

УДК 655.26;004.92

С. В. Сипайло

Белорусский государственный технологический университет

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ВЕКТОРНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ УЗОРОВ
НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННОГО ПЕРЕЧНЯ БАЗОВЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ
ОБЪЕКТОВ**

В статье рассмотрены основные направления синтеза векторных декоративных изображений со свойствами симметрии, которые могут применяться для оформления печатной продукции.

В рамках универсального подхода к синтезу симметричных объектов как гетерогенных многоуровневых структур выделены три направления синтеза декоративных узоров: 1) синтез орнаментов дискретного типа; 2) синтез абстрактных узоров из криволинейных фигур; 3) синтез контурных орнаментов из сюжетных мотивов. Повышение степени разнообразия узоров абстрактного геометрического характера возможно за счет расширения перечня математических функций, описывающих базовый графический элемент, а также за счет управления параметрами этих функций в режиме автоматизированного проектирования. Для этой цели разработан программный редактор периодических функций, относящихся к тригонометрическому ряду Фурье. Сгенерированный на их основе криволинейный объект позволяет создавать узоры непрерывного характера без разрывов контура. Также реализован автоматический синтез орнаментов на основе симметрических преобразований сгенерированного объекта. В алгоритме синтеза используются преобразования трансляционной и зеркальной симметрии.

Более высокую степень разнообразия синтезируемых декоративных узоров можно обеспечить не только за счет увеличения типовых вариантов базовых элементов, но и за счет развития системы их параметризации.

Ключевые слова: контурные узоры, симметрия, векторная графика, синтез изображений.

Для цитирования: Сипайло С. В. Компьютерный синтез векторных симметричных узоров на основе расширенного перечня базовых криволинейных объектов // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2022. № 2 (261). С. 23–28.

S. U. Sipaila

Belarusian State Technological University

**COMPUTER SYNTHESIS OF VECTOR SYMMETRIC TRACERIES
BASED ON AN EXPANDED SET OF BASIC CURVILINEAR OBJECTS**

The article discusses the main directions for the synthesis of vector decorative images with symmetry properties that can be used to design printed products.

As parts of the universal approach to the synthesis of symmetrical objects as heterogeneous multilevel structures, three directions for the synthesis of decorative images have been identified: 1) synthesis of discrete-type ornaments; 2) synthesis of abstract tracteries from curvilinear figures; 3) synthesis of contour ornaments from plot motifs. Increasing the variety of abstract geometric tracteries is possible by expanding the list of mathematical functions that describe the basic graphic element, as well as by controlling the parameters of these functions in the computer-aided design mode. For this purpose, a software editor of periodic functions related to the trigonometric Fourier series has been developed. The curvilinear object generated on their basis makes it possible to create tracteries of a continuous nature without contour breaks. Also implemented is an automatic synthesis of ornaments based on symmetrical transformations of the generated object. The synthesis algorithm uses transformations of translational and mirror symmetry.

A higher degree of diversity of synthesized decorative images can be provided not only by expanding the list of typical basic elements, but also by developing a system of their parameterization.

Keywords: contour tracteries, symmetry, vector graphics, image synthesis.

For citation: Sipaila S. U. Computer synthesis of vector symmetric tracteries based on an expanded set of basic curvilinear objects. *Proceedings of BSTU, issue 4, Print- and Mediatechnologies*, 2022, no. 2 (261), pp. 23–28 (In Russian).

Введение. Компьютерная векторная графика широко используется на этапе доредакционной подготовки полиграфической продукции для представления в цифровом виде художествен-

ных и технических иллюстраций, а также декоративных узоров (орнаментов) [1, 2]. Изображения последнего типа, как правило, обладают свойствами симметрии [3–5] и при этом состоят

из элементов с явными границами, форма которых поддается точному математическому описанию. Это позволяет представить декоративные узоры в виде формализуемой гетерогенной системы, симметричные подсистемы которой базируются на простых изобразительных объектах.

На кафедре полиграфических производств БГТУ такой подход к описанию симметричных изображений первоначально был применен к белорусским орнаментам для реализации их автоматизированного синтеза в виде векторных изображений [6–8]. При этом сам подход является универсальным и может быть положен в основу анализа и синтеза прочих составных изображений со свойствами симметрии [9].

Основная часть. К настоящему времени на кафедре полиграфических производств получили развитие три направления синтеза векторных симметричных узоров: 1) синтез декоративных узоров, выполненных в стиле народных орнаментов дискретного типа (рис. 1, *а*) [6–8]; 2) синтез абстрактных узоров из криволинейных геометрических фигур для использования в декоративных и защитных целях (рис. 1, *б*) [10–14]; 3) синтез контурных орнаментов, состоящих из сюжетных мотивов, например растительных (рис. 1, *в*) [15].

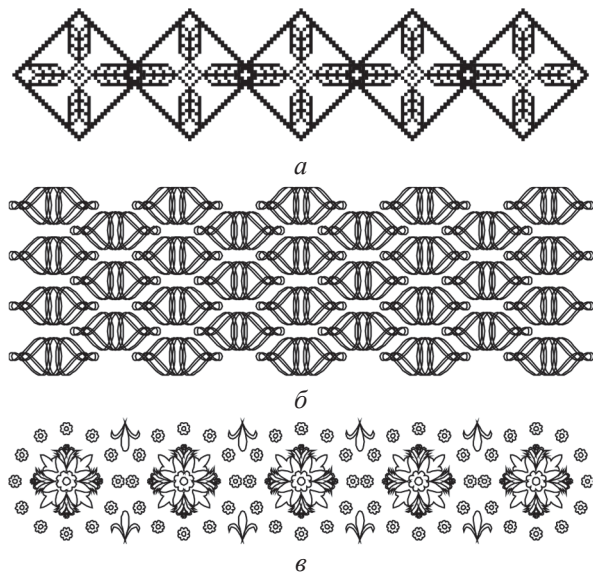


Рис. 1. Варианты симметричных узоров:
а – дискретные орнаменты; *б* – абстрактные узоры геометрического типа; *в* – сюжетные орнаменты

Говоря о практической реализации синтеза векторных симметричных узоров, следует отметить, что базовый набор инструментов универсальных редакторов векторной графики CorelDRAW и Adobe Illustrator не позволяет выполнить алгоритмы синтеза в автоматическом режиме. Большой объем работ требуется осу-

ществлять вручную с существенными временными затратами. Вместе с тем упомянутые редакторы дают пользователю возможность расширить базовую функциональность путем написания интерпретируемых программ-сценариев на высокоуровневых языках программирования VisualBasic for Applications (VBA) и JavaScript [7, 16]. С одной стороны, такие программы-сценарии доступны для написания широкому кругу пользователей и при этом могут реализовать сложные алгоритмы обработки информации. С другой стороны, интерпретируемые программы-сценарии требуют больших вычислительных затрат для выполнения, чем автономные программы, скомпилированные в виде машинного кода. Однако мощности современных компьютеров позволяют выполнять программы-сценарии с достаточной производительностью, а сроки разработки программного продукта в этом случае существенно сокращаются. По этой причине для апробации методов синтеза векторных узоров и разработки первичного программного продукта автором используется среда CorelDRAW в сочетании с языком VBA.

В настоящее время из приведенных выше направлений синтеза симметричных узоров наиболее полно реализован синтез изображений белорусских орнаментов как на уровне теоретического исследования их свойств, так и на уровне готового к применению коммерческого программного продукта. На основе системного анализа белорусских орнаментов выполнено их формализованное представление в виде составных объектов, включающих симметричные подструктуры, выделены типовые объекты простой формы и симметрии, которые могут быть сформированы из дискретных элементов путем выполнения алгоритмической цепочки симметрических преобразований. Из этих типовых объектов, характеризующихся определенными параметрами, образуются более сложные комбинации, соответствующие белорусским орнаментам по композиции, составу и симметрии. Синтез орнаментов в автоматическом и автоматизированном режимах реализован в виде программного комплекса Ornamentika [7, 17], включающего в себя несколько групп инструментов: 1) инструменты синтеза простых орнаментальных розеток и их элементов; 2) инструменты синтеза составных орнаментальных розеток; 3) инструменты автоматизации симметрических преобразований, характерных для белорусских орнаментов; 4) автоматические генераторы орнаментов розеточного, бордюрного и сетчатого типов.

В рамках второго направления компьютерного синтеза (генерация абстрактных симметричных узоров из криволинейных геометрических фигур) был предложен формульный аппарат [10,

18, 13, 14], который позволяет выполнить преобразование математических функций разных видов в совокупность многочленов Безье третьего порядка, использующихся для описания формы контуров в программах векторной графики. Этот формульный аппарат переведен в программный код на языке VBA, что позволяет в автоматическом режиме синтезировать базовые графические элементы узора в виде векторных контуров. При этом возможно генерировать векторные контуры на основе различных видов исходных функций: 1) функций, заданных в явном виде $y = f(x)$; 2) функций, заданных в параметрическом виде $y = f_y(t)$, $x = f_x(t)$; 3) функций вида $r = f(\varphi)$, соответствующих полярной системе координат. В рамках функций вида $y = f(x)$ предусмотрены два варианта описываемых фигур: 1) базовый графический элемент в виде контурного объекта небольшого размера, требующего горизонтальных трансляций при создании бордюрных и (или) сетчатых орнаментов; 2) базовый графический элемент в виде так называемого «макроконтур» [13] – криволинейного непрерывного объекта максимальной протяженности, описываемого непрерывными периодическими функциями. Второй вариант дает возможность синтезировать симметричные узоры без разрывов контура.

Использование разных видов функций позволяет математически описать разнообразные по геометрической форме базовые графические элементы синтезируемого узора, в том числе замкнутые и спиралевидные фигуры. При этом на текущем этапе программной реализации синтеза абстрактных узоров исходные функции закодированы на языке VBA в виде ограниченного перечня вариантов с фиксированными коэффициентами.

Для генерации составных симметричных узоров на основе базовых контурных объектов разработан и представлен в виде программного кода универсальный алгоритм синтеза, использующий квазислучайные числа. Универсальность алгоритма позволяет обеспечить высокую степень разнообразия генерируемых узоров, в том числе за счет использования разных по геометрической форме базовых элементов. Для расширения перечня базовых геометрических форм можно не ограничиться тем фиксированным набором исходных математических функций, который представлен в программном коде, а дать пользователю возможность самому задавать тип и параметры функции в режиме автоматизированного проектирования. Для этого следует разработать пользовательский редактор функций в виде экранной формы. При этом целесообразно предусмотреть систему автоматической коррекции числовых параметров функции, если потенциальный базовый объект будет слишком слож-

ным по форме и требовать большого количества узлов в составе кривой Безье.

В рамках отмеченного пути повышения степени разнообразия формируемых абстрактных узоров разработан пользовательский редактор периодических функций, относящихся к тригонометрическому ряду Фурье [19, с. 515]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n \left(a_i \cdot \cos \frac{2i\pi}{T} x + b_i \cdot \sin \frac{2i\pi}{T} x \right),$$

где a_i , b_i – коэффициенты функции; n – количество элементов ряда Фурье; T – период функции.

Диалоговое окно редактора приведено на рис. 2. Во избежание перегруженности окна количественными параметрами, что усложнило бы работу пользователя и повысило вычислительную сложность задачи синтеза, установлено предельное ограничение на количество элементов ряда Фурье ($n_{\max} = 4$). Такое количество элементов позволяет описать контур периодического характера сложной криволинейной формы.

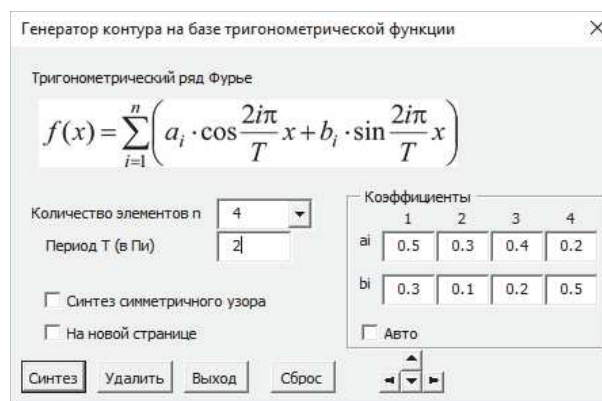


Рис. 2. Диалоговое окно редактора тригонометрической функции

Помимо генерации контура на основе тригонометрического ряда Фурье, также реализован автоматический синтез орнаментального узора на основе симметрических преобразований сгенерированного контура. Для активации этого процесса в окне диалога предусмотрен флажок «Синтез симметричного узора». Алгоритм синтеза орнамента из непрерывных макроконтуров базируется на трансляционной и зеркальной симметрии. Конкретная цепочка симметрических преобразований при синтезе узора определяется автоматически на основе квазислучайных чисел. При этом количественные параметры преобразований согласованы с количественными параметрами макроконтура. Также установлено ограничение на общее количество симметрических преобразований. Это продиктовано как эстетическими соображениями, так и соображениями высокой производительности обработки изображений.

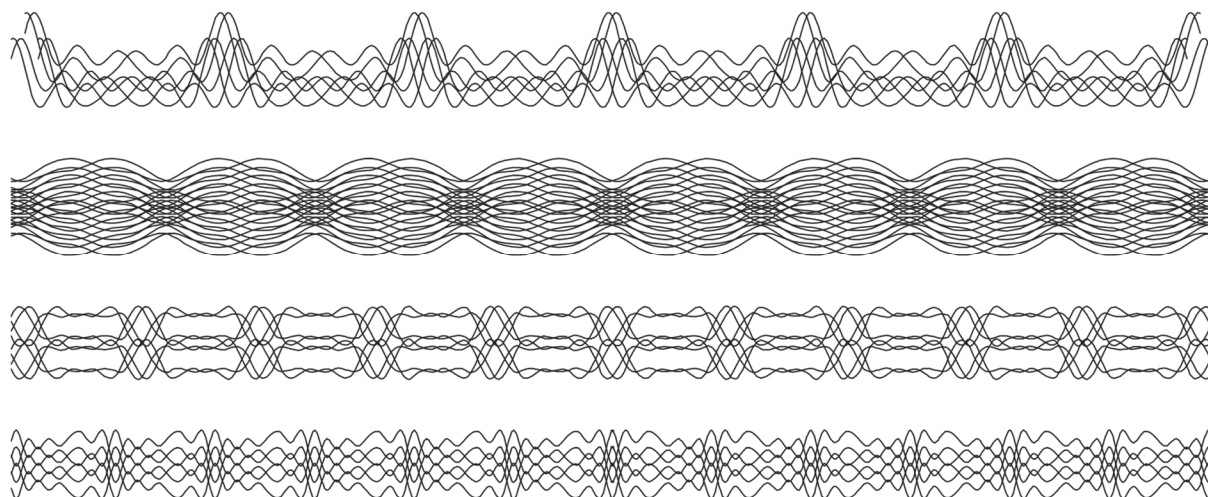


Рис. 3. Примеры синтезированных орнаментов, образованных непрерывными макроконтурами

Примеры синтезированных орнаментов из непрерывных макроконтуров, полученных с помощью редактора функций, приведены на рис. 3.

Если же пользователь предпочитает формировать симметричный узор на основе сгенерированного макроконтура, самостоятельно определяя перечень и порядок симметрических операций, опцию «Синтез симметричного узора» можно деактивировать. В этом случае симметрические преобразования созданного макроконтура можно выполнять в ручном режиме, используя стандартные средства CorelDRAW, либо в автоматизированном режиме с использованием инструментов симметрических преобразований программы Ornamentika.

Для реализации третьего направления синтеза векторных узоров – генерации контурных орнаментов из сюжетных мотивов – ранее был разработан набор типовых базовых элементов [15], форма которых соответствует очертаниям стилизованных зрительных образов. Типовые базовые элементы первого (самого низкого) уровня сложности образуют устойчивые композиционные сочетания, что позволяет алгоритмизировать синтез разнообразных вариантов сюжетных орнаментов на основе ограниченного набора простых по форме базовых элементов. Вместе с тем, чтобы при ограниченном наборе базовых элементов расширить их вариативность, необходимо осуществить параметризацию каждого из них – выделить ключевые количественные и качественные параметры базового элемента и ма-

тематически связать их с параметрами векторной кривой Безье. В результате можно повысить степень разнообразия получаемых узоров как в режиме автоматического синтеза, так и под управлением пользователя в режиме автоматизированного проектирования. В случае разработки систем автоматизированного проектирования орнаментов, функционирующих в диалоговом режиме, параметры узоров должны не только иметь явную связь с параметрами машинной графики, но и быть понятны для пользователя. Например, пользователь может задавать в режиме диалога степень кривизны орнаментального элемента, которая должна быть автоматически преобразована в коэффициенты кривой Безье. Это требует разработки дополнительного формульного аппарата.

Закключение. На основе универсального подхода к описанию декоративных узоров как составных симметричных систем можно автоматизировать процесс их создания в виде цифровых векторных изображений. Синтез узоров различного характера (этнических, абстрактных, сюжетных), следует реализовывать с учетом их специфики, выражающейся в геометрической форме и устойчивых композиционных сочетаниях базовых элементов, а также характерных вариантах симметрии. При этом более высокую степень разнообразия получаемых декоративных узоров можно обеспечить не только за счет расширения типовых вариантов базовых элементов, но и за счет развития системы их параметризации.

Список литературы

1. Макарова И. О. Компьютерная графика в книжной иллюстрации // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 2: Филология и искусствоведение. 2011. № 4. С. 182–185.
2. Дубина Н. Орнамент в декоративном оформлении книги // КомпьюАрт. 2000. № 8. С. 78–83.
3. Шубников А. В., Копчик В. А. Симметрия в науке и искусстве. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исслед., 2004. 560 с.
4. Яблан С. В. Симметрия, орнаменты и модулярность. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 365 с.

5. Машинное орнаментирование / Т. В. Кочева [и др.]. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 160 с.
6. Сипайло С. В., Долгова Т. А. Формализованное описание процесса генерирования сетчатых и бордюрных белорусских орнаментов // Труды БГТУ. Сер. IX. Издат. дело и полиграфия. 2006. Вып. XIV. С. 37–41.
7. Сипайло С. В. Создание орнаментальных изображений с помощью встраиваемого программного модуля CorelDRAW // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. 2007. Вып. XV. С. 17–20.
8. Сипайло С. В. Типизация белорусских орнаментов по форме орнаментального мотива // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. 2008. Вып. XVI. С. 15–18.
9. Сипайло С. В., Долгова Т. А. Группы симметрии как основа автоматизированного синтеза векторных орнаментальных изображений // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. 2008. Вып. XVI. С. 11–14.
10. Сипайло С. В. Автоматизация синтеза векторных криволинейных контуров со свойствами симметрии в CorelDRAW // Труды БГТУ. 2014. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 3–7.
11. Сипайло С. В. Реализация автоматического синтеза векторных узоров в допечатном процессе на языке VBA // Труды БГТУ. 2015. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 125–129.
12. Сипайло С. В. Синтез векторных симметричных узоров на основе параметрического описания базового элемента // Скориновские чтения 2017: книга в медийном пространстве: к 500-летию белорусского книгопечатания: материалы III Междунар. форума, Минск, 6–7 сент. 2017 г. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2017. С. 258–261.
13. Сипайло С. В. Создание симметричных узоров на основе криволинейных контуров, описываемых непрерывной периодической функцией // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2020. № 2 (237). С. 22–26.
14. Сипайло С. В. Компьютерный синтез векторных изображений на основе математического описания контуров в полярной системе координат // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2021. № 2 (249). С. 56–61.
15. Кузьма А. С., Сипайло С. В. Систематизация и типизация декоративных изображений для автоматизации процесса их создания на стадии допечатной подготовки // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2019. № 1 (219). С. 17–23.
16. Сипайло С. В. Автоматизация допечатного процесса при создании цифровых изобразительных оригиналов // Эпоха науки. 2021. № 26. С. 21–24. DOI 10.24412/2409-3203-2021-26-21-24.
17. Сипайло С. В. Автоматизированное проектирование орнаментов для оформления книжных изданий // Скориновские чтения 2015: книгоиздание и книгораспространение в контексте кросскультурных коммуникаций XXI века: материалы Международного форума, Минск, 3–6 сент. 2015 г. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2015. С. 64–69.
18. Сипайло С. В. Синтез векторных симметричных узоров на основе параметрического описания базового элемента // Скориновские чтения 2017: книга в медийном пространстве: к 500-летию белорусского книгопечатания: материалы III Междунар. форума, Минск, 6–7 сент. 2017 г. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2017. С. 258–261.
19. Зорич В. А. Математический анализ. В 2 ч. Ч. II. М.: Наука, 1984. 640 с.

References

1. Makarova I. O. Computer graphics in book illustration. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Adyghe State University], series 2: Philology and Art History, 2011, no. 4, pp. 182–185 (In Russian).
2. Dubina N. Ornament in the decorative design of the book. *Comp'uArt* [CompuArt], 2000, no. 8, pp. 78–83 (In Russian).
3. Shubnikov A. V., Koptsik V. A. *Simmetriya v nauke i iskusstve* [Symmetry in Science and Art]. Moscow – Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2004. 560 p. (In Russian).
4. Jablan S. V. *Simmetriya, ornamenti i modulyarnost'* [Symmetry, Ornaments and Modularity]. Moscow – Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., Scientific publishing center “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2006. 365 p. (In Russian).
5. Kocheva T. V., Chelpanov I. B., Nikiforov S. O., Ayusheva A. O. *Mashinnoye ornamentirovaniye* [Machine Ornamentation]. Ulan-Ude, BNC SO RAN Publ., 1999. 160 p. (In Russian).
6. Sipaila S. U., Dolgova T. A. Formalized description of the process of generating mesh and border Belarusian ornaments. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IX, Printing and Publishing, 2006, issue XIV, pp. 37–41 (In Russian).
7. Sipaila S. U. Creation of ornamental images using embedded software module CorelDRAW. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IX, Printing and Publishing, 2007, issue XV, pp. 17–20 (In Russian).

8. Sipaila S. U. Typing Belarusian ornaments in the form of ornamental motif. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IX, Printing and Publishing, 2008, issue XVI, pp. 15–18 (In Russian).
9. Sipaila S. U., Dolgova T. A. Symmetry group as the basis for the automated synthesis of ornamental vector images. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IX, Printing and Publishing, 2008, issue XVI, pp. 11–14 (In Russian).
10. Sipaila S. U. Automation of synthesis of vector curved contours with symmetry properties in CorelDRAW. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 9: Printing and Publishing, pp. 3–7 (In Russian).
11. Sipaila S. U. Implementation automatic synthesis of vector patterns in prepress in language VBA. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 9: Printing and Publishing, pp. 125–129 (In Russian).
12. Sipaila S. U. Synthesis of symmetric vector tracteries based on the parametric description of the base element. *Materialy III Mezhdunar. foruma "Skorinovskiy chteniya 2017: kniga v mediynom prostranstve: k 500-letiyu belorusskogo knigopечатaniya"* [Materials of the III International Forum "Skorinov's Readings 2017: a book in the media space: to the 500th anniversary of Belarusian printing"]. Minsk, 2017, pp. 258–261 (In Russian).
13. Sipaila S. U. Create symmetrical tracteries based on curved paths described by a continuous periodic function. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 4, Print- and Mediatechnologies, 2020, no. 2, pp. 22–26 (In Russian).
14. Sipaila S. U. Computer synthesis of vector images based on the mathematical description of contours in a polar coordinate system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 4, Print- and Mediatechnologies, 2021, no. 2, pp. 56–61 (In Russian).
15. Kuz'ma A. S., Sipaila S. U. Systematization and tyfication of decorative images to automate the process of their creation at the prepress stage. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 4, Print- and Mediatechnologies, 2019, no. 1, pp. 17–23 (In Russian).
16. Sipaila S. U. Automation of the prepress stage when creating digital graphic originals. *Epokha nauki* [Age of Science], 2021, no. 26, pp. 21–24. DOI 10.24412/2409-3203-2021-26-21-24 (In Russian).
17. Sipaila S. U. Computer-aided design of ornaments for book decoration. *Materialy Mezhdunar. foruma "Skorinovskiy chteniya 2015: knigoizdanie i knigorasprostranenie v kontekste krosskul'turnykh kommunikatsiy XXI veka"* [Materials of the International Forum "Skorinov's Readings 2015: book publishing and book distribution in the context of cross-cultural communications of the 21st century"]. Minsk, 2015, pp. 64–69 (In Russian).
18. Sipaila S. U. Synthesis of symmetric vector tracteries based on the parametric description of the base element. *Materialy III Mezhdunar. foruma "Skorinovskiy chteniya 2017: kniga v mediynom prostranstve: k 500-letiyu belorusskogo knigopечатaniya"* [Materials of the III International Forum "Skorinov's Readings 2017: a book in the media space: to the 500th anniversary of Belarusian printing"]. Minsk, 2017, pp. 258–261 (In Russian).
19. Zorich V. A. *Matematicheskiy analiz* [Mathematical Analysis]. In 2 parts. Part II. Moscow, Nauka Publ., 1984. 640 p. (In Russian).

Информация об авторе

Сипайло Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полиграфических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: svsip@yandex.by

Information about the author

Sipaila Siarhei Uladzimiravich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Printing Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svsip@yandex.by

Поступила 15.08.2022