-01

Nizhny Novgorod

Nikulin, S. M., D. Sc. (Tech.), Prof. — (831) 436-78-40

Ekaterinburg

Porshnev, S. V., D. Sc. (Tech.), Prof. — (343) 375-97-79

Novosibirsk

Chuguy, Yu. V., D. Sc. (Tech.) — (383-3) 33-73-60

Krasnoyarsk

Patyukov, V. G., D. Sc. (Tech.), Prof. — (391-2) 912-279

Biysk

Galenko, Yu. A., Dr. Sci. (Tech.) — (3854) 43-25-69

Abanin, V. A., D. Sc. (Tech.) — (3854) 43-25-71

Penza

Shcherbakov, M. A., D. Sc. (Tech.), Prof. —

(841-2) 56-37-08

Ryazan

Kirillov, S. N., D. Sc. (Tech.), Prof. — (491-2) 92-04-55

Ulyanovsk

Yarushina, N. G., D. Sc. (Tech.), Prof. —

(842-2) 43-03-22

Izhevsk

Alekseev, V. A., Dr. D. Sc. (Tech.), Prof. —

(341-2) 21-29-33

Orenburg

Kucherenko, M. G., D. Sc. (Phys.-Math.), Prof. —

(353-2) 77-34-19

Tula

Raspopov, V. Ya., D. Sc. (Tech.), Prof. —

(487-2) 35-19-59

Voronezh

Bityukov, V. K., D. Sc. (Tech.), Prof. — (473-2) 55-36-94

Lipetsk

Kudinov, Yu. I., D. Sc. (Tech.), Prof. —

(4742) 32-80-53

Kursk

Titov, V. S., D. Sc. (Tech.), Prof. — (471-2) 58-71-12

Tambov

Mishchenko, S. V., D. Sc. (Tech.), Prof. —

(475-2) 72-10-19

Astrakhan

Petrova, I. Yu., D. Sc. (Tech.), Prof. — (851-2) 25-73-11

Minsk

Manak, I. S., Ph. D. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. —

(417) 278-13-13

Ufa

Gulin, A. I., D. Sc. (Tech.), Prof. — (347-2) 43-14-70

CONTENT

MODELING, DESIGN AND PRODUCTION OF SENSORS, INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Nizhny Novgorod Regional Editorial Council presents

- Palguev D. A.** Features of building an integrated digital telecommunication network for processing and exchanging radar information in a single information field 4
- Shiryayev A. A., Vorotyntsev V. M., Shobolov E. L.** Method of diagnostics of radiation sensitivity of silicon dioxide layers in CMOS integrated circuits based on analysis of volt-ampere characteristics 11
- Palguev D. A., Fitasov E. S., Ilyasov A. D.** Recognition system for small-sized low-speed air objects based on combined heterogeneous information and incomplete data from spatially spaced sensors 16

* * *

- Arakelyan E. K., Pashchenko F. F., Kosoy A. K.** Optimal distribution of active and reactive loads of thermal power plants and ways of their intellectualization using digital models 23
- Stepanova L. N., Kabanov S. I., Kurbatov A. N., et al.** Ultrasonic system for determination of longitudinal mechanical stresses in rails 31
- Filonov O. M., Bestugin A. R., Kirshina I. A., et al.** Acoustolaser module for the detection of small unmanned aerial vehicles in urban environments 40
- Aristova N. I., Chadeev V. M.** Modeling the process of technological preparation of matrix production 46
- Mestcheryakov A. Yu.** Air quality technologies in human habitats 50

SCIENTIFIC AND TECHNICAL PUBLICISM

- Knorring V. G.** Comparison 58

CHRONICLE

- Baranova Iu. A.** New technologies for non-destructive testing 63

The journal is included into the list of the leading reviewed by Higher Attestation Commission's periodicals, publishing basic results of doctoral and candidate dissertations (2015) and into RSCI based on Web of Science (2015).

Subscription codes: 79363 in the Russian press catalogue; 40874 in the catalogue “The Press of Russia”

EDITORIAL ADDRESS: 65 Profsoyuznaya st., office 383, Moscow, 117997. Tel./fax: (495) 198-17-20 * 11-60
www.datsys.ru. E-mail: datsys@mail.ru

The layout and the electronic version are prepared by LLC “Advanced Solutions”.

Printed by Agency LLC “Advanced Solutions”, www.aov.ru. Order ds123. Signed for press on 28.03.2023.

The journal is reregistered in the Federal service for supervision in the sphere of communication and mass communications 26.12.2013. PI № FS 77-56548. ISSN 1992-7185

The journal is included into the Russian Science Citation Index (RSCI in Web of Science). On the website of the Scientific electronic library (www.elibrary.ru) articles' full-texts are available.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСАХ

ULTRASONIC SYSTEM FOR DETERMINATION OF LONGITUDINAL MECHANICAL STRESSES IN RAILS

1) **Степанова Людмила Николаевна**
д-р техн. наук, профессор, нач. сектора
E-mail: aergroup@ngs.ru, stepanova@stu.ru

1) **Кабанов Сергей Иванович**
канд. техн. наук, вед. научн. сотрудник

2) **Курбатов Александр Николаевич**
ст. преподаватель
E-mail: aergroup@ngs.ru

1) **Ельцов Андрей Егорович**
слесарь КИПиА
E-mail: aergroup@ngs.ru

2) **Чернова Валентина Викторовна**
канд. техн. наук, доцент
E-mail: aergroup@ngs.ru

1) **Сибирский научно-исследовательский институт
авиации имени С. А. Чаплыгина, Новосибирск**

2) **Сибирский государственный университет путей
сообщения, Новосибирск**

Аннотация: Разработанная ультразвуковая (УЗ) система позволяет определять продольные механические напряжения в рельсах, уложенных в путь. С использованием метода акустоупругости, основанного на измерении характеристик упругих волн, проходящих в напряженно-упругой среде, оценивалось время распространения продольных, поперечных и трансформированных УЗ-волн в рельсах. Погрешность измерения времени их прихода не превышала 0,004 мкс. Для проведения измерений на рельс устанавливались два пьезоэлектрических датчика с частотой 2,5 МГц и углом ввода УЗ-волны, равным 18°. Один из них работал в режиме излучения, другой — в режиме приема волны. Третьим был раздельно-совмещенный датчик, устанавливаемый посередине между первым и вторым датчиками. Угол ввода УЗ-волны в этом датчике составлял 0°. Основным измеряемым параметром было время распространения волны от датчика, работающего в режиме излучения, до датчика, работающего в режиме приема. Продольное напряжение в рельсе рассчитывалось через время распространения продольной волны, трансформированной на донной поверхности рельса в поперечную волну, время распространения продольной волны раздельно-совмещенного датчика и акустоупругий коэффициент. Предложен способ, основанный на сравнении времен распространения продольных, поперечных и трансформированных волн, прошедших одинаковый путь в датчике и в контактном слое. В данной системе погрешность определения продольных механических напряжений в рельсах не превышала 10 %, что допустимо для практического применения.

Ключевые слова: диагностика, ультразвук, продольное механическое напряжение, акустоупругость, продольные, поперечные, трансформированные волны.

1) **Stepanova Ludmila N.**
D. Sc. (Tech.), Professor, Head of Department
E-mail: aergroup@ngs.ru, stepanova@stu.ru

1) **Kabanov Sergey I.**
Ph. D. (Tech.), Leading Researcher

2) **Kurbatov Alexander N.**
Senior Lecturer
E-mail: aergroup@ngs.ru

1) **Yeltsov Andrey E.**
Instrumentation Locksmith
E-mail: aergroup@ngs.ru

2) **Chernova Valentina V.**
Ph. D. (Tech.), Associate Professor
E-mail: aergroup@ngs.ru

1) **Siberian Aeronautical Research Institute
named after S. A. Chaplygin, Novosibirsk**

2) **Siberian State Transport University,
Novosibirsk**

Abstract: The developed ultrasonic (US) microprocessor system determines the longitudinal mechanical stresses in the rails laid on the track. Using the method of acoustoelasticity, based on measuring the characteristics of elastic waves passing in a stress-elastic medium, the time of propagation of longitudinal, transverse and transformed ultrasonic waves in rails was estimated. The error in measuring the time of their arrival did not exceed 0.004 μ s. For measurements, two piezoelectric sensors with a frequency of 2.5 MHz and an ultrasonic wave entry angle of 18° were installed on the rail. One of them worked in the radiation mode, the other in the wave reception mode. The third was a separate-combined sensor, installed in the middle between the first and second sensors. The ultrasonic wave entry angle in this sensor was 0°. The main measured parameter was the propagation time of the wave from the sensor operating in the radiation mode to the sensor operating in the receive mode. Longitudinal stress in the rail was calculated through the propagation time of the longitudinal wave transformed on the bottom surface of the rail into a transverse wave, the propagation time of the longitudinal wave of the dual-coupled sensor, and the acoustoelastic coefficient. A method is proposed based on comparing the propagation times of longitudinal, transverse and transformed waves that have passed the same path in the sensor and in the contact layer. In this system, the error in determining the longitudinal mechanical stresses in the rails did not exceed 10 %, which is acceptable for practical use.

Keywords: diagnostics, ultrasound, longitudinal mechanical stresses, acoustoelasticity, longitudinal, transverse, transformed waves.

ВВЕДЕНИЕ

Повышенные циклические нагрузки на оси колесных пар, а также температурное влияние окружающей среды вызывает увеличение напряжений в рельсах, что способствует возникновению и развитию в них различных дефектов. Для обеспечения безопасности движения подвижного состава необходимо иметь информацию о возникающих в рельсах высоких продольных механических напряжениях, т. е. проводить постоянный мониторинг пути. Такой контроль вызван увеличением протяженности бесстыкового пути, повышением грузооборота и допускаемой осевой нагрузкой [1–6].

Как в нашей стране, так и за рубежом разрабатываются различные методы определения продольных механических напряжений в рельсовых плетях (электромагнитно-акустический, тензометрический, лазерный, ультразвуковой (УЗ), акустоупругости) [1–8]. Наиболее распространен акустический метод, в котором надежность выявления дефектов в рельсах связана с погрешностями измерения, вызванными как температурным влиянием, так и шероховатостью и загрязнением их поверхности, качеством контакта пьезоэлектрических датчиков с рельсом и т. д. В объектах с начальными напряжениями измерение времени распространения УЗ-волн позволяет определять механические и прочностные свойства, а также структурное состояние металла с такими характеристиками, как относительное удлинение, предел текучести, твердость [2, 7, 8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Метод акустоупругости применяется как в нашей стране [1–10], так и за рубежом [11–16] и основан на измерении характеристик упругих волн, распространяющихся в напряженно-упругой среде. При этом его эффективность тем выше, чем точнее определяется время распространения УЗ-колебаний. Однако практическое применение данного метода осложняется малым акустоупругим эффектом и регистрацией времен распространения упругих волн, составляющих единицы, десятки наносекунд (нс). В результате этого не всегда удается получить устойчивые результаты контроля.

Определение продольных механических напряжений в железнодорожных рельсах методом акустоупругости основано на их зависимости от

основных параметров упругих УЗ-волн (скорости, амплитуды, частоты). При этом используются различные типы УЗ-волн (продольные, поперечные, трансформированные), основным измеряемым параметром в которых является время распространения сигнала от излучателя до приемника. Штатный контроль продольных механических напряжений рельсов на этапе закрепления рельсовых плетей выполняется косвенным методом по силе предварительного натяжения и в процессе эксплуатации по смещению меток на рельсах относительно опорных шпал.

Если температура рельса становится отличной от температуры его закрепления, то возникают средние механические напряжения, и верхнее строение пути становится неустойчивой механической системой. При определенном сочетании различных внешних факторов возможен выброс рельсов, что представляет большую опасность для грузового и пассажирского транспорта.

Цель работы — анализ основных технических характеристик и принципа построения УЗ-системы, предназначенной для определения продольных механических напряжений в рельсах.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА “АКУСТ-1”

Структурная схема быстродействующей системы “Акуст-1”, подключенной к установленным на отрезке рельса трем пьезоэлектрическим датчикам, приведена на рис. 1 [9, 10]. Она работает на основе метода акустоупругости и используется для определения продольных механических напряжений в рельсах. В известном практическом методе напряжения в рельсах можно рассчитать косвенно через температуру закрепления (T_3) и температуру рельса (T_p) в момент измерения [5, 6]:

$$\sigma_T = \alpha E(T_p - T_3) \approx 2,5(T_p - T_3), \quad (1)$$

где σ_T — напряжение в рельсе от действия растягивающих или сжимающих сил, возникающих при понижении или повышении температуры рельса, МПа; α — коэффициент линейного расширения рельсовой стали, равный $0,0000118 \text{ град}^{-1}$; E — модуль упругости рельсовой стали ($E = 210\,000 \text{ МПа}$).

При работе системы основным измеряемым параметром является время распространения УЗ-сигнала от датчика $BQ1$, работающего в режиме излучения, до датчика $BQ2$, работающего в режиме приема (рис. 2). Были разработаны методы

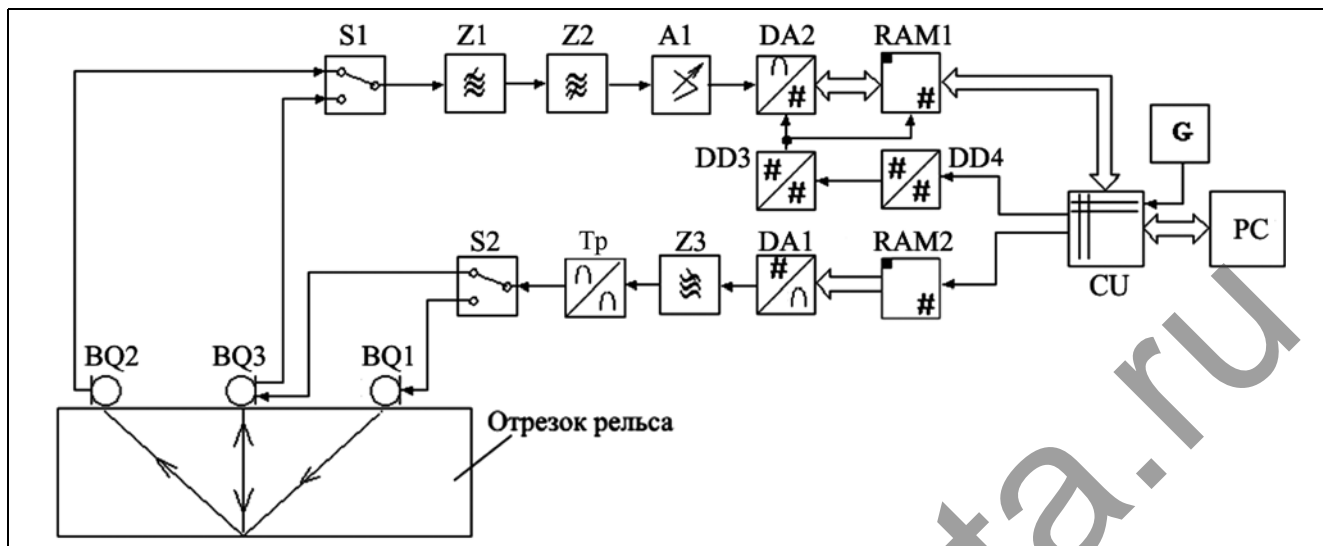


Рис. 1. Структурная схема системы “Акуст-1” для контроля продольных напряжений методом акустоупругости

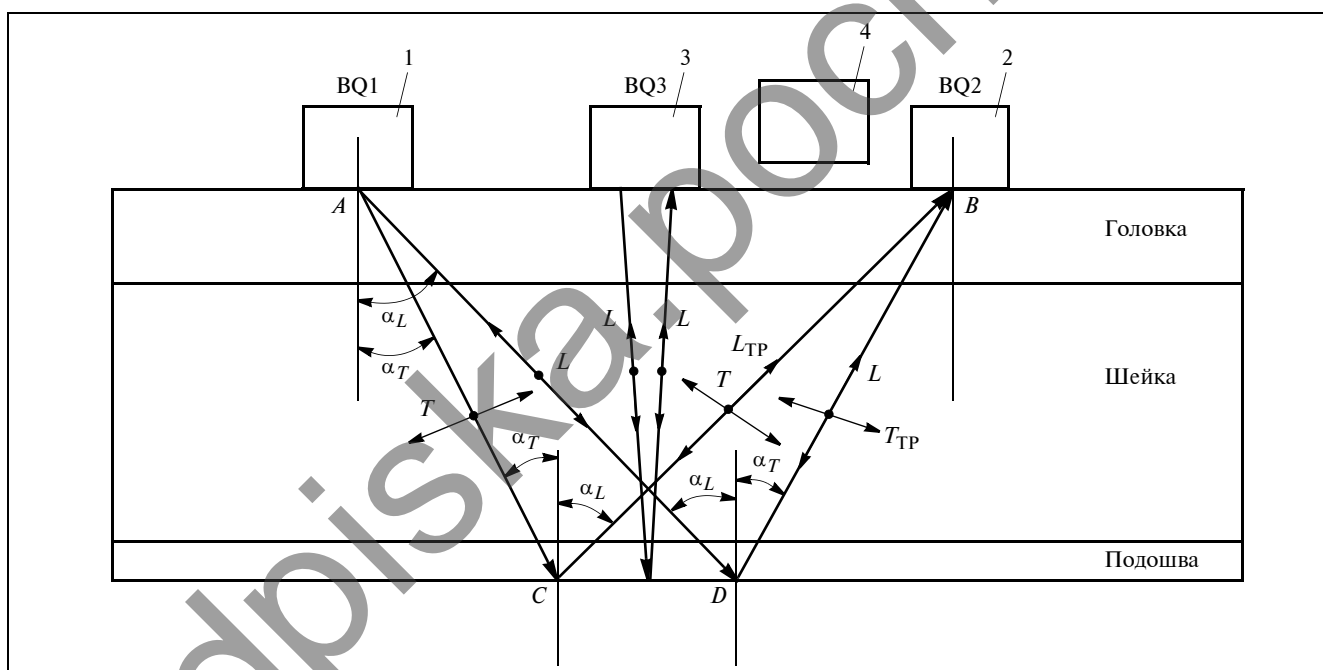


Рис. 2. Схема прозвучивания рельса при определении механических напряжений:

1 — излучающий наклонный датчик BQ1; 2 — приемный наклонный датчик BQ2; 3 — раздельно-совмещенный датчик BQ3; 4 — бесконтактный измеритель температуры

[9, 10], основанные на сравнении времен распространения продольных, поперечных и трансформированных волн, прошедших путь в датчике и в контактом слое. Для уменьшения влияния локальных напряжений рельса вблизи поверхности катания измерялось среднее время распространения упругой волны до донной поверхности.

Для определения механических напряжений на поверхности катания отрезка рельса Р65 дли-

ной 200 мм устанавливались два наклонных пьезоэлектрических датчика BQ1, BQ2 раздельного типа, один из которых является излучателем УЗ-колебаний, а другой — приемником. Излучатель BQ1 и приемник BQ2 устанавливались на поверхность катания головки рельса, их рабочая частота составила 2,5 МГц, угол ввода УЗ-волн равен 18°, расстояние между датчиками равнялось 117 мм. Акустические сигналы от излучателя BQ1 распро-

странялись до подошвы рельса, где отражались, трансформировались (см. рис. 2) и принимались приемником $BQ2$, преобразующим их в электрические сигналы, поступающие на вход УЗ-микропроцессорной системы “Акуст-1” [6, 9].

Датчик $BQ3$ раздельно-совмещенного типа состоял из двух пьезоэлектрических пластин, установленных в одном корпусе, одна из которых работала в режиме приема, а другая — в режиме излучения. Угол ввода УЗ-волны для раздельно-совмещенного датчика $BQ3$ составлял 0° .

Раздельно-совмещенный прямой датчик $BQ3$ возбуждал и регистрировал продольную волну L , распространяющуюся перпендикулярно продольной оси рельса от поверхности катания до подошвы и обратно. Время задержки регистрируемого акустического сигнала τ_{PC}^L , отраженного от подошвы, пропорционально высоте рельса [10].

Система регистрировала временные параметры УЗ-волн разного типа. Поскольку точность определения временной задержки сигналов не должна превышать единиц, десятков нс, то частота их дискретизации была выбрана равной 100 МГц [5, 6, 9].

С помощью реле $P1$ и $P2$ система переключалась либо в режим измерения раздельно-совмещенным датчиком $BQ3$, либо в режим измерения наклонными датчиками излучения $BQ1$ и приема $BQ2$ [9, 10].

После измерения времен распространения УЗ-волн производился выбор оптимальной формы зондирующего сигнала излучающего датчика $BQ1$. Для этого в систему был введен быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь $DA1$ (см. рис. 1). Для повышения отношения сигнал/шум и точности измерения времени распространения продольной волны L и продольной волны, трансформированной в поперечную волну LT , осуществлялся расчет продольного напряжения σ как [5, 6, 9, 10]:

$$\sigma_{\text{акуст}} = \frac{\tau^{LT} - n\tau_{PC}^L}{kn\tau_{PC}^L}, \quad (2)$$

где τ^{LT} — время распространения сигнала продольной волны, трансформированной на донной поверхности подошвы рельса в поперечную волну, при прохождении от излучающего $BQ1$ к приемному $BQ2$ датчику, нс; τ_{PC}^L — время распространения сигнала продольной волны раздельно-

совмещенного датчика $BQ3$, нс; k — акустоупругий коэффициент, МПа^{-1} .

Акустоупругий коэффициент k суммарного времени задержки продольной L и трансформированной LT поперечной волны определялся экспериментально в [5, 6] и составил $k = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}$. Коэффициент n , учитывающий углы ввода продольных и поперечных волн, определялся по формуле [5, 6]:

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\cos \alpha_L} + \frac{1}{0,55 \cos \alpha_T} \right),$$

где α_L, α_T — углы ввода продольных L и поперечных T волн наклонных датчиков $BQ1, BQ2$, град.

Цифровая часть системы выполнена с использованием программируемых микросхем серии Cyclone III с временем задержки на логическом элементе, составляющим до $8 \cdot 10^{-9}$ с. Поэтому частота дискретизации цифро-аналогового преобразователя $DA1$ и аналого-цифрового преобразователя $DA2$ составила 100 МГц, что позволило получить высокое быстродействие разработанной акустической системы и обеспечить возможность регистрации сигналов длительностью более $4 \cdot 10^{-9}$ с.

Ультразвуковой сигнал с приемного датчика $BQ2$ через полосовые фильтры $Z1, Z2$ и программно-управляемый усилитель $A1$ (см. рис. 1) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя $DA2$ и преобразуется в цифровой эквивалент. Перед началом контроля отрезка рельса Р65 проводилась загрузка исходных параметров системы, к которым относятся форма зондирующего сигнала, число отсчетов аналого-цифрового преобразователя $DA2$, времена задержки, необходимые для сдвига сигнала от начала измерения аналого-цифрового преобразователя $DA2$ до момента прихода сигналов, соответствующих продольным L или трансформированным LT волнам. Это позволило оцифровывать временные участки сигналов, сократить объем получаемой информации и повысить быстродействие системы.

В разработанной системе осуществлялась общая синхронизация частотой, формируемой высокостабильным задающим генератором G . При этом оперативное запоминающее устройство $RAM1$ формы принятого сигнала и оперативное запоминающее устройство $RAM2$ формы зондирующего сигнала были реализованы на программируемой микросхеме серии Cyclone III.

При работе системы компьютер по шине USB через устройство управления *CU* записывал в оперативное запоминающее устройство *RAM1* измененную информацию. В счетчик *DD3* записывалось число отсчетов аналого-цифрового преобразователя *DA2*, а в счетчик *DD4* — времена задержки, соответствующие началам записи временных интервалов продольной *L* и трансформированной *LT* волн. Затем компьютер *PC* подавал команду на измерения, по которой оперативное запоминающее устройство *RAM2* начинало выдавать коды на цифро-аналоговый преобразователь *DA1*. При этом электрический сигнал с его выхода поступал через полосовой сглаживающий фильтр *Z3* и высоковольтный трансформатор *Tr* с буферным усилителем на вход излучающего пьезоэлектрического датчика *BQ1*. Фильтр *Z3* обеспечивал подавление шумов дискретизации, а высоковольтный трансформатор *Tr* с буферным усилителем — необходимый уровень амплитуды зондирующего сигнала.

При этом продольные *L*-волны раздельно-совмещенного датчика *BQ3* распространялись в том же объеме рельса, что и продольные, трансформированные на донной поверхности рельса в поперечные *LT* и поперечные, трансформированные в продольные волны *TL*. Следовательно, свойства среды для всех волн, распространяющихся в данном объеме рельса, одинаковы, а изменения свойств среды должно приводить к пропорциональному изменению скоростей УЗ-волн и времени их распространения.

Пройдя через участок рельса, акустические сигналы от датчика излучателя *BQ1* поступали на вход приемного пьезоэлектрического датчика *BQ2*, где преобразовались в электрические сигналы, поступающие на входы фильтров нижних *Z1* и верхних *Z2* частот. Эти фильтры обеспечивали необходимую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) приемного канала и подавление паразитных составляющих сигналов. Затем сигналы поступали на вход программно-управляемого усилителя *A1*, где усиливались до амплитуды, необходимой для измерения аналого-цифровым преобразователем *DA2*.

По истечении времени задержки запускался программируемый счетчик *DD3* числа измерений, разрешающий запись кодов измерений аналого-цифрового преобразователя *DA2* в оперативное запоминающее устройство *RAM1* формы принятого

сигнала. По окончании измерения счетчик *DD3* останавливал запись информации. Затем управляющий компьютер *PC* по шине USB через устройство управления *CU* считывал результаты измерения из оперативного запоминающего устройства *RAM1* принятого сигнала. По результатам измерения он рассчитывал времена распространения акустических продольных *L* и трансформированных *LT* волн с учетом времени задержки.

Ультразвуковая система “Акуст-1” на выходе формирует высоковольтный электрический сигнал, форма и амплитуда которого программно управляются. Этот сигнал подается на вход излучающего датчика *BQ1*. С выхода приемного датчика *BQ2* сигнал поступал на вход системы, где он усиливался и оцифровывался с частотой дискретизации, равной 100 МГц.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ

Определение метрологических характеристик УЗ-системы “Акуст-1” выполнялось в лабораторных условиях при нормальной температуре. К входному разъему УЗ-системы подключался генератор синусоидальных колебаний. Для определения АЧХ на вход системы подавались синусоидальные сигналы с частотой $f = (50 \dots 10\,000)$ кГц. При этом характеристика измерялась для четырех коэффициентов усиления: $K_1 = -10$ дБ; $K_2 = 0$ дБ; $K_3 = 10$ дБ; $K_4 = 20$ дБ. Амплитуда входного сигнала устанавливалась в зависимости от коэффициента усиления и принимала значения $U_{\text{вх1}} = 200$ мВ; $U_{\text{вх2}} = 80$ мВ; $U_{\text{вх3}} = 20$ мВ; $U_{\text{вх4}} = 6$ мВ.

Увеличение частоты входного сигнала до $f = 500$ кГц приводило к повышению амплитуды выходного сигнала. Затем при изменении частоты от 500 до 2000 кГц амплитуда выходного сигнала для каждого коэффициента усиления уменьшалась на $\Delta U_{\text{вых}} = 36$ мВ. При дальнейшем увеличении частоты до $f = 10\,000$ кГц происходило уменьшение амплитуды сигнала на $\Delta U_{\text{вых}} = 650 \dots 750$ мВ. Экспериментально установлено, что стабильная работа УЗ-системы выполнялась в диапазоне частот от 500 до 2000 кГц.

Уровень собственных шумов измерительного канала системы определялся при отключенном генераторе *G*. Оценка шумов выполнялась по среднему квадратическому отклонению (СКО) амплитуды шума. Измерения проводились при коэф-

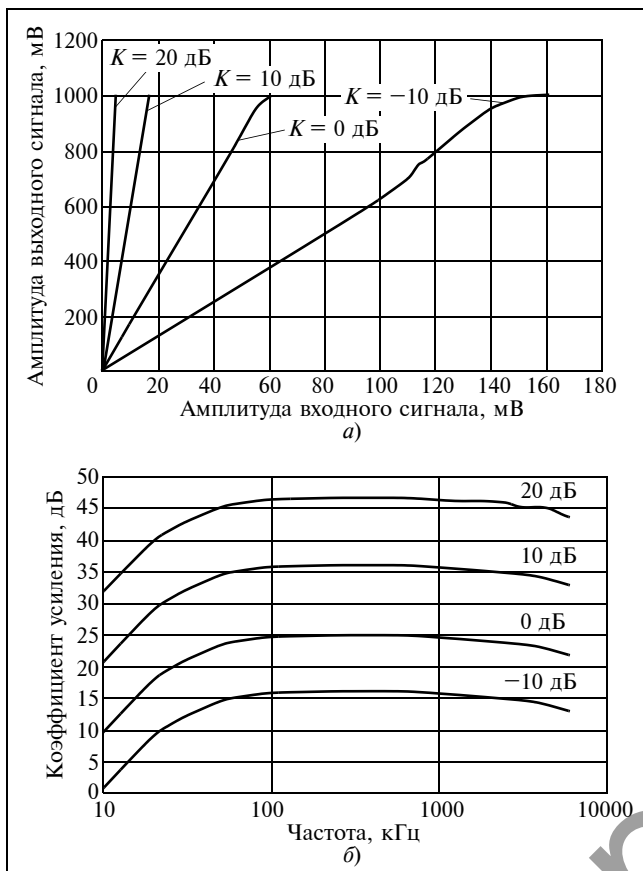


Рис. 3. Зависимость линейности амплитуды выходного сигнала от входного (а) и АЧХ приемных каналов системы при различных коэффициентах усиления программируемого усилителя (б)

коэффициентах усиления $K_1 = -10$ дБ; $K_2 = 0$ дБ; $K_3 = 10$ дБ; $K_4 = 20$ дБ.

В табл. 1 приведена зависимость СКО амплитуды шума и динамического диапазона от коэффициента усиления усилителя А1. Максимальный уровень шума наблюдался при коэффициенте усиления $K_4 = 20$ дБ и составлял 2,85 мВ. Было определено, что с увеличением коэффициента усиления измерительного канала системы ее динамический диапазон уменьшался с 55 до 30 дБ.

В процессе испытаний определялась нелинейность измерительного канала при частоте входного сигнала $f = 2$ МГц и различных коэффициентах усиления. При этом амплитуда входного сигнала изменялась от 0 мВ до значения, при котором измерительный канал переходил в режим насыщения.

Для коэффициентов усиления $K_1 = -10$ дБ и $K_2 = 0$ дБ при амплитудах, близких к предельным, в характеристике, показанной на рис. 3, а, отмечалось появление нелинейности. На рис. 3, б,

приведены АЧХ приемного канала системы при различных коэффициентах усиления.

Для работы с системой было разработано программное обеспечение в среде Lab Windows/CVI v. 9.0, позволяющее производить настройку параметров системы, обработку, воспроизведение и хранение полученных и ранее записанных сигналов. Для оценки технических характеристик системы проведены измерения по схеме, где сигнал с ее выхода проходил на резисторный делитель, у которого отношение сопротивлений составляло 1:20, и далее поступал на ее вход (рис. 4, а). Форма программно задаваемых и принятых системой входных сигналов была выбрана в виде трех периодов синусоиды частотой $f = 1$ МГц (рис. 4, б). При этом осуществлялось измерение характеристик передающей и приемной частей системы, оценка ее временной стабильности и погрешностей измерения временных задержек УЗ-сигналов. Для обеспечения предыстории сигнала была введена постоянная задержка, равная 30 отсчетам аналого-цифрового преобразователя DA2, равная 250 нс.

Одновременно с измерением временных характеристик системы выполнялось измерение температуры окружающей среды. На рис. 5 (см. 3-ю полосу обложки) приведены результаты измерений времени прихода максимума (пика) синусоидального сигнала и температуры от времени. Данные на графиках приведены со сглаживанием при усреднении результатов измерений по 100 отсчетам. В течение времени испытаний дрейф измеренных времен задержки трех пиков синусоидального сигнала и СКО случайной составляющей погрешности измерений не превышали 1 нс.

Измерения частоты проводилось при входном и выходном сигналах системы, соответствующих трем периодам синусоиды при частотах (600...4000) кГц. В табл. 2 приведены результаты

Таблица 1
Основные метрологические характеристики системы "Акуст-1"

Коэффициент усиления K , дБ	СКО амплитуды шума, мВ	Динамический диапазон, дБ	Полоса пропускания, кГц
-10	0,19	55,58	От 240 до 6542
0	0,30	48,99	От 223 до 6455
10	0,83	39,19	От 222 до 6539
20	2,85	29,16	От 202 до 7019

измерения периода синусоидального сигнала, рассчитанного по разности времен максимумов сигналов трех полуволн.

Ультразвуковой сигнал $U(t)$, поступающий с приемного датчика $BQ2$, регистрировался системой “Акуст-1”, после чего он преобразовывался аналого-цифровым преобразователем $DA2$ и представлялся в виде оцифрованной формы сигнала с отсчетами U_i через интервал дискретизации, равный $\Delta t = 10$ нс. За время прихода моды УЗ-волны принималось время достижения максимального значения сигнала (t_{\max}) в определенном интервале времени. При этом необходимо было уточнить значение параметра t_{\max} с точностью до 1 нс, поскольку набор отсчетов U_i обладает погрешностью, связанной с оцифровкой сигналов с интервалом дискретизации $\Delta t = 10$ нс.

Уточненное максимальное значение УЗ-сигнала находилось в интервале времени, не превышающем полупериод измеряемого сигнала. Для решения этой задачи сигнал $U(t)$ в окрестности максимума (максимального отсчета U_i), аппроксимировался полупериодом функции $F(t)$:

$$F(t) = A \cos[\omega(t - \tau)], \quad (3)$$

где A — амплитуда гармонического сигнала; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота аппроксимации сигнала; τ — неизвестный параметр смещения положения максимума сигнала.

Предварительной оценкой параметров аппроксимирующей функции $F(t)$ выбирались выходные данные функции PeakDetector из программной библиотеки среды Lab Windows/CVI v. 9.0 [18]. Результатом расчета является параметр τ из формулы (3), при котором определялась минимальная ошибка как СКО экспериментальных значений

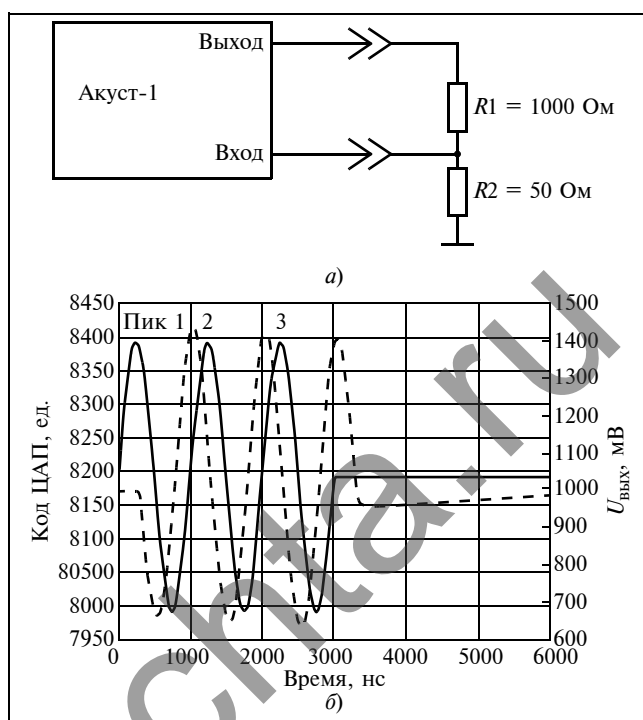


Рис. 4. Схема установки для измерения метрологических характеристик системы (а) и формы входного и выходного сигналов системы (б):

— код ЦАП, ед.; --- $U_{\text{вых}}$, мВ

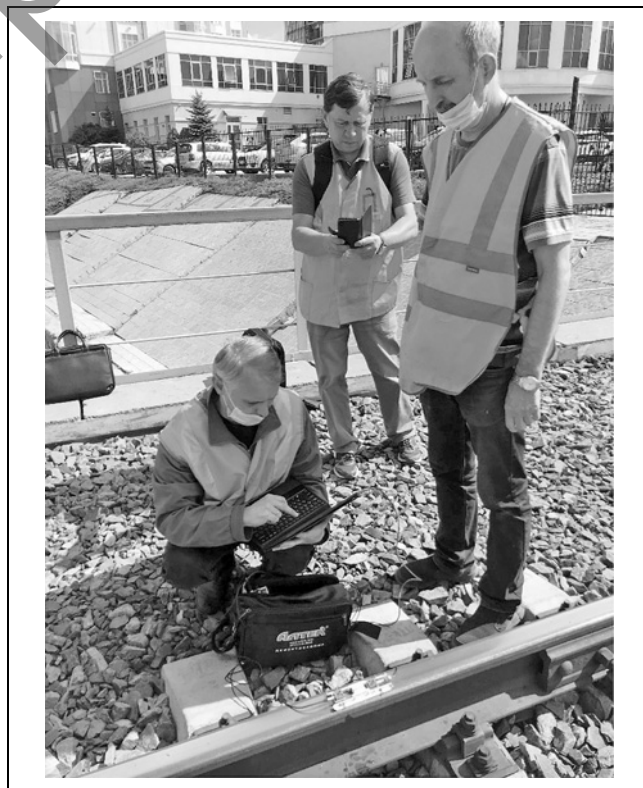


Рис. 7. Проведение испытаний на действующем участке железнодорожного пути Западно-Сибирской железной дороги — филиала ОАО РЖД

Таблица 2
Результаты измерений разностей максимумов полуволн синусоидальных сигналов для разных частот

Частота, кГц	ΔT_{12} , мкс	СКО, нс	ΔT_{23} , мкс	СКО, нс
600	1,668	0	1,669	0
800	1,251	0	1,251	0
1000	1,00075	0,3	1,00015	0,4
1500	0,667	0	0,667	0
2000	0,500	0,3	0,500	0,3
2500	0,400	0	0,400	0
3000	0,333	0	0,333	0
3500	0,285	0	0,287	0
4000	0,250	0	0,251	0

УЗ-сигнала U_j от аппроксимирующей функции $F(t)$. Поэтому время t_{\max} уточнялось на величину параметра τ .

Для расчета времен пиковых значений сигнала было разработано программное обеспечение. Перед расчетом времен задержки в программе производилась предварительная обработка сигнала с использованием полосовой частотной фильтрации и сглаживания полиномом.

При полосовой частотной фильтрации использовались библиотечные функции в среде Lab-Windows CVI v. 9.0 на основе цифрового фильтра Баттерворта 8-го порядка. Для исключения при фильтрации временного сдвига использовался алгоритм двунаправленной фильтрации полосовых фильтров. При этом входная временная последовательность цифровых отсчетов обрабатывалась фильтром, после чего в отфильтрованном сигнале изменялся порядок следования отсчетов на обратный. Полученные инвертированные отсчеты обрабатывались с использованием того же фильтра. Возникающие при фильтрации фазовые сдвиги взаимно компенсировались и формировались сигналы без временной задержки. Однако при этом снижалась амплитуда отфильтрованного сигнала. Пример такой частотной полосовой фильтрации приведен на рис. 5, а, б, где нижняя частота среза была равна 2000 кГц, а верхняя частота среза — 2900 кГц.

Выходной высоковольтный сигнал УЗ-системы, форма и амплитуда которого программно управлялись, подавался на вход излучающего датчика $BQ1$. С выхода приемного датчика $BQ2$ сигнал поступал на вход системы, где усиливался и оцифровывался с частотой дискретизации, равной 100 МГц.

Увеличение частоты входного сигнала до $f = 500$ кГц приводило к повышению амплитуды выходного сигнала. Затем при изменении частоты от 500 до 2000 кГц амплитуда выходного сигнала для каждого коэффициента усиления в среднем уменьшалась на $\Delta U_{\text{вых}} = 36$ мВ. При дальнейшем увеличении частоты до $f = 10\,000$ кГц происходило уменьшение амплитуды на $\Delta U_{\text{вых}} = 650 \dots 750$ мВ. Экспериментально было определено, что стабильная работа системы, когда частота входного сигнала не оказывает влияния на амплитуду, обеспечивалась в диапазоне частот от 500 до 2000 кГц.

Для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения времени пика (рис. 4), в

системе предусмотрены две процедуры сглаживания сигнала полиномом [17], алгоритм которого обеспечивает усреднение полиномом третьей степени. Работа этого алгоритма по определению исходной формы сигнала, показанного на рис. 6, а, сигнала, прошедшего фильтр (рис. 6, б), и спектра (рис. 6, в), позволила уменьшить погрешность измерения временной задержки (см. 3-ю полуобложку).

Для уточнения времени прихода сигнала определялось время, при котором сигнал принимал максимальное значение с дискретностью по времени, равной 1 нс, и с учетом периода дискретизации, равного 10 нс.

Испытания продольных напряжений в рельсах производились на действующем участке железнодорожного пути Западно-Сибирской железной дороги (рис. 7). Напряжения определялись в рельсах правой и левой плетей (рельс Р65, длина каждой плети равна 320 м) с использованием системы «Акуст-1». Измерение температуры рельсов производилось термометром ИТ 5-п/п-ЖД с точностью ± 1 °С [19]. При расчете напряжений σ_T по формуле (1) учитывалась температура закрепления T_3 , которая для правой плети составила 26 °С, а для левой плети 31 °С. Согласно формуле (2) расчет напряжений проводился по результатам измерений времен распространения УЗ-волн в рельсе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирован метод акустоупругости для измерения продольных напряжений в рельсовых плетях. Определено, что для рельсов наиболее подходящей модой для измерения деформаций является трансформированная волна как наименее зависящая от мешающих факторов и имеющая максимальную чувствительность к продольным деформациям.

Рассмотрен принцип построения УЗ-системы, работающей на основе метода акустоупругости и определяющей продольные механические напряжения в рельсах. Эффективность работы системы связана с точностью регистрации времени распространения упругих волн в напряженно-упругой среде. В лабораторных условиях определены погрешности измерения времени прихода упругих волн на пьезоэлектрические датчики.

Анализ результатов обработки информации показал, что общая погрешность составляет 0,004 мкс, т. е. не превышает погрешности измерения системы. Эксперименты на действующем участке пути Западно-Сибирской дороги показали, что относительная погрешность оценки продольных механических напряжений в рельсах не превышает 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобренко В. М., Брандис М. П., Бобров В. Т. и др. Контроль термонапряжений в железнодорожных рельсах методом акустической тензометрии // В мире неразрушающего контроля. — 2018. — Т. 21. — № 3. — С. 73–76. [Bobrenko V. M., Brandis M. P., Bobrov V. T., et al. Thermal stresses testing in railway rails by acoustic tensometry // In the world of non-destructive testing. — 2018. — Vol. 21, № 3. — P. 73–76. (In Russian)]
2. Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Новая технология определения механических напряжений в металлоконструкциях на основе явления акустоупругости // В мире неразрушающего контроля. — 2009. — № 1 (43). — С. 26–28. [Nikitina N. Ye., Smirnov V. A. Stress evaluation in engineering constructions — a new technology based on acoustoelasticity phenomenon // In the world of non-destructive testing. — 2009. — № 1 (43). — P. 26–28. (In Russian)]
3. Муравьев В. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2016. — Т. 82, № 12. — С. 52–57. [Murav'ev V. V., Strizhak V. A., Pryakhin A. V. Acoustoelastic study of the internal stresses in metal structures // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. — 2016. — Т. 82, № 12. — С. 52–57. (In Russian)]
4. Курашкин К. В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале // Акустический журнал. — 2019. — Т. 65, № 3. — С. 382–388. [Kurashkin K. V. Study of the acoustoelastic effect in an anisotropic plastically deformed material // Acoustical Physics. — 2019. — Vol. 65, № 3. — P. 316–321. (In Russian)]
5. Степанова Л. Н., Курбатов А. Н., Тенитилов Е. С. Исследование продольных напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости на действующем участке железнодорожного пути // Контроль. Диагностика. — 2019. — № 2. — С. 14–21. [Stepanova L. N., Kurbatov A. N., Tenitilov E. S. Longitudinal stresses investigation in rail using the acoustoelasticity effect on the acting railway track section // Testing. Diagnostics. — 2019. — № 2. — P. 14–21. (In Russian)]
6. Степанова Л. Н., Курбатов А. Н., Кабанов С. И. и др. Определение напряжения сжатия в рельсе с использованием эффекта акустоупругости и тензометрии // Контроль. Диагностика. — 2021. — Т. 24. — № 7. — С. 14–23. [Stepanova L. N., Kurbatov A. N., Kabanov S. I., et al. Determination of the compressive stress of a rail using the effect of acoustoelasticity and strain gauge // Testing. Diagnostics. — 2021. — Vol. 24, № 7. — P. 14–23. (In Russian)]
7. Степанова Л. Н., Кожемякин В. Л. Ресурсные испытания конструкций с использованием микропроцессорных тензометрических систем // Дефектоскопия. — 2007. — № 7. — С. 85–90. [Stepanova L. N., Kozhemyakin V. L. Lifetime tests of structures with the use of microprocessor strain-gaging systems // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2007. — Vol. 43, № 7. — P. 484–488. (In Russian)]
8. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И. и др. Тензометрия в транспортном машиностроении / Под ред. Л. Н. Степановой, А. Н. Серьезнова. — Новосибирск: Наука, 2014. — 272 с. [Seryeznov A. N., Stepanova L. N., Kabanov S. I., et al. Strain measurement in transporting machine-building / Ed. L. N. Stepanova, A. N. Seryeznov. — Novosibirsk: Nauka, 2014. — 272 p. (In Russian)]
9. Пат. РФ № 2723146 РФ. МПК G 02 N 29/04. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах и устройство для его осуществления / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, С. А. Бехер и др. // Бюл. — 2020. — № 16. — 15 с. [Pat. RF № 2723146, IPC G 02 N 29/04. Ultrasonic method for determination of mechanical stresses in rails and device for its implementation / L. N. Stepanova, S. I. Kabanov, S. A. Becher, et al. // Bul. — 2020. — № 16. — 15 p. (In Russian)]
10. Пат. РФ № 2723148 РФ. МПК G 02 N 29/04. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах / Л. Н. Степанова, А. Н. Курбатов // Бюл. — 2020. — № 16. — 13 с. [Pat. RF № 2723148, IPC G 02 N 29/04 Ultrasonic method for determination of mechanical stresses in rails / L. N. Stepanova, A. N. Kurbatov // Bull. — 2020. — № 16. — 13 p. (In Russian)]
11. Vangi D., Virga A. A practical application of ultrasonic thermal stress monitoring in continuous welded rails // Experimental mechanics. — 2007. — Vol. 47. — P. 617–623.
12. Gokhale S. Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic waves. — College Station: Texas A & M University, 2007. — 112 p.
13. Reale S., Pezzati A., Vangi D., Rizzo L. Thermic tensivity monitoring with ultrasonic technique in the long-welded rails // Ingegneria Ferroviaria. — 2005. — Vol. 60, N 12. — P. 991–998.
14. Gokhale S., Hurlbaeus S. Monitoring of the stress free temperature in rails using the acoustoelastic effect // Review of Quantative Nondestructive Evaluation. — 2008. — Vol. 27. — P. 1368–1373.
15. Jun J., Shim Y.-D., Jhang K.-Y. Stress Estimation Using the Acoustoelastic Effect of Surface Waves in Weak Anisotropic Materials // Appl. Sci. — 2020. — № 10. — P. 169.
16. Castellano A., Fraddosio A., Marzano S. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect // Procedia Engineering. — 2017. — 199. — P. 1519–1526.
17. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Муравьев В. В. и др. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / Под ред. Л. Н. Степановой. — М.: Радио и связь, 2000. — 280 с. [Seryeznov A. N., Stepanova L. N., Murav'ev V. V., et al. Acoustic emission diagnostics of structures / Ed. L. N. Stepanova. — Moscow: Radio and communication, 2000. — 280 p. (In Russian)]
18. URL: www.ni.com — Engineer Ambitiously.
19. Степанова Л. Н., Курбатов А. Н., Бехер С. А. и др. Исследование продольных напряжений в железнодорожных рельсах методом акустоупругости // Деформация и разрушение материалов. — 2023. — № 2. — С. 33–40. [Stepanova L. N., Kurbatov A. N., Beher S. A., et al. Research of longitudinal stresses in railway rails by the method of acoustoelasticity // Deformation and destruction of materials. — 2023. — № 2. — P. 33–40. (In Russian)]

Поступила в редакцию 06.12.2022
После доработки 06.12.2022
Принята к публикации 16.01.2023