

## ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 24. Выпуск 3.

УДК 539.21:621.785

DOI 10.22405/2226-8383-2023-24-3-333-340

**Цифро-аналоговое преобразование кусочно-линейных и периодических функций волновой деформации в металлах<sup>1</sup>**

А. Н. Чуканов, Н. Н. Добровольский, А. Н. Сергеев, Ю. А. Басалов, Е. В. Цой, А. Н. Матвеева

**Чуканов Александр Николаевич** — доктор технических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: alexchukanov@yandex.ru*

**Добровольский Николай Николаевич** — кандидат физико-математических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: nikolai.dobrovolsky@gmail.com*

**Сергеев Александр Николаевич** — доктор педагогических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: ansergueev@gmail.com*

**Басалов Юрий Александрович** — кандидат физико-математических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: basalov\_yurij@mail.ru*

**Цой Евгений Владимирович** — аспирант, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого

*e-mail: tsojev@tspu.ru*

**Матвеева Анна Владимировна** — учитель физики, ЧОУ Лицей при ТГПУ им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: anngm@mail.ru*

**Аннотация**

В данной статье описана методика анализа спектров локализованной деформации (ЛД) изделий, полученных по аддитивной технологии (SLM). Использовали технологию цифро-аналогового преобразования (ЦАП). Для изучения характеристик периодических (от места фиксации ЛД на расчётной длине образца) и кусочно-линейных (от времени нагружения) зависимостей описана методика разложения функции локальных деформаций в конечный ряд Фурье.

**Ключевые слова:** Порошковая сталь 316L, SLM-технология, образец, растяжение, относительное удлинение, волновой спектр, цифро-аналоговое преобразование, Фурье-интерполяция.

**Библиография:** 11 названий.

**Для цитирования:**

А. Н. Чуканов, Н. Н. Добровольский, А. Н. Сергеев, Ю. А. Басалов, Е. В. Цой, А. Н. Матвеева. Цифро-аналоговое преобразование функций волновой деформации в металлах // Чебышевский сборник, 2023, т. 24, вып. 3, с. 333–340.

<sup>1</sup>Представленные в данной статье исследования выполнены при финансовой поддержке гранта администрации Тульской области 2022 г.: "Исследование механизма волнового характера деформации и его связи с ортотропией физико-механических свойств изделий селективного лазерного сплавления"(договор ДС/126)

## CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 24. No. 3.

UDC 539.21:621.785

DOI 10.22405/2226-8383-2023-24-3-333-340

**Digital-to-analogue conversion of piecewise-linear and periodic functions of wave deformation in metals**<sup>2</sup>

A. N. Chukanov, N. N. Dobrovolsky, A. N. Sergeev, Yu. A. Basalov, E. V. Tsoi, A. N. Matveeva

**Chukanov Alexander Nikolaevich** — doctor of technical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: alexchukanov@yandex.ru*

**Dobrovolsky Nikolay Nikolaevich** — candidate of physical and mathematical sciences, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: nikolai.dobrovolsky@gmail.com*

**Sergeev Alexander Nikolaevich** — doctor of pedagogical sciences, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: ansergueev@gmail.com*

**Basalov Yuri Alexandrovich** — candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: basalov\_yurij@mail.ru*

**Tsoi Evgeny Vladimirovich** — postgraduate student, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: tsoyev@tspu.ru*

**Matveeva Anna Vladimirovna** — physics teacher, CHOU Lyceum of TSPU (Tula).

*e-mail: annngm@mail.ru*

**Abstract**

This article describes a technique for analyzing the spectra of localized deformation (LD) of products obtained by additive technology (SLM). We used digital-to-analog conversion (DAC) technology. To study the characteristics of periodic (from the place of fixation of the LD on the estimated length of the sample) and piecewise linear (from the loading time) dependences, a technique for expanding the function of local deformations into a finite Fourier series is described.

*Keywords:* 316L powder steel, SLM technology, sample, stretching, elongation, wave spectrum, digital-analog conversion, Fourier interpolation.

*Bibliography:* 11 titles.

**For citation:**

A. N. Chukanov, N. N. Dobrovolsky, A. N. Sergeev, Yu. A. Basalov, E. V. Tsoi, A. N. Matveeva, 2023, “Digital-to-analogue conversion of piecewise-linear and periodic functions of wave deformation in metals”, *Chebyshevskii sbornik*, vol. 24, no. 3, pp. 333–340.

<sup>2</sup>The research presented in this article was carried out with the financial support of a grant from the administration of the Tula region in 2022: “Investigation of the mechanism of the wave nature of deformation and its connection with the orthotropy of the physical and mechanical properties of selective laser fusion products” (contract DS/126).

## 1. Введение

Структурная неоднородность и анизотропия физико-механических свойств являются атрибутами изделий аддитивных технологий (АТ). Эти явления в условиях интенсивного температурно-силового воздействия ведут к развитию нестабильности деформационного поведения. Она проявляется в виде формирующихся микрообъёмов локализованной пластичности и волнового характера их распространения. Это может стимулировать внезапное разрушение изделия [1-3]. В представленной работе авторы проводили фиксацию и исследование структуры волновых спектров деформации, полученных при статическом нагружении изделий, изготовленных из металлопорошковых композиций по *SLM*-технологии послойного лазерного синтеза. Ранее авторами был выявлен волновой характер деформации изделий АТ [4,5]. Анализ волновых спектров, зафиксированных в ходе статического растяжения и их описание продолжили с использованием разложения полученных непрерывных (кусочно-линейных) и периодических зависимостей локализованной деформации в ряды Фурье.

**Цель работы** – повышение информативности и физической достоверности анализа волновых спектров нагруженных изделий с привлечением технологии цифро-аналогового преобразования (ЦАП): преобразования последовательности мгновенных (*дискретных*) значений в непрерывный аналоговый сигнал [8,9], разложением функции локальных деформаций в конечный ряд Фурье.

**Материал и методики исследования.** В качестве объектов исследования использовали плоские и цилиндрические образцы порошковой стали ПР-07Х18Н12М2 (аналог *AISI 316L*), изготовленные по *SLM*-технологии в двух направлениях сканирования относительно платформы 3*d*-принтера *SLM280 2.0HL*. Образцы подвергали одноосному растяжению (ГОСТ 1497-84) с постоянной скоростью захватов на воздухе при комнатной температуре [1]. На основе цифровой видеозаписи размеченной поверхности образцов при их нагружении проводили измерения длин размеченных участков. Строили графики зависимостей локальной относительной деформации ( $\delta$ ) по длине образца ( $l$ , мм) в определённое время ( $t$ , сек) [1-3]. Параллельно металлографический анализ структуры образцов.

Каждый испытуемый образец был предварительно размечен лазерными рисками на 50 равных участков. Процесс испытаний при растяжении плоских и цилиндрических образцов фиксировали на цифровую видеокамеру Nikon D3400 и сохраняли в формате .mov. Фотоснимки с интервалом в 10 секунд поочерёдно импортировали в САПР «Компас 3D» с разрешением 150 точек на дюйм (рис.4). С помощью инструментов САПР «Компас 3D» измеряли изменения расстояний между соседними нанесёнными линиями разметки образцов в процессе растяжения.

Физическую модель протекающих при нагружении деформационных процессов формировали на основе анализа полученных после ЦАП экспериментальных периодических и кусочно-линейных зависимостей локализованной деформации. Получаемые процедурой ЦАП периодических и кусочно-линейных функций раскладывали в конечный ряд Фурье, решающий задачу Фурье-интерполяцией, описанной в [10].

## 2. Результаты эксперимента

В течении нагружения растяжением образцов исследованной порошковой стали выявили сложный волновой характер процесса их пластической деформации. В развивающейся в течении испытания структуре волнового спектра фиксировали периодическое формирование, трансформацию и перемещение максимумов локальной деформации по длине образца.

На основании полученных данных строили периодические (квазинепрерывные) зависимости величины локальной относительной деформации  $\delta(l, t)$  на расчётной длине ( $l_i$ , мм) образца

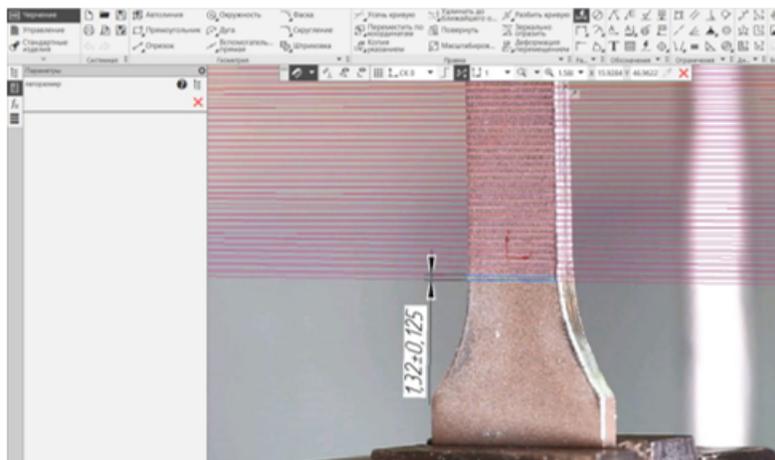
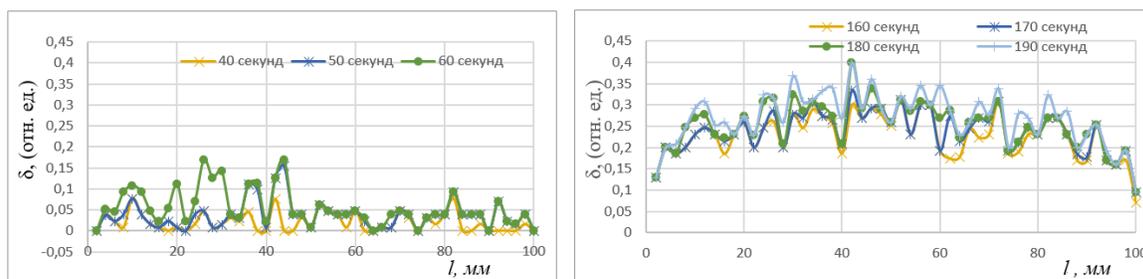
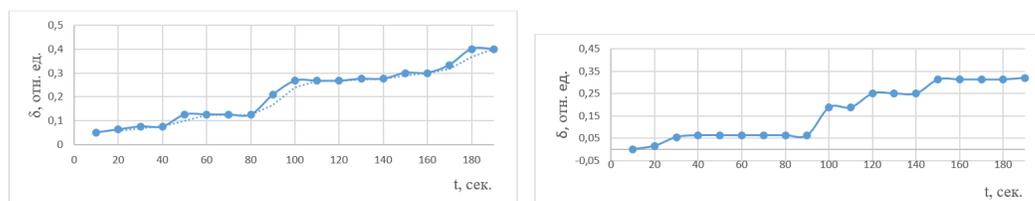


Рис. 1: Вид размеченного образца в «Компас 3D»

(рис. 1). Помимо этого, для наиболее характерных участков образца с максимальными изменениями локальной деформации строили её зависимости от длительности испытания  $t$  (рис. 2). Выявили многостадийный кусочно-линейный характер увеличения высоты максимумов в течении общей длительности нагружения образца (рис. 2).

Рис. 2: Периодические зависимости локальной деформации  $\delta(l, t)$  от длины ( $l_i$ ) образца в периоды испытания  $t = 40, 50, 60$  сек. и  $t = 160, 170, 180, 190$  сек.Рис. 3: Кусочно-линейные зависимости локальной деформации  $\delta(l, t)$  на участках образца  $l = 42$  мм слева и  $l = 52$  мм за весь период испытания справа

### 3. Анализ результатов эксперимента

Преобразование аналогового сигнала в цифровую форму заключается в измерении мгновенных значений его амплитуды через равные промежутки времени и представлении полученных значений, называемых отсчетами, в виде последовательности чисел в двоичной системе исчисления. Эта процедура называется *аналого-цифровым преобразованием* (АЦП) [7,8,11].

Процесс преобразования непрерывного аналогового сигнала в последовательность его мгновенных значений называется *дискретизацией*.

Определение численного значения величины отсчета называется *квантованием*. Для этого весь диапазон возможных изменений амплитуды преобразуемого сигнала делится на множество уровней квантования. Чем больше число разрядов квантования, тем меньше шаг квантования и выше точность преобразования. Скорость следования отсчетов в секунду называется частотой дискретизации, а расстояние между двумя соседними отсчетами – *периодом дискретизации*.

Под функцией  $S(t)$ , понимаем непрерывный аналоговый сигнал, а под частотой  $fm$  – высшую частоту требуемого диапазона. Процесс преобразования последовательности отсчетов в аналоговый сигнал называется *цифро-аналоговым преобразованием* (ЦАП).

Технология, подобная цифро-аналоговому преобразованию, и была применена в данной работе. За индивидуальные дискретные аналоговые сигналы принимали отдельные измерения локальных деформаций на расчётных участках образца.

В качестве математической модели, описывающей протекающие процессы, рассматривали гладкую функцию  $\delta(l, t)$  локальных деформаций. Значение функции в узлах интерполяции (точках измерения  $l_i, t_j$ ) получали с помощью процедуры ЦАП и далее проводили Фурье интерполяцию [10].

1. На основании экспериментально зафиксированных  $\delta(l_i, t_j)$  изменений длин расчётных участков поверхности нагружаемого образца на прямоугольнике  $[0, 190] \times [2, 100]$  в точках  $t_0 = 0, t_1 = 10, \dots, t_{19} = 190, l_0 = 2, l_1 = 4, \dots, l_{49} = 100$  составим массив значений в зависимости от времени и номера участка  $XT_{i,j}, i = 0, \dots, 49, j = 0, \dots, 19$ .

$$XT_{i,j} = \begin{pmatrix} xt_{0,0} & xt_{0,1} & \dots & xt_{0,48} & xt_{0,49} \\ xt_{1,0} & xt_{1,1} & \dots & xt_{1,48} & xt_{1,49} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ xt_{18,0} & xt_{18,1} & \dots & xt_{18,48} & xt_{18,49} \\ xt_{19,0} & xt_{19,1} & \dots & xt_{19,48} & xt_{19,49} \end{pmatrix}. \tag{1}$$

2. Для периодизации задачи построим массив

$$XTP_{i,j} = \begin{pmatrix} xtp_{0,0} & \dots & xtp_{0,49} & \dots & xtp_{0,98} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ xtp_{19,0} & \dots & xtp_{19,49} & \dots & xtp_{19,98} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ xtp_{38,0} & \dots & xtp_{38,49} & \dots & xtp_{38,98} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

$$xtp_{i,j} = \begin{cases} xt_{i,j}, & i \leq 19, j \leq 49, \\ xt_{i,98-j}, & i \leq 19, j > 49, \\ xt_{38-i,j}, & i > 19, j \leq 49, \\ xt_{38-i,98-j}, & i > 19, j > 49. \end{cases} \tag{3}$$

На массив  $XTP_{i,j}$  будем смотреть как на значения периодической по  $x$  и  $y$  функции  $f(x, y)$  на квадрате  $[0, 1] \times [0, 1]$  в узлах равномерной сетки  $M$

$$M = \left\{ \left( \frac{i}{38}, \frac{j}{98} \right) \mid i = 0, \dots, 38, j = 0, \dots, 98 \right\}. \tag{4}$$

3. Решим задачу интерполяции по равномерной сетке.

Вычислим коэффициенты Фурье

$$C_{m_1, m_2} = \int_0^1 \int_0^1 f(x, y) e^{2\pi i(m_1 x + m_2 y)} dx dy \approx \frac{1}{3724} \sum_{i=0}^{37} \sum_{j=0}^{97} XTP_{i,j} e^{2\pi i(m_1 \frac{i}{38} + m_2 \frac{j}{98})},$$

$$m_1 = -18, \dots, 19, \quad m_2 = -48, \dots, 49.$$

Получаем конечный ряд Фурье  $F(x, y)$  интерполирующий функцию  $f(x, y)$  в узлах равномерной секты

$$F(x, y) = \sum_{m_1=-18}^{19} \sum_{m_2=-48}^{49} C(m_1, m_2) e^{2\pi i(m_1 x + m_2 y)}.$$

Отметим что при вычислении  $F(x, y)$  необходимо брать действительную часть  $Re(F(x, y))$ , так как из-за вычислительной ошибки приближенных вычислениях мнимая часть суммируется не в 0, а в близкое к 0 значение.

После замены переменных  $\delta(l, t) = F((t - 10)/380, (l - 2)/196)$  получаем визуализацию процесса, изображенную на рисунке 4.

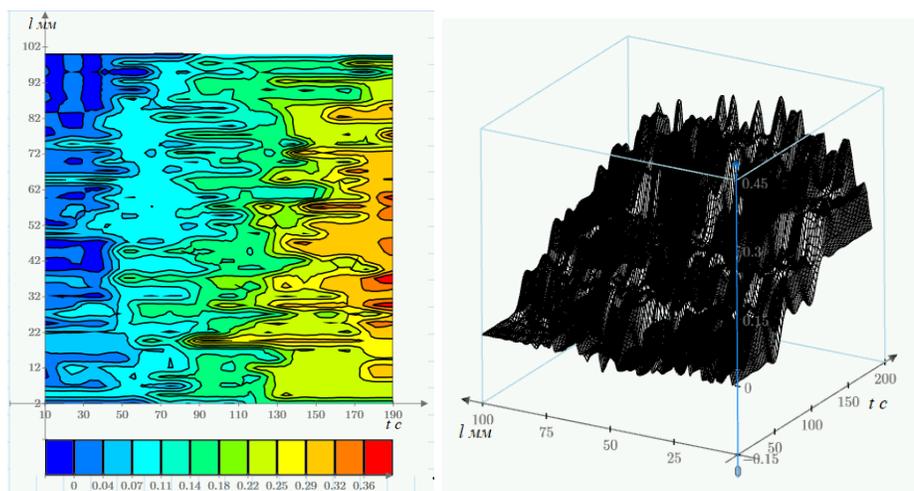


Рис. 4: Слева контурный график  $\delta(l, t)$  в зависимости от  $t$  по горизонтальной оси и  $l$  по вертикальной оси. Справа график  $\delta(l, t)$

## 4. Заключение

Описанная в работе методика позволяет получить конечный ряд Фурье, решающий задачу интерполяции для локальных деформаций, измеренных на размеченном образце в процессе растяжения с помощью ЦАП. Нахождение гармоник, коэффициенты которых больше измерительной погрешности, позволит выделить периодические явления при процессе растяжения, как по времени  $t$ , так и по месту возникновения в образце  $l$ . Что позволит выдвинуть гипотезы о причинах неравномерности растяжения образца. Возникает несколько задач: технического характера — увеличение точности измерений ЦАП, разработка прикладного программного обеспечения для автоматизации ЦАП, исследование сходимости метода.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Чуканов А.Н. Анизотропия деформации при послойном лазерном синтезе изделий // «Перспективные технологии и материалы». Матер. ВНК с межд. уч., (Севастополь, 14–16.10.2020 г.), Научное издание. - СевГУ. 222с., С. 169 -174.
2. Чуканов А.Н. Анизотропия физико-механических свойств при послойном лазерном синтезе // «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», посвящ. 150-ю акад. А.А. Байкова: Сб. научн. статей МНПК. (18.09.2020 г); Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. - 271 с. - С. 244-247.
3. Чуканов А.Н., Терёшин В.А., Цой Е.В., Матвеева А.В. Машинное зрение в анализе волновых спектров деформации аддитивных изделий SLM-технологии // «Перспективные материалы науки, технологий и производства», Межд. научно-практич. конф. (24 мая 2022 года); Сб. научн. статей Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. - 377 с.- С. 325-329.
4. Чуканов А.Н., Терёшин В.А., Цой Е.В., Матвеева А.В. Волновой характер деформации при растяжении изделий послойного лазерного синтеза // 7 ВНК с межд. уч. «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (МТО-62)» (10-11.02. 2022 г.): Сб. научн. статей., Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. С. 206-210.
5. Чуканов А.Н., Терёшин В.А., Цой Е.В., Матвеева А.В. Структура волнового спектра пластической деформации изделий SLM-технологии//XVII Межд. научно-практ. конф. «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации».- Сб. научн. тр. (17-18.03.2022 г).- Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: ЮЗГУ, 2022. - 386 с. – С. 369-372.
6. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи (Приложения) // УФН, 2006, том 176, номер 7, С.762-770.
7. Армацд Н.А. Роль Котельникова в становлении радиофизики и радиосвязи // УФН, 2006, том 176, номер 7, С. 770-717
8. Аналого-цифровое преобразование. /Под ред. У. Кестера – М.: Техносфера, 2007.- 1016 с.
9. Ратхар Т.С. Цифровые измерения. Методы схемотехники. /Пер. с англ. -М.: Техносфера, 2004.-376 с.
10. Добровольский Н. М., Есаян А. Р., Андреева О. В., Зайцева Н. В. Многомерная теоретико-числовая Фурье интерполяция // Чебышевский сборник, 2004, т. 5. Вып. 1. с. 122–143.
11. Сергеев А.Н. Информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности. Лабораторный практикум: Уч.-метод. пособие. В 2 ч./А.Н. Сергеев, А.В. Сергеева, П.Н. Медведев, Д.В. Малий, Ю.С. Дорохин – Тула: Изд-во ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2015. – Ч.1.-200с.

**REFERENCES**

1. Chukanov A. N. 2020, "Anisotropy of deformation during layered laser synthesis of products" *Perspective technologies and materials". Mater. VNPk with international studies, (Sevastopol, 14-16.10.2020), Scientific publication. - SevGU. pp. 169 -174.*

2. Chukanov A. N. 2020 “Anisotropy of physico-mechanical properties in layered laser synthesis“ *Modern problems and directions of development of metallology and heat treatment of metals and alloys dedicated. 150th Academy of A.A. Baykov: Collection of scientific articles of the MNPC. (18.09.2020)*, Kursk: Yugo-Zapad. state University, 244-247.
3. Chukanov A.N., Tereshin V.A., Tsoi E.V., Matveeva A.V. 2022, “Machine vision in the analysis of wave spectra of deformation of additive products of SLM-technologies“ *Perspective materials of science, technology and production International Scientific and Practical Conference (May 24, 2012) COLLECTION of Sciences. articles of the South-West State University. Kursk: Yugo-Zapad. state University*, pp. 325-329.
4. Chukanov A.N., Tereshin V.A., Tsoi E.V., Matveeva A.V. 2022, “The wave character of deformation during stretching of products of layered laser synthesis“ *7 VNTK s inter. uch. "Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering (MTO-62)"(10-11.02. 2022 G.) Sat. nauch. articles.*, Kursk: Yugo-Zapad. gos. un-t, pp. 206-210.
5. Chukanov A.N., Tereshin V.A., Tsoi Or.S. Matveeva A.S. 2022, “The structure of the wave spectrum of plastic deformation of the product SLM-Technology“ *XVII inter-scientific and practical conference "Integrated tool systems, informative technologies and innovations".- SB. scientific tr. (17-18.03.2022)*. Yugo-Zapad. gos. un-t, Kursk: South State University, pp. 369-372.
6. Kotelnikov V.A. 2006, “On the bandwidth of "ether"and wire in telecommunications (Appendices)“ *UFN*. vol. 176, № 7, pp. 762-770.
7. Armand N.A. 2006, “The role of Kotelnikov in the formation of radiophysics and radio communications“ *UFN*, vol. 176, № 7, pp. 770-717.
8. Kester U. 2007, *Analog-to-digital conversion*. Technosphere, p. 1016
9. Rathore T. S. 2003, *Digital Measurement Techniques*. CRC Press, Electronic instruments, Digital, p. 309
10. Dobrovolsky N. M., Yesayan A. R., Andreeva O. V., Zaitseva N. V. 2004, “Multidimensional number-theoretic Fourier interpolation“, *Chebyshevskii Sbornik*, vol. 5. № 1. pp. 122-143.
11. Sergeev A.N. 2015, *Information and communication technologies in professional activity. Laboratory workshop: Uch.-method. stipend.* Tula: Publishing House of Tolstoy TSPU, Part 1. p. 200

Получено: 13.06.2023

Принято в печать: 12.09.2023