

Практика применения анализаторов спектра и лазерных триангуляционных датчиков в вузе

Описывается процесс разработки и тестирования лабораторного комплекса спектрального анализа измеренных данных с последующей оценкой по преобразованию Фурье. Показано, что применение комплекса возможно для проведения лабораторных работ студентов разных направлений подготовки для обучения процедурам поверки и калибровки, использованию систем автоматического регулирования и стабилизации производственных процессов и т.д.



Р.М. Хамитов¹

Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент, hamitov@gmail.com

М.Е. Надеждина²

Казанский государственный энергетический университет, frida333@mail.ru

¹ доцент, г. Казань, Республика Татарстан, Россия

² старший преподаватель, г. Казань, Республика Татарстан, Россия

Для цитирования: Хамитов Р.М., Надеждина М.Е. Практика применения анализаторов спектра и лазерных триангуляционных датчиков в вузе // Компетентность / Competency (Russia). — 2021. — № 4. DOI: 10.24412/1993-8780-2021-4-14-19

ключевые слова

лабораторный комплекс, спектральный анализ, лабораторные работы, процедуры поверки и калибровки

одним из важных этапов производственного процесса является контроль качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, состоящий из измерений процессов, в которых устанавливается значение признака, и дальнейшего сравнения результатов измерений с заданными параметрами [1].

В зависимости от специфики контролируемого параметра возможно использование различных методов контроля, в частности спектрального метода, метода неразрушающего контроля, суть которого заключается в определении спектрального состава (то есть распределения мощности по частоте) временного ряда из конечного, совокупности измерений непараметрическими или параметрическими методами [2]. В настоящее время этот метод широко используется в науке и производстве, в частности для оценки качества продукции в пищевой промышленности при обнаружении химических, биологических и физических опасностей [3], фармацевтических препаратов [4], нефтеперерабатывающей промышленности [5] и ряде других областей. Причина высокой популярности спектрального метода заключается в высокой наглядности результатов измерений (могут быть представлены в виде графика). Легко обнаружить частоты, значение которых отличается от стандартных значений, а также быстро выявить и устранить неисправность процесса.

Методы исследования

Спектральный анализ — это метод обработки сигналов, основанный на оценке частоты и амплитуды сигнала. Существуют различные методы оценки спектра колебаний, од-

ним из них является метод с использованием быстрого преобразования Фурье, который, в свою очередь, основан на представлении исходной функции сигнала от времени в виде суммы бесконечного ряда тригонометрических функций с определенными амплитудами и фазами [6]. Ряд Фурье можно представить в виде:

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_n e^{i2\pi \frac{k}{T} x}, \quad (1)$$

где $f(x)$ — функция анализируемого сигнала;

k — номер тригонометрической функции;

T — сегмент, на котором определена функция;

X_n — комплексная амплитуда сигнала n .

Графически ряд Фурье представляется в виде спектра Фурье, по которому можно проследить зависимость амплитуды сигнала от частоты [7].

Метод обработки сигналов путем их представления в виде спектра Фурье лежит в основе работы современных анализаторов спектра — устройств, предназначенных для наблюдения и измерения относительного распределения энергии электрических (электромагнитных) колебаний в полосе частот [8]. Анализатор спектра позволяет определять частоту и амплитуду анализируемого сигнала. В целом механизм его работы можно описать следующим образом: на вход анализатора поступает цифровой сигнал. Анализатор выбирает из сигнала последовательные интервалы, на которых будет вычисляться спектр, и преобразует полученный сигнал с помощью преобразования Фурье [9].

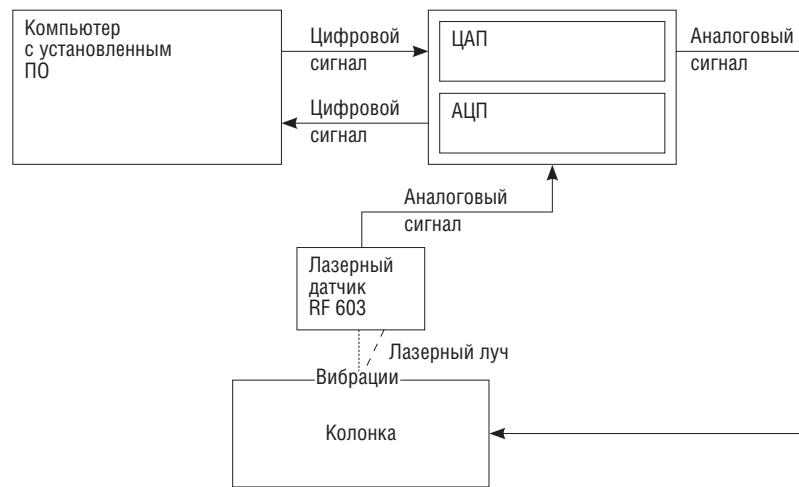
Рассчитанный спектр отображается в виде графика зависимости амплитуды от частоты. Анализаторы спектра позволяют измерять частоту сигнала, его амплитуду, мощность, модуляцию, искажения и шум; их использование дает полное представление о природе сигнала и его характеристиках, знание которых важно для решения задач, стоящих перед современной наукой и техникой [10, 11].

Современные анализаторы спектра, помимо преобразования аналогового сигнала, считанного с различных датчиков, для последующей обработки, могут выполнять обратное преобразование выходного цифрового сигнала, аналоговый сигнал для его последующей передачи на аналоговые электронные устройства. Наличие подобного функционала позволяет использовать анализаторы спектра не только как средство измерения, но и как средство моделирования сигналов с различной целью.

Описание установки

В работе [12] был представлен лабораторный комплекс, позволяющий проводить спектральный анализ данных об измерениях различных параметров объектов контроля. В состав комплекса входят компьютер с установленным специализированным программным обеспечением, анализатор спектра ZET 017-U4, виброгенератор в виде акустического динамика 10ГДШ-1-4 и лазерный датчик перемещения RF 603. Также возможно дополнительно подключить различные датчики, например датчики перемещения или датчики силы, к одному из четырех аналого-цифровых входов анализатора спектра ZET 017-U4. Базовая схема установки представлена на рис. 1.

Используемый анализатор спектра состоит из двух модулей, таких как аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). АЦП преобразует аналоговый сигнал с датчиков в цифровой, а ЦАП преобразует моделируемый цифровой сигнал и подает его на ана-



логовый выход. Неопределенность измерений, выполненных с помощью анализатора, лучше всего описывается распределением Гаусса, что указывает на возможность использования анализатора для измерений с высокой точностью. Все настройки анализатора производятся на компьютере, входящем в состав лабораторного комплекса, перед началом работы в специализированном программном продукте, в котором в дальнейшем обрабатываются данные и анализируется сигнал с определением его параметров.

Рассмотрим алгоритм лабораторного комплекса генерации и спектрального анализа измерительной информации:

- 1) команда управления отправляется генератору с компьютера через программное обеспечение через интерфейс USB для генерации сигнала определенной формы с помощью анализатора спектра;
- 2) анализатор спектра с аналогового выхода передает сигнал на акустический динамик, который преобразует его в форму колебаний, звуков или шума;
- 3) лазерный датчик движения считывает колебания с колонки и передает их на один из четырех аналоговых входов анализатора спектра;
- 4) принятый сигнал преобразуется АЦП и подается на компьютер в программе, которая выдает отчет в виде измеренного сигнала.

Рис. 1. Схема лабораторного комплекса [Laboratory complex diagram]

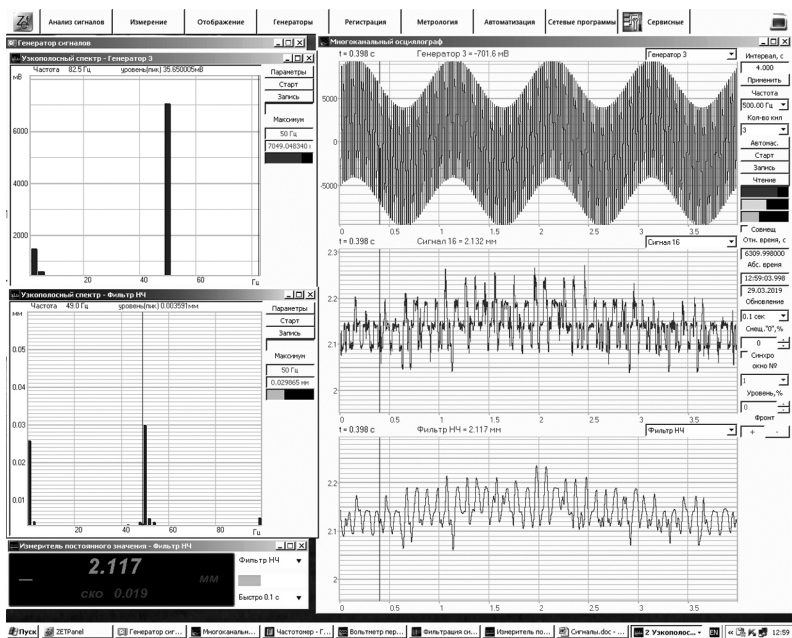


Рис. 2. Регистрация сигнала для двух гармонических составляющих [Signal registration for two harmonic components]

Программное обеспечение лабораторного комплекса позволяет формировать на выходе ЦАП различные формы колебаний, воспроизводить ранее записанные сигналы от реальных датчиков, а также добавлять в генериру-

емый сигнал различные виды шумов: плоский, полосовой, розовый и выраженный. Что позволяет проводить лабораторные работы с использованием комплекса как на реальных воздействиях, так и на виртуальных, весьма схожих с реальными воздействиями, которым подвергается образец в процессе эксплуатации.

Для проверки работоспособности комплекса была проведена серия тестов по формированию на выходе установки сигналов различной частоты и амплитуды для приема на входе отфильтрованного сигнала с такими же параметрами. Часть тестов проводилась путем генерации гармонического сигнала одной амплитуды — 7 В, но разных частот в диапазоне от 1 до 200 Гц; в других экспериментах генерировался сложный гармонический сигнал из двух сигналов (рис. 2) разных амплитуд — 2 В и 5 В и разных частот от 1 до 200 Гц. Заданные частоты и напряжения сигналов, а также выходные параметры сигналов приведены в таблице. Уровень шума во всех экспериментах составлял не более 0,0012 мм.

В первой серии экспериментов на анализатор спектра подавался сигнал с постоянным напряжением 7 В и частотами 1, 10, 50, 100 и 200 Гц соответственно. На выходе в первых трех экспериментах был получен сигнал с частотой, аналогичной частоте подаваемого сигнала (2 Гц, 9,8 Гц, 51 Гц), однако на частотах, превышающих 50 Гц, шумовая составляющая сигнала не позволяет определить полезный сигнал, считываемый датчиком.

При превышении частоты значения сигнальной метки на 50 Гц шум не позволял проводить точные измерения. По результатам экспериментов можно сделать вывод, что лабораторный комплекс целесообразно использовать для испытаний, проводимых на низких частотах. Для исследования высокочастотных сигналов необходима доработка генератора колебаний с целью получения более высокой амплитуды сигнала и исключения влияния шумовой составляющей. В этих условиях

Таблица
Результаты экспериментов [Experimental results]

Частота первой гармоники, Гц [1st harmonic frequency, Hz]	Напряжение первой гармоники, В [1st harmonic voltage, V]	Частота второй гармоники, Гц [2nd harmonic frequency, Hz]	Напряжение второй гармоники, В [2nd harmonic voltage, V]	Частота 1 гармоники с датчика RF 603, Гц [1st harmonic frequency from RF 603 sensor, Hz]	Амплитуда 1 гармоники с датчика RF 603, мм [1st harmonic amplitude from RF 603 sensor, mm]	Частота 2 гармоники с датчика RF 603, Гц [2nd harmonic frequency from RF 603 sensor, Hz]	Амплитуда 2 гармоники с датчика RF 603, мм [2nd harmonic amplitude from RF 603 sensor, mm]	Уровень шума, мм [Noise level, mm]
1	7	—	—	2	0,210	—	—	0,0011
10	7	—	—	9,8	0,240	—	—	0,0012
50	7	—	—	51	0,250	—	—	0,0012
100	7	—	—	—	0,001	—	—	0,001
200	7	—	—	—	0,001	—	—	0,009
1	2	10	—	1,95	0,024	10,05	0,032	0,0012
1	2	50	5	2,05	0,025	49,15	0,030	0,0010
10	2	10	5	10,1	0,024	9,94	0,031	0,0011
10	2	50	5	10,2	0,025	50,5	0,029	0,0012
10	2	100	5	—	0,0011	—	0,001	0,0011
10	2	100	5	—	0,0011	—	0,001	0,0010

установка позволит проводить необходимые измерения и анализировать результат с помощью различных программных режимов.

Результаты и их анализ

Область применения этого комплекса достаточно широка, поскольку в его основе лежит спектральный метод, который широко используется в различных областях современной науки и техники. Таким образом, компоновка лабораторного комплекса различных модификаций позволяет использовать его для обнаружения дефектов различными методами неразрушающего контроля: поверхностные дефекты, различные ударные и вибрационные воздействия, накопления данных для машинного обучения с целью классификации дефектов [13]. Кроме того, возможно использование лабораторного комплекса для контроля местоположения различных объектов и скорости их движения, а также для измерения значений как угловых, так и линейных скоростей, и величин перемещений в пространстве исследуемого объекта.

Разработанный лабораторный комплекс может быть использован в машиностроении при анализе вибрации при динамических испытаниях машин и различных механизмов. Во время этой операции датчик силы подключается к анализатору спектра через усилитель заряда и с его помощью измеряются колебания, исходящие от движущихся частей машин и механизмов.

Целесообразно включать рассматриваемый лабораторный комплекс в оборудование при проведении различных научных исследований свойств веществ и материалов, например при оценке качества пищевых продуктов [8].

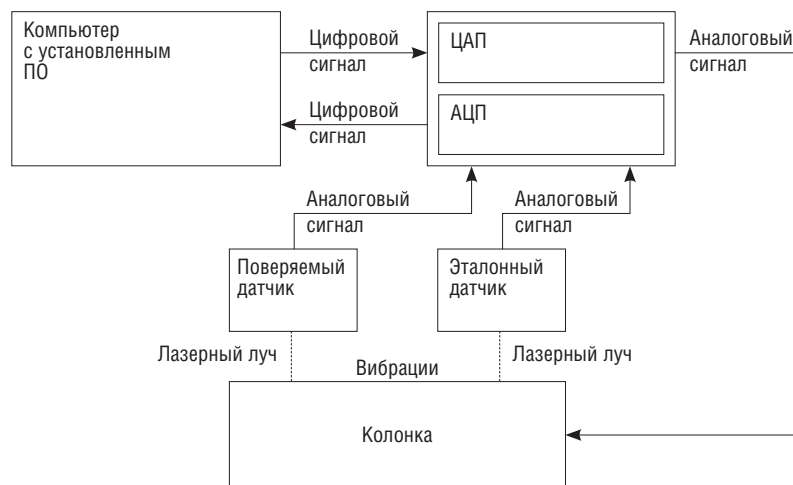
Еще одно направление, в котором рекомендуется использовать данный комплекс, — проверка и калибровка датчиков вибрации путем сравнения проверяемого устройства с эталонным. Для выполнения этой операции проверяемые датчики подключаются к анализатору спектра, установленному

на виброгенераторе. Схема установки для поверки датчика показана на рис. 3. На компьютере задаются параметры вибрации, которые воспроизводятся динамиком, система запускается в работу и устройство автоматически калибруется. АЦП принимает сигналы от эталонных и проверяемых устройств, передает данные на компьютер, в программное обеспечение, где происходит сравнение показаний устройств, определение амплитудной характеристики, снятие амплитудно-частотной характеристики калибруемого датчика.

По результатам измерений и сравнения показаний приборов составляется протокол, содержащий информацию о пригодности проверяемого датчика. Поскольку процедура проверки проводится в автоматическом режиме с высокой точностью измерений, на ее результаты не влияют ошибки, вызванные работой сотрудника, выполняющего проверку.

Представленный лабораторный комплекс может быть использован не только при контрольных измерениях, но и при создании автоматического регулирования и стабилизации производственных процессов. При этом лабораторный комплекс включает в себя пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор обратной связи. ПИД-регулирование осуществляется путем подачи на объект управления управляющего сигнала,

Рис. 3. Схема установки для проведения поверки датчиков [Installation diagram for sensor verification]



значение которого зависит от разницы между измеряемым параметром и заданным значением, от интеграла разности и от скорости изменения параметров. В результате ПИД-регулятор передает сигнал, обеспечивающий такое состояние устройства, при котором измеряемый параметр равен заданному, стабилен и поддерживается в течение процесса на требуемом уровне с достаточно высокой точностью. За счет стабильности производственного процесса повышается качество продукции, эффективность процессов и показатели

результативности, что важно в условиях современной рыночной экономики и постоянной конкуренции. Управляющий сигнал для ПИД-регулятора определяется тремя составляющими: пропорциональной, интегральной и дифференциальной, и зависит от того, насколько велико рассогласование (пропорциональная составляющая), как долго сохраняется рассогласование (интегральная составляющая) и, наконец, как быстро рассогласование (дифференциальная составляющая) изменяется. Регулятор может удерживать заданный уровень или работать по заданному профилю. Дополнительно программный продукт комплекса способен графически отображать заданный уровень, текущее значение параметра и выходной сигнал.

*Статья поступила
в редакцию 5.03.2021*

Список литературы

1. Kulz M. Mechanical engineers handbook: design, instrumentation, and controls, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
2. Stoica P., Moses R. Spectral Analysis of Signals, New Jersey: Prentice Hall, 2005.
3. Fu X., Ying Y. Food safety evaluation based on near infrared spectroscopy and imaging: a review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, no. 56.
4. Roggo Y., Chalus P., Maurer L., Lema-Martinez C., Edmond A., Jent N. A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical technologies, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2007, no. 44.
5. Xu S., Zhao Y., Wang M., Shi X. Comparison of multivariate methods for estimating selected soil properties from intact soil cores of paddy fields byViseNIR spectroscopy, *Geoderma*, 2018, no. 310.
6. Doobae J., Changmo A., Jinsu K., Gwangil K. Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications, New York: Academic Press, 2019.
7. Carr J. Practical Radio Frequency Test and Measurement: Technician's Handbook, New York: Elsevier, 2002.
8. Cheng M., Pei X., Li M., Zhang Q., Zhang M. Spectrum analyzer development for oxidation diagnosis of Potato semi-finished products, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, no. 49.
9. Turon V., Janik J., Spetik R., Sovka P., Vlcek M. Study of ADZT properties for spectral analysis. European Conference on Circuit Theory and Design, Wisconsin, USA, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2011.
10. Franček P., Petošić A., Budimir M., Hrabar I. Electrical resonance/antiresonance characterization of NDT transducer and possible optimization of impulse excitation signals width and their types, *NDT & E International*, 2019, no. 106.
11. Chen J., Wu Y., Yang C. Damage assessment of concrete using a non-contact nonlinear wave modulation technique, *NDT & E International*, 2019, no. 106.
12. Хамитов Р.М., Кольчурина М.А., Кольчурина И.Ю. Разработка лабораторного комплекса для проведения спектрального анализа / Информационные технологии (ИТ) в контроле, управлении качеством и безопасности: сб. науч. трудов VIII Межд. конф. школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее. — Томск: ТПУ, 2019.
13. Исмагилов И.Р., Алексеев И.П. Применение технологий машинного обучения для классификации дефектов при лазерно-акустическом контроле металлических изделий. В сборнике: Тинчуринские чтения-2020. Энергетика и цифровая трансформация. Международная молодежная научная конференция. — Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020.
14. Акимова А.А., Вечканова Э.И., Князева А.Н., Никонова Е.И., Пронина Ю.В. Разработка комплекса для проведения входного контроля металлопроката (в условиях ОАО «ТРАНСМАШ», г. Энгельс) / Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: под общей ред. проф. М.В. Темлянцева, 2020.

Выводы

В ходе исследований была разработана и внедрена лабораторная установка для спектрального анализа измерительных данных различных материалов с достаточно широким спектром применения. В частности, можно использовать установку для проведения лабораторных работ при изучении дисциплин, связанных с неразрушающим контролем на производстве, для обнаружения различных дефектов материалов: повреждений строительных конструкций, дефектов поверхности, входного контроля металлопроката [14]. Комплекс может помочь в анализе вибрации при динамических испытаниях машин и различных механизмов, при научных исследованиях свойств веществ и материалов, а также в обучении сотрудников, деятельность которых напрямую связана с измерениями и анализом их результатов. Описанный в работе лабораторный комплекс можно использовать и как учебно-лабораторную единицу для проведения практических занятий студентов по направлениям «Стандартизация и метрология» и «Менеджмент качества», а также при обучении и повышении квалификации специалистов в различных отраслях. ■

The Using Practice of Spectrum Analyzers and Laser Triangulation Sensors in the University

R.M. Khamitov¹, Kazan State Power Engineering University, Assoc. Prof. PhD, hamitov@gmail.com

M.E. Nadezhdina², Kazan State Power Engineering University, frida333@mail.ru

¹ Associate Professor, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

² Senior Lecturer, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

Citation: Khamitov R.M., Nadezhdina M.E. The Using Practice of Spectrum Analyzers and Laser Triangulation Sensors in the University, *Kompetentnost' / Competency (Russia)*, 2021, no. 4, pp. 14–19. DOI: 10.24412/1993-8780-2021-4-14-19

key words

laboratory complex, spectral analysis, laboratory work, verification and calibration procedures

We described the process of developing and testing a laboratory complex for spectral analysis of measured data. It is based on a signal processing method based on the measurement of the frequency and amplitude of the signal (spectral method) with subsequent evaluation by the Fourier transform. The described laboratory complex consists of a personal computer, software, a spectrum analyzer, analog-to-digital converters, a vibration-acoustic generator and laser sensors.

We justified the relevance of the development in connection with the fairly wide use of spectral analysis methods in science, technology and production. The advantages of using a laboratory complex are shown. We also described the experiments carried out on the generation, measurement and processing of signals for modeling measurement information from various non-destructive testing sensors, such as laser, strain gauge, ultrasonic, vibration, etc.

We believe that the use of this complex is possible for conducting laboratory work of students of different fields of training in order to teach the procedures of verification and calibration, the use of automatic control systems and stabilization of production processes, etc.

References

1. Kulz M. Mechanical engineers handbook: design, instrumentation, and controls, New Jersey, *John Wiley & Sons, Inc.*, 2014.
2. Stoica P., Moses R. Spectral Analysis of Signals, New Jersey, *Prentice Hall*, 2005.
3. Fu X., Ying Y. Food safety evaluation based on near infrared spectroscopy and imaging: a review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, no. 56, pp. 1913–1924.
4. Roggo Y., Chalus P., Maurer L., Lema-Martinez C., Edmond A., Jent N. A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical technologies, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2007, no. 44, pp. 683–700.
5. Xu S., Zhao Y., Wang M., Shi X. Comparison of multivariate methods for estimating selected soil properties from intact soil cores of paddy fields byViseNIR spectroscopy, *Geoderma*, 2018, no. 310, pp. 29–43.
6. Doobae J., Changmo A., Jinsu K., Gwangil K. Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications, New York, *Academic Press*, 2019.
7. Carr J. Practical Radio Frequency Test and Measurement: Technician's Handbook, New York, *Elsiver*, 2002.
8. Cheng M., Pei X., Li M., Zhang Q., Zhang M. Spectrum analyzer development for oxidation diagnosis of Potato semi-finished products, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, no. 49, pp. 320–323.
9. Turon V., Janik J., Spetik R., Sovka P., Vicek M. Study of ADZT properties for spectral analysis. *European Conference on Circuit Theory and Design*, Wisconsin, USA, *World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*, 2011, pp. 171–176.
10. Franček P., Petošić A., Budimir M., Hrabar I. Electrical resonance/antiresonance characterization of NDT transducer and possible optimization of impulse excitation signals width and their types, *NDT & E International*, 2019, no. 106, pp. 29–41.
11. Chen J., Wu Y., Yang C. Damage assessment of concrete using a non-contact nonlinear wave modulation technique, *NDT & E International*, 2019, no. 106, pp. 1–9.
12. Khamitov R.M., Kol'churina M.A., Kol'churina I.Yu. Development of a laboratory complex for conducting spectral analysis in the collection of information technologies in control, quality management and safety: *sc. papers VIII Int. conf. of pupils, students, postgraduates, young scientists Resource-efficient systems in management and control: a look into the future*, 2019, pp. 322–325.
13. Ismagilov I.R., Alekseev I.P. Application of machine learning technologies for the classification of defects in laser-acoustic control of metal products. *In coll.: Tinchurin readings-2020. Energy and digital transformation*, Kazan, *Kazan State Power Engineering University*, 2020, in 3 vol., pp. 53–55.
14. Akimova A.A., Vechkanova E.I., Knyazeva A.N., Nikonova E.I., Pronina Yu.V. Development of a complex for conducting entrance control of rolled metal (in the conditions of JSC TRANSMASH, Engels). *In coll.: Science and youth: problems, searches, solutions (general ed. prof. M.V. Temlyantsev), All-Russian sc. conf. of students, postgraduates and young scientists*, 2020, pp. 49–53.