

УДК 677.076.75:004.932.2
DOI 10.47367/0021-3497_2024_2_199

**АНАЛИЗ ФУРЬЕ-СПЕКТРОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПЛЕТЕННЫХ СТРУКТУР С НЕРАВНЫМ СООТНОШЕНИЕМ СТОРОН**

**FOURIER-SPECTRUM ANALYSIS OF DIGITAL BRAIDED STRUCTURE IMAGES
WITH UNEQUAL ASPECT RATIO**

С.В. ЕРШОВ, Е.Н. КАЛИНИН

S.V. ERSHOV, E.N. KALININ

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru, enkalini@gmail.com

В работе рассмотрена возможность применения математического аппарата преобразования Фурье для анализа цифровых изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон. На примере Фурье-спектров, полученных для изображений плетеных структур с заранее известным углом плетения, установлена зависимость между значениями угловых координат преобладающих частот Фурье-спектра и соотношением сторон исходного изображения плетеной структуры. Полученная зависимость позволила для изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон определить величину погрешности расчета угла плетения преформы, которая в виде внесенной поправки была учтена в расчете. Алгоритм расчета угла плетения преформы, учитывающий соотношение сторон исходного изображения плетеной структуры, включен в разработанный программный комплекс для анализа изображений плетеных структур и апробирован на цифровых изображениях волокнистой структуры текстильных преформ с разным углом плетения. На основании полученных результатов сделан вывод об эффективности использования разработанного алгоритма для анализа цифровых изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон.

The paper examined the possibility of using the mathematical apparatus of the Fourier transform to analyze digital images of braided structures with unequal aspect ratio. Using the example of Fourier spectrums obtained for images of braided structures with a pre-known braiding angle, a relationship between the values of the angular coordinates of the Fourier-spectrum predominant frequencies and the aspect ratio of the original image of the braided structure was established. The obtained dependence made it possible for images of a braided structure with an unequal aspect ratio to determine the error value in calculating the braiding angle of the preform, which was taken into account in the calculation of the braiding angle in the form of an amendment. An algorithm for calculating the braiding angle of a preform, taking into account the aspect ratio of the original image of braided structure, was included in the developed software system for analyzing images of braided structures and tested on digital images of the fibrous structure of textile preforms with different braiding angles. Based on the obtained results, it was concluded that the use of the developed algorithm is effective for analyzing digital images of braided structures with unequal aspect ratio.

Ключевые слова: плетеные преформы, угол плетения, соотношение сторон изображения, преобразование Фурье.

Keywords: braided preforms, braiding angle, image aspect ratio, Fourier transform.

Введение

Метод анализа изображений, в основе которого лежит математический аппарат преобразования Фурье, активно применяется в программном обеспечении систем машинного зрения для определения угла плетения текстильных преформ [1...3]. В таких системах получаемые с оптических приборов цифровые изображения волокнистой структуры текстильных преформ раскладываются с помощью преобразования Фурье на составляющие частоты и анализируются уже в частотном представлении в виде спектра [4, 5]. При этом, как показано на рис. 1, исходное изображение плетеной структуры (а) и полученный для него частотный спектр (б) должны иметь равное соотношение сторон. Данное условие необходимо для того, чтобы выполнялась зависимость, позволяющая по распределению преобладающих частот спектра определить угол плетения преформы [6]:

$$\theta = \frac{|\varphi_1 + 90 - (\varphi_2 - 90)|}{2}, \quad (1)$$

где θ – угол плетения текстильной преформы, град.; φ_1 и φ_2 – угловые координаты преобладающих частот Фурье-спектра, характеризующие направление волокон нитей основы и нитей утка текстильной преформы соответственно, град.

На практике же получаемые непосредственно с оптических приборов цифровые изображения волокнистой структуры текстильных преформ имеют неравное соотношение сторон, которое определяется физическими размерами светочувствительных матриц, применяемых в оптических приборах [7]. Разрешающая способность большинства светочувствительных матриц позволяет получать изображения с соотношением сторон 3:2, 4:3 и 16:9 [8], но, как видно из рис. 2, использование изображений с неравными пропорциями (а) приводит к тому, что распределение преобладающих частот в области их Фурье-спектра (б) по сравнению с равносторонним спектром будет меняться. Изменения в распределении частот спектра с неравным соотношением сторон будут нарушать зависимость (1) и не позволят корректно определить угол плетения

преформы. Для того чтобы зависимость (1) выполнялась, размер цифровых изображений волокнистой структуры текстильных преформ приходится на программном уровне уменьшать до соотношения сторон 1:1, а следовательно, и искусственно ограничивать доступный для анализа объем информации, получаемый с каждого отдельного изображения.

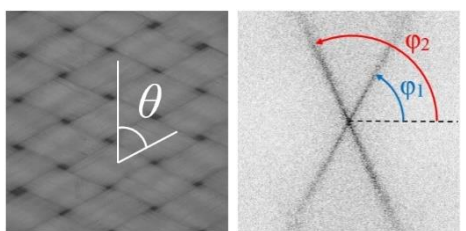


Рис. 1

Материалы и методы

В работе использованы выполненные из стекловолокна образцы плетеных преформ, имеющие разный угол плетения. Образцы плетеных преформ изготовлены на машине радиального плетения Herzog RF1/64–120 с использованием цилиндрической оправки диаметром 80 мм. Для получения цифровых изображений волокнистой структуры текстильных преформ использована CCD-камера с соотношением сторон светочувствительной матрицы 4:3. Размер полученных с камеры изображений волокнистой структуры текстильных преформ составил 2048×1536 точек. Полученные изображения для каждого образца текстильной преформы были дополнительно преобразо-

Целью настоящей работы являлась разработка программного алгоритма, позволяющего выполнять анализ Фурье-спектров цифровых изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон для точного и достоверного определения угла плетения текстильных преформ без необходимости уменьшения размеров исходных изображений их волокнистой структуры.

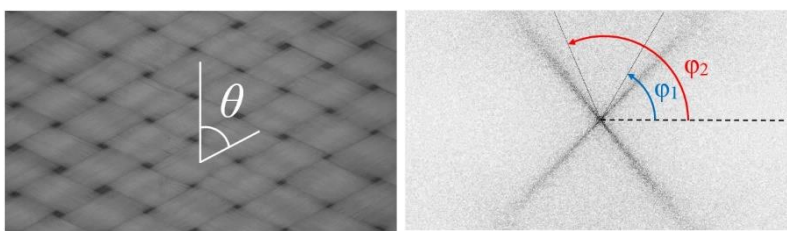


Рис. 2

ваны в изображения с соотношением сторон 1:1, 3:2 и 16:9. Размеры всех использованных в работе изображений волокнистой структуры текстильных преформ приводятся далее в табл.1.

Для определения угла плетения текстильных преформ использован метод анализа изображений, в основе которого лежит математический аппарат преобразования Фурье. Поскольку цифровое изображение плетеной структуры представляет собой двумерный сигнал [9], то для получения частотного спектра каждого такого изображения использовалось двумерное дискретное преобразование Фурье (2Д-ДПФ), математическое выражение которого имеет вид [10]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}, \quad (2)$$

где $F(u, v)$ – значение частотной характеристики исходного изображения плетеной структуры в прямолинейной системе координат полученного Фурье-спектра с взаимно перпендикулярными координатными осями u и v ; $f(x, y)$ – значение интенсивности пикселей исходного изображения плетеной структуры в прямолинейной системе координат исходного изображения с взаимно перпендикулярными координатными

осями x и y ; M и N – количество точек по ширине и высоте исходного изображения плетеной структуры соответственно; j – мнимая единица.

Реализация алгоритма вычисления 2Д-ДПФ в виде разработанного программного комплекса для анализа изображений плетеных структур выполнена в интегрированной среде разработки системы MATLAB [5]. Для каждого изображения волокнистой

структуры исследуемых в работе текстильных преформ с использованием разработанного программного комплекса получены Фурье-спектры и выполнен их численный анализ.

Анализ полученных Фурье-спектров выполнен с использованием следующей процедуры (рис. 3).

На цифровое изображение Фурье-спектра помещался вектор фиксированной длины, который вращался относительно центра изображения спектра с шагом в 1 град (рис. 3, а). Для каждого углового положения вектора в диапазоне от 0 до 180 градусов рассчитывалось суммарное значение интенсивности пикселей спектра, количество которых ограничивалось постоянной длиной вектора. Полученные суммарные значения интенсивности пикселей спектра представлялись графически в виде функции от угла поворота вектора (рис. 3, б). По угловым координатам преобладающих суммарных значений интенсивности пикселей спектра, полученным из графика, с использованием зависимости (1) рассчитывался угол плетения преформы.

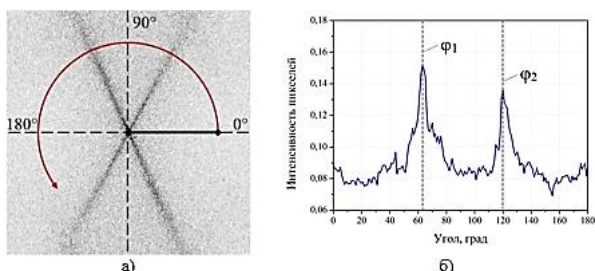


Рис. 3

Для того чтобы определить, каким образом соотношение сторон исходного изображения плетеной структуры влияет на результаты вычисления 2Д-ДПФ, а следовательно, и на расчет угла плетения преформы, был выполнен анализ идеализированных изображений плетеных структур с заранее известным углом плетения 45° . Использованные для анализа изображения идеализированной плетеной структуры имели соотношение сторон 1:1 и 16:9, что позволило выполнить сравнительный анализ распределения частот в области их Фурье-спектров и установить взаимосвязь между значениями угловых координат преобладающих частот спектра и соотношением сторон исходного изображения плетеной структуры, исключая фактор неравномерности реальной волокнистой структуры текстильных преформ.

Результаты и обсуждение

На рис. 4, а представлены идеализированные изображения плетеной структуры с соотношением сторон 1:1 и 16:9, для которых вычислено 2Д-ДПФ и получены частотные Фурье-спектры. Цифровые изображения полученных Фурье-спектров были объединены в одно изображение с сохранением общей системы координат и пропорций изображений каждого спектра. Для объединенного изображения Фурье-спектров выполнен сравнительный анализ распределения преобладающих частот и дана их геометрическая интерпретация, выраженная через соотношение сторон исходных изображений плетеной структуры.

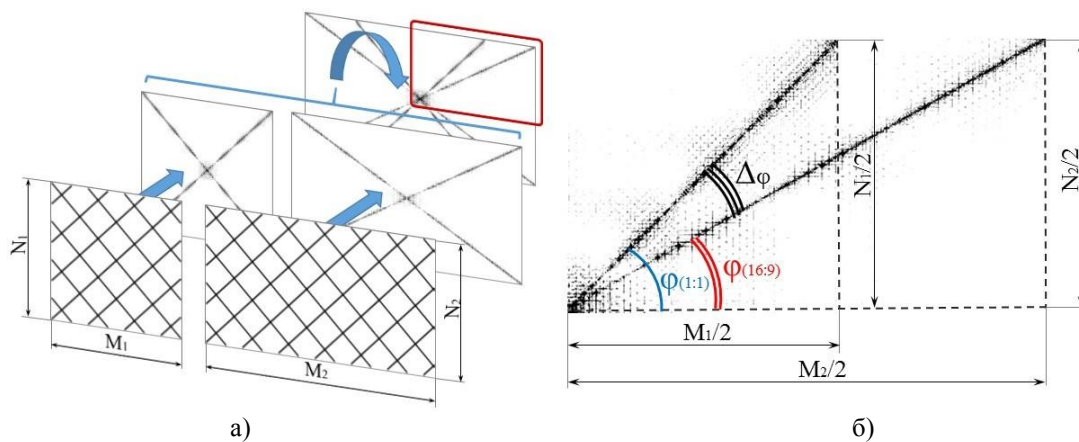


Рис. 4

Как видно из рис. 4, б, для идеализированной плетеной структуры с углом плетения 45° угловые координаты преобладающих частот спектров могут быть выражены

$$\varphi_{(1:1)} = \arctg\left(\frac{N_1}{M_1}\right); \varphi_{(16:9)} = \arctg\left(\frac{N_2}{M_2}\right). \quad (3)$$

Поскольку действительным значением, достоверно характеризующим угол плетения преформы, является значение, полученное для изображения плетеной структуры с

$$\Delta_\varphi = \varphi_{(1:1)} - \varphi_{(16:9)} = \arctg\left(\frac{N_1}{M_1}\right) - \arctg\left(\frac{N_2}{M_2}\right) = 45 - \arctg\left(\frac{N_2}{M_2}\right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что величина погрешности будет зависеть исключительно от соотношения сторон исходного изображения плетеной структуры, а следовательно, может быть классифицирована как методическая погрешность, которая при анализе изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон будет носить систематический характер. Такая погрешность может быть вычислена и учтена в расчете угла плетения преформы. Для этого при анализе изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон полученные результаты расчета угла плетения преформы должны быть скорректированы внесением в зависимость (1) поправки, которая по абсолютной величине будет равна полученной методической погрешности. Скорректированная зависимость для определения угла плетения преформы в таком случае будет иметь вид:

$$\theta = \frac{(\varphi_1 + 90 + \Delta_\varphi) - (\varphi_2 - 90 - \Delta_\varphi)}{2}. \quad (5)$$

Полученная зависимость (5) может быть использована для определения угла плетения в случае анализа изображений плетеных структур как с неравным соотношением сторон, так и с соотношением сторон 1:1. В последнем случае, как следует из выражения (4), величина методической погрешности будет равна нулю, а зависимость

через соотношение сторон исходных изображений плетеной структуры следующим образом:

соотношением сторон 1:1, то величина погрешности расчета угла плетения преформы для изображения с соотношением сторон 16:9 будет определяться по выражению:

примет вид, соответствующий изначальному выражению (1).

Разработанный ранее программный комплекс для анализа изображений плетеных структур [5] откорректирован с учетом полученной зависимости (5), учитывающей соотношение сторон исходного изображения плетеной структуры при определении угла плетения преформы, и апробирован на изображениях волокнистой структуры исследуемых в работе образцов текстильных преформ, имеющих неравное соотношение сторон.

На рис. 5 представлена графическая зависимость, демонстрирующая распределение частот в области Фурье-спектров, полученных для изображений плетеной структуры первого образца текстильной преформы, которая уже была показана в качестве примера на рис. 1.

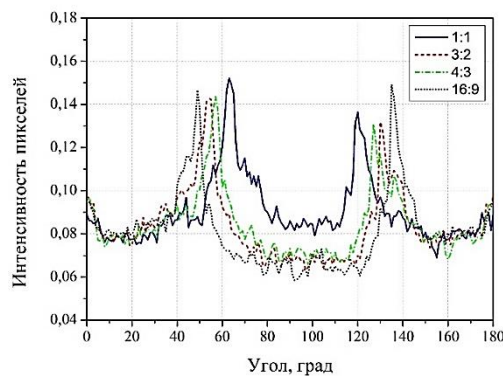


Рис. 5

Как можно заметить из графика, полученные для изображений с неравным соотношением сторон кривые имеют схожую форму и близкие максимальные значения интенсивности спектров, но вершины кривых, характеризующие преобладающие частоты спектров, имеют разные угловые координаты. Из графика также следует, что с увеличением соотношения сторон исходного изображения плетеной структуры увеличивается разность между угловыми координатами преобладающих частот спектра

φ_1 и φ_2 , а следовательно, растет и величина погрешности при определении угла плетения преформы.

Подобные графики, характеризующие распределение частот в области Фурье-спектров, получены и для других исследуемых в работе образцов плетеных преформ, имеющих разное соотношение сторон. Численные результаты анализа всех полученных графиков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Образец плетеной преформы	Соотношение сторон изображения плетеной структуры											
	1:1			3:2			4:3			16:9		
	Размер изображения плетеной структуры, точек по ширине и высоте											
	1536×1536			2012×1324			2048×1536			2048×1152		
	Угловая координата спектра, град		Угол плетения, град	Угловая координата спектра, град		Угол плетения, град	Угловая координата спектра, град		Угол плетения, град	Угловая координата спектра, град		Угол плетения, град
φ_1	φ_2	θ	φ_1	φ_2	θ	φ_1	φ_2	θ	φ_1	φ_2	θ	
№1	64	119	62,5	55	129	53	58	126	56	50	134	48
№2	53	130	51,5	41	142	39,5	44	138	43	37	146	35,5
№3	45	141	42	34	152	31	38	149	34,5	30	155	27,5

Для каждого изображения плетеной структуры по выражению (4) определена величина погрешности расчета угла плетения преформы и с использованием зависимости (5) вычислено уточненное значение угла плетения, учитывающее соотношение

сторон исходного изображения плетеной структуры. Полученные значения погрешности расчета угла плетения преформы и уточненные значения углов плетения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Образец плетеной преформы	Соотношение сторон изображения плетеной структуры											
	1:1			3:2			4:3			16:9		
	Размер изображения плетеной структуры, точек по ширине и высоте											
	1536×1536			2012×1324			2048×1536			2048×1152		
	Измеренный угол плетения, град	Величина погрешности, град	Уточненный угол плетения, град	Измеренный угол плетения, град	Величина погрешности, град	Уточненный угол плетения, град	Измеренный угол плетения, град	Величина погрешности, град	Уточненный угол плетения, град	Измеренный угол плетения, град	Величина погрешности, град	Уточненный угол плетения, град
θ	$\Delta\varphi$	θ^*	θ	$\Delta\varphi$	θ^*	θ	$\Delta\varphi$	θ^*	θ	$\Delta\varphi$	θ^*	
№1	62,5	0	62,5	53	11,3	64,3	56	8,1	64,1	48	15,6	63,6
№2	51,5	0	51,5	39,5	11,3	50,8	43	8,1	51,1	35,5	15,6	51,1
№3	42	0	42	31	11,3	42,3	34,5	8,1	42,6	27,5	15,6	43,1

Как можно заметить, уточненные значения углов плетения для изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон достоверно характеризуют угол

плетения преформы, однако несмотря на исключенную методическую погрешность уточненные значения углов плетения для изображений с неравным соотношением

сторон имеют некоторые различия. Это объясняется тем, что размер исходного изображения плетеной структуры, который определяется количеством точек по ширине и высоте, для изображений с неравным соотношением сторон отличается, а следовательно, для таких изображений отличается и объем исходных данных для расчета угла плетения преформы. С увеличением общего количества точек в изображении увеличивается воспроизводимая на изображении площадь поверхности преформы, что с учетом неравномерности ее волокнистой структуры влияет на результаты расчета угла плетения.

Таким образом, разработанный алгоритм расчета угла плетения преформы позволяет использовать математический аппарат преобразования Фурье для получения точных и достоверных результатов расчета угла плетения при использовании цифровых изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон, исключая необходимость уменьшения размера изображений, полученных непосредственно с оптических приборов, а увеличение за счет этого воспроизводимой площади поверхности преформы на каждом отдельно взятом изображении плетеной структуры делает результаты расчетов угла плетения более достоверными.

ВЫВОДЫ

Исследованный в работе характер распределения частот в области Фурье-спектров, полученных для цифровых изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон, позволил установить взаимосвязь между значениями угловых координат преобладающих частот Фурье-спектра и соотношением сторон исходного изображения плетеной структуры. Для цифровых изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон определена величина погрешности расчета угла плетения преформы, которая в виде внесенной поправки была учтена в расчете угла плетения. Алгоритм расчета угла плетения преформы, учитывающий соотношение сто-

рон исходного изображения плетеной структуры, включен в разработанный программный комплекс для анализа изображений плетеных структур и апробирован на цифровых изображениях волокнистой структуры текстильных преформ с заданным углом плетения. Использование разработанного алгоритма позволило получить точные и достоверные результаты расчета угла плетения исследуемых в работе образцов текстильных преформ для изображений их волокнистой структуры с соотношением сторон 1:1, 3:2, 4:3 и 16:9. На основании полученных результатов сделан вывод об эффективности использования разработанного алгоритма для анализа цифровых изображений плетеных структур с неравным соотношением сторон.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hunt A., Carey J.* A machine vision system for the braid angle measurement of tubular braided structures // *Textile Research Journal*. 2018, Vol. 89. P. 2919...2937.
2. *Ершов С.В., Реймер В., Калинин Е.Н., Грис Т.* Разработка системы компьютерного зрения для измерения направленности волокон в плетеных структурах // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 5. С. 204...208.
3. *Lian B., Jiang L., McGrath J.J., Jaranson J.* Quantitative determination of morphological features of triaxially braided composites by the use of machine vision // *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, P. 159...166.
4. *Ayres C., Bowlin G.L., Henderson S.C., Taylor L. et al.* Modulation of anisotropy in electrospun tissue-engineering scaffolds: Analysis of fiber alignment by the fast Fourier transform // *Biomaterials*. 2006. Vol. 27. P. 5524...5534.
5. *Ершов С.В., Калинин Е.Н., Кузнецов В.Б., Никифорова Е.Н.* Определение угла армирования плетеных преформ методом анализа изображений // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017. №4. С. 14...20.
6. *Zhenkai W., Jialu L.* Braided angle measurement technique for three-dimensional braided composite material preform using mathematical morphology and image texture // *AUTEX Research Journal*. 2006, Vol. 6. P. 30...39.
7. *Одиноких Г.А., Спиридонов И.Н.* Разрешающая способность видеосистем для задач видеоналитики // *Молодежный научно-технический вестник: электрон. журн*. 2013. № 12. – <http://ainsnt.ru/doc/649755.html> (дата обращения 01.03.2024).

8. Фотоматрица // Википедия. Свободная энциклопедия. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотоматрица> (дата обращения 01.03.2024).

9. Чернопятов А.В. Опыт использования преобразования Фурье для обнаружения объектов на изображении // Современные проблемы науки и образования: электрон. журн. 2012. №6. С. 163. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=todmmt> (дата обращения 01.03.2024).

10. Rao K.R., Kim D.N., Hwang J.J. Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications. Springer Dordrecht, 2010, 423 p.

REFERENCES

1. Hunt A., Carey J. A machine vision system for the braid angle measurement of tubular braided structures // Textile Research Journal. 2018, Vol. 89. P. 2919...2937.

2. Ershov S.V., Reimer V., Kalinin E.N., Gries T. Development of a computer vision system for measuring the fiber orientation in braided structures // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2019. № 5. P. 204...208.

3. Lian B., Jiang L., McGrath J.J., Jaranson J. Quantitative determination of morphological features of triaxially braided composites by the use of machine vision // Composites Science and Technology. 2000. Vol. 60, P. 159...166.

4. Ayres C., Bowlin G.L., Henderson S.C., Taylor L. et al. Modulation of anisotropy in electrospun tissue-engineering scaffolds: Analysis of fiber alignment by the

fast Fourier transform // Biomaterials. 2006. Vol. 27. P. 5524...5534.

5. Ershov S.V., Kalinin E.N., Kuznetsov V.B., Nikiforova E.N. Measurement of reinforcement angle in braided preforms using image analysis // Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. №4. P. 14...20.

6. Zhenkai W., Jialu L. Braided angle measurement technique for three-dimensional braided composite material preform using mathematical morphology and image texture // AUTEX Research Journal. 2006, Vol. 6. P. 30...39.

7. Odinokikh G.A., Spiridonov I.N. Resolution of video systems for video analytics tasks // Youth scientific and technical bulletin: electronic journal. 2013, № 12. – <http://ainsnt.ru/doc/649755.html> (date of access 01.03.2024).

8. Image sensor // Wikipedia, the free encyclopedia. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотоматрица> (date of access 01.03.2024).

9. Chernopyatov A.V. User experience of Fourier transform for object detection on images // Modern problems of science and education: electronic journal. 2012. №6. P. 163. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=todmmt> (date of access 01.03.2024).

10. Rao K.R., Kim D.N., Hwang J.J. Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications. Springer Dordrecht, 2010, 423 p.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники Ивановского государственного политехнического университета. Поступила 26.03.24.