
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 620.179.16

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_101

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ ВОЛН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Хлыбов А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0002-6559-7819 e-mail: hlybov_52@mail.ru

Кабалдин Ю.Г.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0003-4300-6659 e-mail: uru.40@mail.ru

Желонкин М.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0003-1036-6906 e-mail: noreas@mail.ru

Аносов М.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0001-8150-9332 e-mail: anosov-maksim@list.ru

Шатагин Д.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0003-1293-4487 e-mail: dmitsanych@gmail.com

Рябов Д.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0002-0486-598X e-mail: ryabovdm1996@gmail.com

Приведено описание и применение автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля акустическим методом для получения физико-механических характеристик металлов. Представлены этапы проектирования и моделирования отдельных функциональных узлов разработанной системы.

Ключевые слова: автоматизированный измерительный комплекс, акустическая структурометрия, измерение физико-механических характеристик, нейросетевое моделирование, неразрушающий контроль, упругие волны.

Для цитирования: Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Желонкин М.В., Аносов М.С., Шатагин Д.А., Рябов Д.А. Разработка автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля для измерения параметров упругих волн в металлических материалах // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 4. С. 101-114. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_101

DEVELOPMENT OF AUTOMATED MEASURING SYSTEM OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL FOR MEASURING PARAMETERS OF ELASTIC WAVES IN METALLIC MATERIALS

Khlybov A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0002-6559-7819 e-mail: hlybov_52@mail.ru

Kabaldin Yu.G.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-4300-6659 e-mail: uru.40@mail.ru

Zhelonkin M.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-1036-6906 e-mail: noreas@mail.ru

Anosov M.S.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0001-8150-9332 e-mail: anosov-maksim@list.ru

Shatagin D.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-1293-4487 e-mail: dmitsanych@gmail.com

Ryabov D.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-0486-598X e-mail: ryabovdm1996@gmail.com

Abstract. The description and application of an automated measuring system for non-destructive testing by the acoustic method for obtaining the physical and mechanical characteristics of metals are presented. The stages of design and modeling of individual functional units of the developed system are given.

Keywords: acoustic structurometry, automated measuring complex, elastic waves, measurement of physical and mechanical characteristics, neural network modeling, non-destructive inspection.

For citation: A.A. Khlybov, Yu.G. Kabaldin, M.V. Zhelonkin, M.S. Anosov, D.A. Shtagin and D.A. Ryabov, "Development of automated measuring system of non-destructive control for measuring parameters of elastic waves in metallic materials", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 101-114, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_101

I. Введение

В зависимости от типа и интенсивности нагрузок в период эксплуатации в металлических материалах деталей возникают микро и макроповреждения. В зависимости от воздействий они могут быть разделены на силовые, температурные, химические и электрохимические [1].

Переменные напряжения приводят к изменению физико-механических характеристик, к зарождению и развитию повреждений в материале образца. Возникает задача предотвращения разрушения для повышения безопасной эксплуатации оборудования.

Решением данной проблемы является своевременный неразрушающий контроль механических характеристик, накопленных повреждений до появления видимых трещин.

Разработка новых методов измерений позволяет использовать различные типы и комбинации акустического контроля. Значительное развитие в области электронных компонентов позволяет повысить эффективность применения акустических методов диагностики за счет применения новых методов генерации и обработки сигналов и автоматизации процесса измерений.

Современный рынок предлагает большое разнообразие приборов и систем для решения различных научно-исследовательских задач в разных отраслях науки. Как правило, такой тип оборудования направлен на решение узкого спектра задач. Функционал встроенного программного обеспе-

чения (ПО) не позволяет решать задачи, которые стоят перед исследователями. Большое количество исследований требуют индивидуального подхода к процессу автоматизации и разработке специализированного ПО.

В связи с этим разработка автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля с использованием современных акустических методов для получения физико-механических характеристик металлов является актуальной задачей в области материаловедения.

Для создания автоматизированной измерительной системы основной метрологической характеристикой в качестве структурно-чувствительного параметра является измерение скорости распространения упругих волн [2-6].

II. Структура и основные этапы проектирования

Стадии разработки конструкторской документации и этапы проектирования автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля (АИС-НРК-3) соответствуют стандарту ГОСТ 2.103-2013 [7]. Стадии разработки АИС-НРК-3 и этапы создания в соответствии с ГОСТ 34.601-90 [8].

Для разработки АИС-НРК-3 применялся подход для проектирования радиоэлектронной аппаратуры I-го уровня с использованием средств автоматизированного проектирования (рис. 1). Проектирование АИС-НРК-3 начиналось с разработки электрической принципиальной схемы, затем проводилось цифроаналоговое моделирование схемы, размещение электронных компонентов на проектируемой печатной плате с последующей трассировкой электрических соединений между выводами размещенных компонентов в соответствии с правилами проектирования, и заключительным этапом проводилась проверка и контроль проектных результатов и выпуск данных на изготовления с выпуском проектной документации.

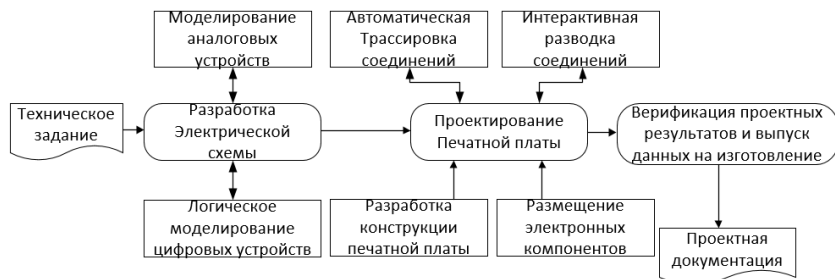


Рис. 1. Этапы проектирования АИС-НРК-3

Fig. 1. Design stages AMS-NDC-3

Для сокращения сроков разработки АИС-НРК-3 ввиду того, что физическое прототипирование связано с большими затратами, была использована система автоматизированного проектирования для имитационного моделирования цифро-аналоговых электротехнических устройств, которая позволяет проводить анализ рабочих режимов и осуществлять оценку параметров схемы без изготовления ее макетных образцов.

Для проведения анализа и расчета по постоянному току, расчета переходных процессов, спектров сигналов, нелинейных цепей во временной области были использованы алгоритмы функционирования схемотехнического моделирования программы *PSPICE* (рис. 2).

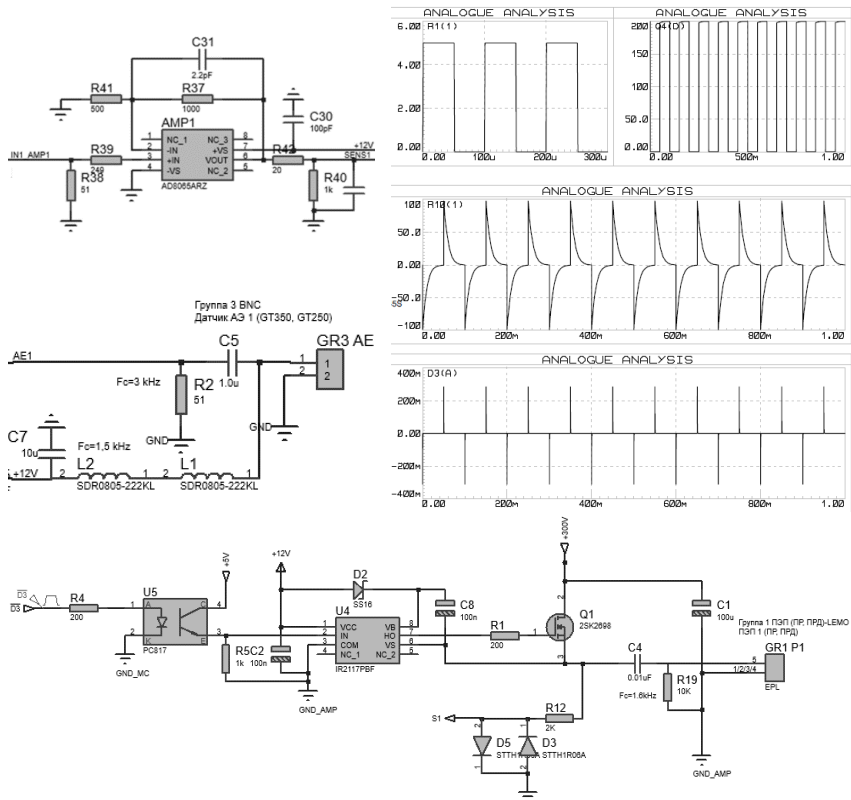


Рис. 2. Фрагмент моделирования усилительных каскадов и операционного усилителя для согласования входных и выходных сигналов
Fig. 2. Fragment of simulation of amplifier stages and an operational amplifier for matching input and output signals

Были получены временные характеристики блоков усилителя сигналов и блоков согласования системы. Моделировались входные сигналы с исполнительного микроконтроллера через усилительных тракт (рис. 2). В процессе моделирования использовались стандартные библиотеки элементов: резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, биполярные транзисторы и полевые транзисторы. Параметры симуляции, в частности: допуск по точности, количество шагов интегрирования, температурные параметры и параметры переходных процессов для некоторых используемых аналоговых интегральных схем были заданы вручную. Для моделирования входных воздействий были использованы источники напряжения и тока необходимой конфигурации.

Для исследования частотно-временных характеристик разработанной системы был получен спектр виртуального акустического сигнала (рис. 3, *а*) и его временная развертка (рис. 3, *б, в*) при возбуждении одиночным импульсом.

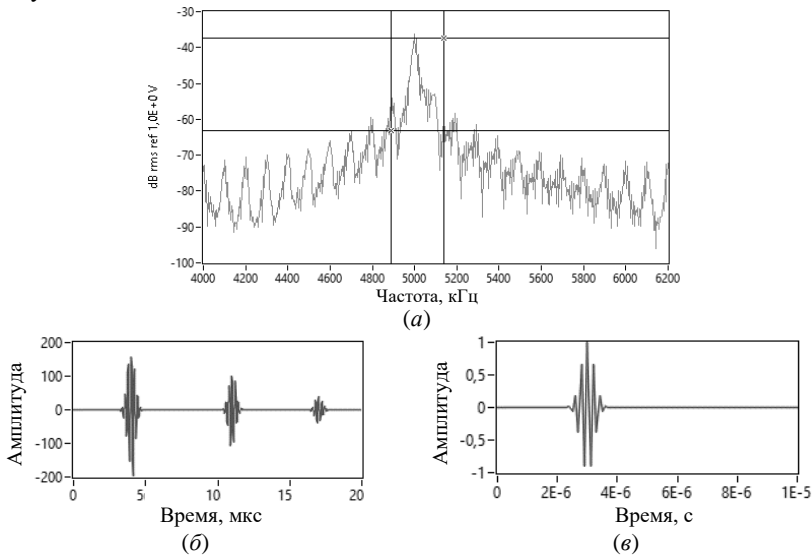


Рис. 3. Временные и частотные зависимости блока генерации: спектр сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) (*а*); временная развертка сигнала, генерируемого ПЭП (*б*); одиночный импульс с блока генерации сигнала (*в*)

Fig. 3. The time and frequency dependences of the generation unit: signal spectrum generated by a piezoelectric transducer (*a*), time base of the signal generated by piezoelectric transducer (*b*), single pulse from the signal generation unit (*c*)

III. Основные характеристики АИС-НРК-3

Методика измерений построена на измерении физико-механических характеристик акустическим методом.

Назначение АИС-НРК-3 состоит в измерении временных интервалов между импульсами упругих волн, распространяющимися в материале исследуемого объекта, и отношения размахов импульсов от генератора импульсов возбуждения (ГИВ) и приемного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП). Основной принцип действия основан на регистрации серии отраженных импульсов упругих волн, возбуждаемых в объекте контроля пьезоэлектрическим преобразователем, и последующей ее обработки программными средствами.

Основные характеристики АИС-НРК-3:

- методы контроля: эхо-, зеркально-теневого (ЗТМ), теневой;
- количество каналов ПЭП: 3 канала для совмещенных ПЭП; 1 канал для раздельного ПЭП;
- количество каналов акустической эмиссии (АЭ): 2 канала для подключения датчиков АЭ;
- входной импеданс: 50 Ом;
- зондирующий импульс: радиоимпульс, амплитудой V_{pp} –130 В..+130 В, с программной регулировкой амплитуды, диапазон регулировки $\pm 95\dots\pm 130$ В, заполнение от 0...100 %, изменяемая частота радиоимпульса (250 Гц – 200 кГц);
- режимы детектирования: автоматический, ждущий, однократный;
- измерение временных интервалов: от 0 до первого сигнала в зоне или между сигналами в зонах, по фронту, по максимуму сигнала или по переходу через "0".

Особенности АИС-НРК-3:

- подключение датчиков ПЭП, АЭ;
- настраиваемый генератор прямоугольных импульсов;
- поддержка беспроводного подключения (беспроводной передачи данных);
- цифровой приемник с широким динамическим диапазоном;
- настраиваемый пользовательский интерфейс;
- различные формы отчетов;
- объем данных для хранения и передачи 1 ТБ;
- скоростной *USB*-порт, *Ethernet* для обмена данными с ПК;
- аналоговый выход: частота дискретизации, макс 100 кГц, диапазон выходного сигнала ± 10 В;
- дополнительные функции: частотомер, спектроанализатор.

На рис. 4 представлена структурная схема работы АИС-НРК-3.



Рис. 4. Структурная схема АИС-НПК-3
Fig. 4. Structural diagram of AMS-NDC-3

Основные компоненты:

- компьютерная платформа, реализующая функции блок управления и обработки данных с графическим интерфейсом пользователя;
- генератор сигналов базе микроконтроллера;
- аналого-цифровой преобразователь на базе системы сбора данных *DAQ*;
- согласующее устройство, реализующее функции усилителя сигналов, предусилителя и калибратора;
- подключаемые датчики ПЭП, АЭ;
- блок входных/выходных интерфейсов для обеспечения подключения проводным/беспроводным сетям.

В качестве первичных преобразователей ПЭП используются стандартные пьезоэлектрические преобразователи, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 55725 - 2013 [9].

Генератор сигналов через усилитель подает высокочастотные импульсы с заданными параметрами частоты, заполнения и амплитуды от блока управления на передающий преобразователь ПЭП, генерируя ультразвуковые колебания. Отраженные от противоположной или внутренней поверхности изделия эхо-сигналы принимаются приемным ПЭП, преобразуются в электрические сигналы и подаются для согласования уровней сигналов на предусилитель приемника. С предусилителя через регулируемый

усилитель электрические сигналы поступают на аналого-цифровой преобразователь с большим динамическим диапазоном, где преобразуются в цифровой код. Цифровой код передается в блок обработки данных.

Блок управления синхронизирует работу генератора сигналов и выбирает часть волн для дальнейшей обработки и отображения. Встроенный калибратор используется для корректировки смещения постоянного уровня, коэффициента усиления, фазы и частотных характеристик аналогового входного блока с помощью цифрового преобразователя. Данная схема калибровки гарантирует отсутствие дрейфа нуля, линейность прибора и высокую степень воспроизводимости, что является основным преимуществом цифровой обработки сигналов перед аналоговым методом. После оцифровки выбранные эхо-сигналы сохраняются в памяти. Они подвергаются дальнейшей обработке цифровыми полосовыми фильтрами для оптимизации отношения сигнал-шум. Обработанные эхо-сигналы затем анализируются ПО для измерения времени/амплитуды, программируемого пользователем, и отображаются на экране.

Функции ПО заключаются в управлении аппаратными компонентами АИС-НРК-3, приеме первичной акустической информации и вычислениях в реальном масштабе времени временных интервалов между импульсами упругих волн, распространяющимися в материале исследуемого объекта, и отношения размахов импульсов.

Уровень защиты ПО – «низкий» в соответствии с Р 50.2.077-2014 [10].

Состав ПО АИС-НРК-3:

- 1) исполняемый пакет, предназначенный для запуска программы, для вызова других рабочих окон и для связи со всеми программными модулями ПО;
- 2) конфигурационный пакет, содержащий параметры настройки аппаратных компонентов, архивирования и хранения первичных данных на внешних носителях информации, файлы с драйверами подключения системы к беспроводным интерфейсам.

IV. Результаты

АИС-НРК-3 (рис. 5) предназначен для решения широкого класса научных и инженерных задач, связанных с исследованием структурных особенностей конструкционных материалов и оценкой физико-механических параметров материалов ответственных деталей и узлов с целью принятия решения о возможности их безопасной эксплуатации. В основу работы системы положен импульсный метод акустической структурометрии. Конструктивно АИС-НРК-3 выполнен в приборном исполнении в металлическом корпусе, внутри которого размещаются платы с радиоэлементами, выполненными в виде этажерочной конструкции. Беспроводное подключение

к системе обеспечивает максимальную мобильность и оперативность получаемых данных, быстрый способ организации научных исследований. Модульный подход к разработке ПО позволяет вносить изменения в отдельные модули, удалять некоторые из них или дополнять систему новыми модулями. В АИС-НРК-3 созданные модули представляют собой функциональные группы, которые объединены в единый программный комплекс как законченный программный продукт конкретного целевого назначения.

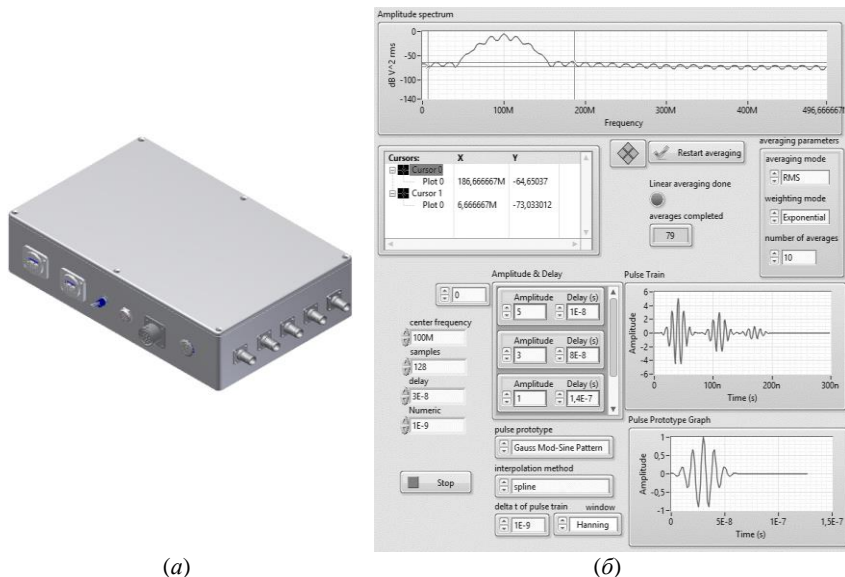


Рис. 5. Автоматизированная измерительная система неразрушающего контроля АИС-НРК-3:

общий вид (а); рабочий экран (б)

Fig. 5. Automated measuring system for non-destructive testing AMS-NDC-3:

general view (a); working screen (b)

Основные технические характеристики АИС-НРК-3 приведены в табл. 1.

В дальнейшем развитии ПО АИС-НРК-3 для определения более точных и расширенных физико-механических характеристик металлических материалов, планируется использование нейросетевых подходов. Ключевым этапом построения нейросетевых моделей является формирование обу-

чающей выборки. В частности, первым этапом предполагается использование полученных в ходе обучающих зависимостей акустических параметров от определяемых физико-механических характеристик. Под обучающими зависимостями понимают комплекс экспериментальных исследований, в ходе которых устанавливают вид функциональных или регрессионных связей акустических параметров с физико-механическими характеристиками материала объекта контроля.

Разработанная нейронная сеть, используемая в АИС-НРК-3, позволит определять следующие характеристики материала:

- объемный модуль упругости K , МПа;
- модуль Юнга E , МПа;
- коэффициент Пуассона ν ;
- предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа;
- предел прочности σ_B , МПа;
- накопленную поврежденность (выраженная через акустический параметр d).

Таблица 1
Основные технические характеристики

Table 1
Main technical characteristics

Напряжение питания, В	12 В ± 0,3
Потребляемая мощность, Вт не более	2
Габаритные размеры, мм, не более:	
– высота	65
– ширина	175
– длина	275
Масса, кг, не более	3
Условия эксплуатации:	
– температура окружающей среды, °С	от 5 до 40
– относительная влажность, %	от 30 до 80
– атмосферное давление, кПа	84 до 106,7
Средняя наработка на отказ, ч, не менее	10 000
Средний срок службы, лет, не менее	5

V. Выводы

При решении некоторых научных задач необходимо рассматривать применение специализированного ПО, функционал которого может быть использован либо уже в существующих приборах, либо в разрабатываемых системах. Разработанная автоматизированная измерительная система АИС-

НРК-3 позволяет обнаружить дефекты задолго до возникновения риска отказа оборудования путем их выявления на ранней стадии и измерения развития с помощью анализа акустических характеристик. Благодаря выявлению опасных дефектов и микродефектов применение разработанной системы на производстве позволит повысить экономическую эффективность путем сокращения издержек на ремонт, а также надежность контролируемых объектов путем обеспечения безопасной эксплуатации технических систем. При разработке системы использовались современные методы неразрушающего контроля, основанные на получении данных физико-механических характеристик путем регистрации акустического сигнала излучений и потоков частиц со структуры материала контролируемого изделия. Разработанная система может использоваться для диагностики выпускаемых и ремонтируемых изделий, а также для оценки их технического состояния в процессе эксплуатации.

Работа выполнена по гранту РФФИ №19-19-00332 «Разработка научно-обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в Арктических условиях».

© Хлыбов А.А., 2021

© Кабалдин Ю.Г., 2021

© Желонкин М.В., 2021

© Аносов М.С., 2021

© Шатагин Д.А., 2021

© Рябов Д.А., 2021

Поступила в редакцию 11.10.2021

Received 11.10.2021

Библиографический список

- [1] Иванников В.В., Николаев А.Г., Шварц В.М., Рябов О.Б., Степанов В.Н. Характерные дефекты и повреждения металлических конструкций // Химическая техника. 2015. № 7. С. 5–12.
- [2] Углов А.Л., Хлыбов А.А., Макаров А.Д., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е. Методика оценки поврежденности аустенитной стали при термоимпульсах акустическим методом // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 4 (111). С. 151–158.
- [3] Углов А.Л. Об одной модели накопления рассеянных повреждений // Прикладная механика. 1991. Т. 27. № 1. С. 77–84.
- [4] Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
- [5] Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. – 280 с.

- [6] Митенков Ф.М. [и др.]. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок. М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
- [7] ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2019.
- [8] ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. Введ. 1992-01-01. М.: Стандартинформ, 2009.
- [9] ГОСТ Р 55725 – 2013. Контроль неразрушающий Преобразователи ультразвуковые пьезоэлектрические. Общие технические требования. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2014.
- [10] Р 50.2.077-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения. Введ. 2014-10-01. М.: Стандартинформ, 2014.

References

- [1] V.V. Ivannikov, A.G. Nikolaev, V.M. Shvarts, O.B. Ryabov and V.N. Stepanov, “Harakternye defekty i povrezhdeniya metallicheskih konstrukcij [Characteristic defects and damage of metal structures]”, *Himicheskaya tekhnika [Chemical Technology]*, no. 7, pp. 5–12, 2015 (in Russian).
- [2] A.L. Uglov, A.A. Khlybov, A.D. Makarov, R.R. Ryazapov and A.E. Sobornov, “Technique of assessing damage austenitic steel because of thermal pulsation by acoustic method”, *Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev*, no. 4, pp. 151–158, 2015.
- [3] A.L. Uglov, “One model of accumulation of scattered damages in structural materials”, *Soviet Applied Mechanics*, vol. 27, no. 1, pp. 77–84, 1991.
- [4] I.A. Volkov and Yu.G. Korotkikh, *Uravneniya sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of state for damaged viscoelastoplastic media]*. Moscow: Fizmatlit, 2008 (in Russian).
- [5] A.L. Uglov, V.I. Erofeev and A.N. Smirnov, *Akusticheskij kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatcii [Acoustic control of equipment during manufacture and operation]*. Moscow: Nauka, 2009 (in Russian).
- [6] F.M. Mitenkov et al., *Metody obosnovaniya resursa yadernyh energeticheskikh ustanovok [Methods for substantiating the resource of nuclear power plants]*. Moscow: Mashinostroenie, 2007 (in Russian).
- [7] Unified system for design documentation Stages of designing, GOST 2.103-2013, July 2015.
- [8] Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Stages of development, GOST 34.601-90, Jan. 1992.
- [9] Non-destructive testing. Piezoelectric ultrasonic transducers. General technical requirements, GOST R 55725 – 2013, July 2015.
- [10] State system for ensuring the uniformity of measurements. Pattern evaluations of a measuring instrument for pattern approval. Software validation for protection assurance, R 50.2.077-2014, Oct. 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хлыбов Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Alexander A. Khlybov, D. Sci. (Eng.), professor, head of the chair of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Кабалдин Юрий Георгиевич, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Yuri G. Kabaldin, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Желонкин Максим Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Maksim V. Zhelonkin, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Аносов Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Maksim S. Anosov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Шатагин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitriy A. Shatagin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Рябов Дмитрий Александрович, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitry A. Ryabov, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.