



## **Linear Synthesis of Uniform Anaxial Eddy Current Probes with a Volumetric Structure of the Excitation System**

Ruslana V. TREMBOVETSKA, Volodymyr Ya. HALCHENKO, Volodymyr V. TYCHKOV,  
Anatolii V. STORCHAK

Department Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies,  
Cherkasy State Technological University; Cherkasy, Ukraine  
e-mail: [r.trembovetska@chdtu.edu.ua](mailto:r.trembovetska@chdtu.edu.ua), [halchvl@gmail.com](mailto:halchvl@gmail.com), [v.tychkov@chdtu.edu.ua](mailto:v.tychkov@chdtu.edu.ua), [gumby@ukr.net](mailto:gumby@ukr.net)

### **Abstract**

The problem of multiparameter linear synthesis of moving surface eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system, characterized by uniform sensitivity in the testing zone, is solved. For research, an anaxial design was selected. It ensures the location of the measuring coil at the place of maximum concentration of eddy currents with their uniform distribution. The task was implemented using metaheuristic optimization algorithms for searching of a global extremum. They are a hybrid algorithm based on the genetic one with local search using the Nelder-Mead simplex method, a low-level hybrid of the particles swarm algorithm with a strategy of the randomly dynamically variable topology of connections with the genetic one, which ensures the evolutionary formation of the swarm composition. Preliminary the construction of the metamodel of the probe using a composite of artificial neural networks, namely RBF-neural networks was carried out. In order to improve the accuracy of constructing the metamodel, the search area is represented by a set of "stitched" several sub-areas, separated by the radius of the excitation coils and the height of their location above the testing object. The objective function in the synthesis problem was formulated as a quadratic functional. The results of the obtained solution are presented in the form of the eddy current density distribution with an indication of the obtained width of the testing zone, where this distribution is close to uniform.

**Keywords:** eddy current probe, eddy current density, velocity effect, excitation system, homogeneous sensitivity, surrogate optimization, RBF-metamodel, parameterless additive  $R_4$ -sequence, stochastic algorithm global extremum optimization

## **Линейный синтез анаксиальных однородных вихретоковых преобразователей с объемной структурой системы возбуждения**

Руслана В. ТРЕМБОВЕЦКАЯ, Владимир Я. ГАЛЬЧЕНКО, Владимир В. ТЫЧКОВ,  
Анатолий В. СТОРЧАК

### **1. Введение**

Вихретоковый контроль широко используется в практике дефектоскопии и дефектотрии благодаря целому ряду преимуществ. При этом присущая этому методу неоднородная чувствительность в зоне контроля является недостатком, устранению которого посвящены работы [1-10], в которых авторы рассматривают различные подходы и предлагают конструктивные решения вихретоковых преобразователей (ВП), используя для их реализации оптимальный синтез как линейный, так и нелинейный. Необходимо отметить, что практически отсутствуют исследования, в которых эта проблема рассматривалась с учетом скорости движения преобразователя относительно объекта контроля (ОК). В этом случае возникает дополнительно наведенная плотность

вихревых токов (ПВТ) от токов переноса, которые образуются при скорости перемещения преобразователя больше 30 м/с относительно ОК.

В работах авторов [11-13] решалась задача синтеза несоосных круговых накладных вихретоковых преобразователей (НВП) с планарной структурой системы возбуждения (СВ). Полученные значения приведенной погрешности однородности ПВТ в зоне контроля таких СВ составляют от 9 до 11 %.

Представляется перспективным создание для этих целей объемных СВ, что дает большие возможности в процессе проектирования, а именно, варьированием не только радиусами, но и высотами расположения отдельных источников поля СВ над ОК.

## 2. Исследования и результаты

**Целью работы** является линейный параметрический синтез анаксиальных однородных НВП с объемной структурой СВ.

Учитывая особенности при решении такого рода задач синтеза ВТП, рассмотренные в работе [11], и опыт создания планарных структур СВ, в данной работе используются стохастические алгоритмы поиска экстремума многомерных целевых функций. В классической вариационной постановке задается функция цели в виде квадратичного функционала разности между заданными значениями ПВТ в контрольных точках и ПВТ, полученных от СВ НВП в тех же точках [11, 13, 14].

Рассматривается объемная СВ, которая имеет  $M$  последовательно соединенных секционных катушек с прямоугольным сечением  $axb$ , расположенных на средней высоте  $z_{mi}=(z_{2i}+z_{1i})/2$  над ОК (рис. 1). При этом  $i$ -е ( $i=1\dots M$ ) катушки возбуждения расположены равномерно, т.е. расстояние между ними  $\Delta z_{mi}=const$ . Средние радиусы  $r_{mi}$  соседних катушек отличаются на  $\Delta r_m=(r_{m+1}-r_m)=const$ , где  $r_{mi}=(r_{1i}+r_{2i})/2$ . Питаются катушки переменным током  $I$  с круговой частотой  $\omega$  и включены встречно или согласно «по полю».

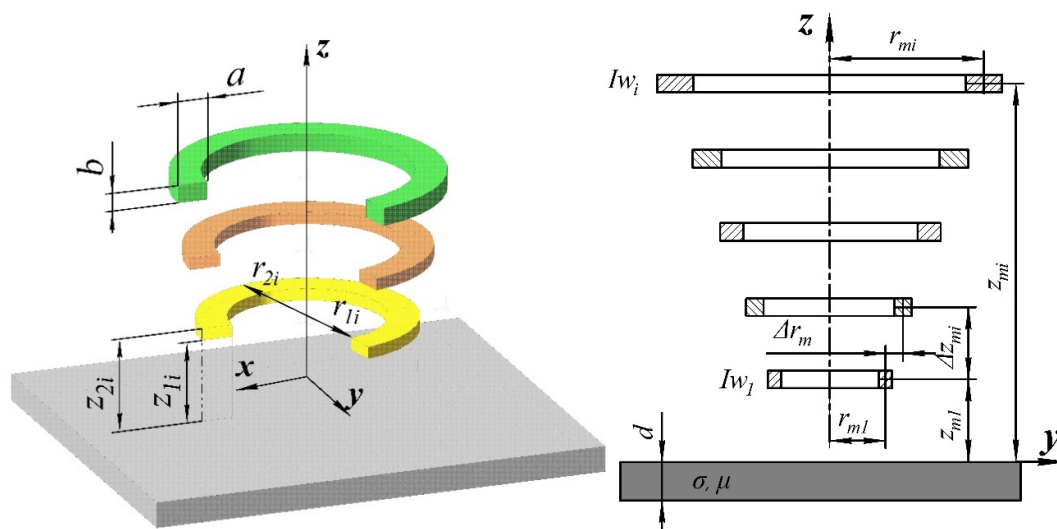


Рисунок 1. Объемная СВ НВП с равномерным расположением секций катушек возбуждения

Решение задачи синтеза СВ с использованием «точных» электродинамических математических моделей, описывающих распределение ПВТ на поверхности ОК [13, 14], практически невозможно, что было показано в работах [11, 14, 15] для более простых случаев. Для катушки с прямоугольным сечением «точная» математическая модель

имеет еще более сложную зависимость, чем для источника поля в виде тонкого витка [13 – 15], поскольку необходимо еще выполнять дополнительно интегрирование по площади поперечного сечения источника [16], что соответственно сказывается на увеличении времени расчета.

Поэтому целесообразно использование технологии суррогатной оптимизации [11-15, 17], позволяющей уменьшить компьютерное время численных расчетов. Основные этапы выполнения суррогатной оптимизации детально рассмотрены и успешно апробированы авторами в работах [11-13] для построения метамоделей СВ НВТП планарной структуры, а также для некоторых простых случаев СВ [14].

Для создания метамоделей используется эвристический способ построения с помощью искусственных нейронных сетей (НС). Но использование одиночной RBF-сети простейшей архитектуры с гауссовой функцией активации не рационально, поскольку погрешность полученной таким образом метамоделей достаточно высока. В то же время использование одного или совокупности нескольких методов, уменьшающих погрешность аппроксимации результирующей НС, как было показано в работах [11-14], позволяет достичь необходимой точности построения метамоделей. Таковыми методами, которые широко используются в случае сложной нелинейной топологии поверхности отклика, являются: ассоциативные машины статической структуры с методами получения решения усреднением по ансамблю и усилением (boosting), а также аддитивная НС-регрессия. Хорошие результаты в смысле снижения погрешности имеет гибридизация, когда одновременно используются множественные НС с техникой ассоциативных машин [11, 19] и декомпозиция пространства поиска, поэтому в исследовании используется именно такой подход.

При построении многомерного плана эксперимента, необходимого для создания метамоделей, рассматривались варианты компьютерных планов генерирования точек, имеющих наилучшие показатели расхождения, а именно безпараметрические аддитивные рекурсивные R4-последовательности и комбинации ЛП<sub>τ</sub>-последовательностей Соболя. Используя полученные в работе [20] комбинации ЛП<sub>τ</sub>-последовательностей для четырехмерных планов экспериментов, рассчитаны центрированное и циклическое расхождения для плана с количеством точек равным 1250. Наилучшие значения указанных расхождений имеет комбинация ЛП<sub>τ</sub>-последовательностей ( $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_5$ ), для которой центрированное расхождение составляет  $1.393 \cdot 10^{-5}$ , а циклическое – 6.321022. При этом и другие комбинации ЛП<sub>τ</sub>-последовательностей ( $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_7$ ), ( $\xi_6, \xi_7, \xi_{12}, \xi_{14}$ ) имеют эти показатели лучшие в сравнении с R4-последовательностями. Следовательно, первым из них было отдано предпочтение при построении плана эксперимента. Предварительно выполнена декомпозиция пространства поиска на две подобласти по высоте и шесть соответственно по радиусу катушки, в которых использовались указанные выше комбинации ЛП<sub>τ</sub> – последовательностей.

Исходные данные, используемые для построения метамоделей движущегося со скоростью  $v_x=40$  м/с НВТП, следующие: толщина токопроводящего материала ОК  $d = 10$  мм, электрофизические параметры материала  $\sigma = 3,745 \cdot 10^7$  См/м,  $\mu = 1$ , частота тока возбуждения  $f = 5$  кГц.

RBF-метамоделей объемной СВ является функцией четырех аргументов – пространственных координат  $x, y$ , радиуса катушки возбуждения и высоты ее расположения над ОК, которые варьировались в диапазоне  $x = -45 \dots 45$  мм;  $y = 0 \dots 35$  мм;  $r_m = 2 \dots 15$  мм;  $z_m = 2 \dots 4$  мм. Аппроксимационные зависимости получены для каждой подобласти с использованием аддитивной НС-регрессии с формированием беггинг-подвыборок, причем на каждом каскаде применен комитет из НС, имеющих наибольшую производительность, но не менее чем 90%.

Значение средней относительной модельной погрешности  $MAPE, \%$  для разных поддиапазонов, которое удалось достичь с помощью гибридного подхода построения НС при обучении составляет от 4,35 до 21 %. Воспроизведение поверхности отклика оценивается с помощью формулы, описывающей выход RBF-нейросети [17], и выполняется на количестве точек  $N_{воспр} > N_{обуч}$ . Погрешность воспроизведения поверхности отклика составляет от 5,41 до 25,52 %. Кроме погрешности  $MAPE$ , оценивались и другие объективные показатели, необходимые для получения адекватной и информативной метамоделли [13, 18, 21].

Таким образом, полученная RBF-метамоделль СВ НВТП используется в формуле квадратичного целевого функционала вместо «точной» электродинамической математической модели [13, 14], а далее решается задача линейного оптимального синтеза, т.е. определяется магнитодвижущая сила  $Iw_i$  каждой катушки СВ, что в итоге обеспечивает близкое к однородному распределение ПВТ на поверхности ОК в зоне контроля. При численном моделировании задается рядом структур СВ с разным количеством катушек  $M=3...5$ , которые равномерно располагались над ОК  $\Delta z_{mi}$ , а средние радиусы соседних катушек изменялись с шагом  $\Delta r_m$ .

Также в качестве исходных данных задавалось желательное распределение ПВТ интенсивностью  $J_{reference}=80000 \text{ А/м}^2$  на поверхности ОК в зоне контроля  $7 \text{ мм} \leq r \leq 20 \text{ мм}$ , которое необходимо реализовать синтезированной СВ.

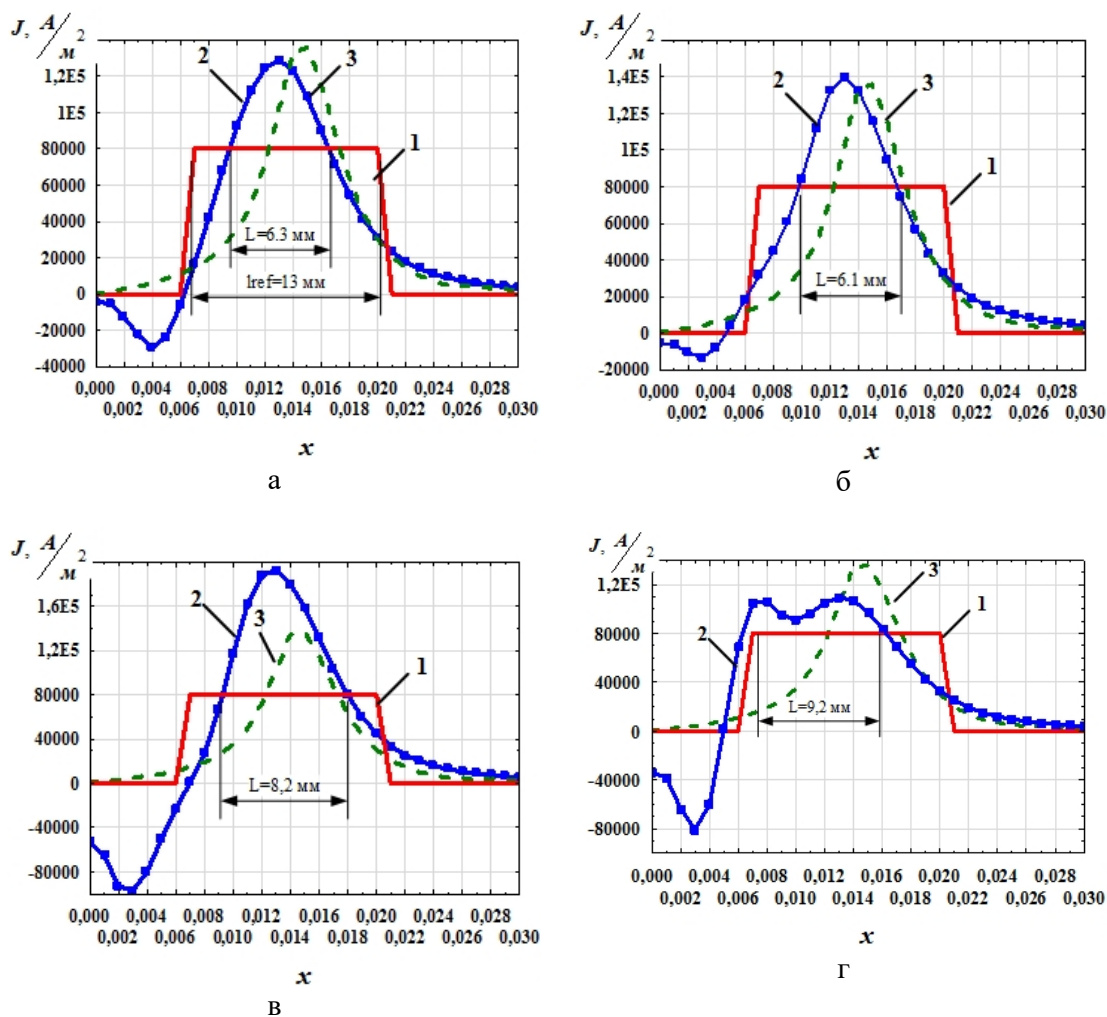
Решение этой задачи получено стохастическими алгоритмами поиска глобального экстремума, а именно гибридным на основе генетического с локальным поиском симплексным методом Нелдера-Мида и алгоритмом оптимизации роом частиц с эволюционным формированием состава роя, представляющим низкоуровневую гибридизацию генетического алгоритма и алгоритма PSO [22]. В результате предварительного анализа результатов синтеза отобраны несколько структур СВ, имеющих близкое к однородному распределение ПВТ в широкой зоне относительно заданной  $l_{ref}=13 \text{ мм}$ . Результаты численных экспериментов линейного синтеза объемных СВ НВТП представлены распределением ПВТ на рис. 2 (график 2) с указанием полученной ширины зоны контроля  $L$ , а параметры МДС для соответствующих катушек приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Результаты расчета параметров катушек различных структур объемной системы возбуждения НВТП**

$i$	Синтезированные системы возбуждения											
	вариант 1			вариант 2			вариант 3			вариант 4		
	$r_m$ , мм	$z_m$ , мм	$Iw$ , А×витки	$r_m$ , мм	$z_m$ , мм	$Iw$ , А×витки	$r_m$ , мм	$z_m$ , мм	$Iw$ , А×витки	$r_m$ , мм	$z_m$ , мм	$Iw$ , А×витки
1	5	2	-0,437	4	2,2	-0,334	3	2,3	-1,609	4,5	2,7	-2,915
2	8	2,5	-0,045	7	2,7	0,149	6	2,6	0,151	7	3,0	3,52
3	11	3	0,497	10	3,2	-0,492	9	2,9	-0,859	9,5	3,3	-1,688
4	14	3,5	1,174	13	3,7	2,061	12	3,2	2,05	12	3,6	0,965
5	-	-	-	-	-	-	15	3,5	0,783	14,5	3,9	0,89

Полученные результаты линейного синтеза СВ (рис.2) показывают, что наибольшую ширину, где распределение ПВТ на поверхности в зоне контроля близко к однородному, имеет структура с количеством катушек  $M=5$ . Сравнительный визуальный анализ ширины  $L$  распределения ПВТ (рис.2 г, график 2) и ее же, но полученной от одиночного витка в качестве источника поля возбуждения (рис.2 г, график 3),

однозначно указывает на лучшие результаты, полученные синтезированной объемной СВ. Наилучшие результаты имеет СВ (вариант 4, табл.1) для которой ширина однородной зоны  $L=9.2$  мм, что составляет 70,7 % от желаемого значения.



**Рисунок 2. Распределение ПВТ и ширина зоны контроля:**  
а, б) структура возбуждения с  $M = 4$ ; в, г) структура возбуждения с  $M = 5$ ;  
1 – заданное распределение ПВТ; 2 –распределение ПВТ от синтезированной СВ;  
3 – распределение ПВТ от одиночного витка

### 3. Заключение

Таким образом, в исследовании численными экспериментами показана эффективность решения задачи линейного суррогатного синтеза накладного вихретокового преобразователя с объемной структурой возбуждения, обеспечивающей равномерную чувствительность в зоне контроля в сравнении с планарной структурой СВ. При этом одинаковая ширина зоны контроля с почти однородным распределением ПВТ в ней достигается объемной СВ из пяти катушек, а планарной [13] – из семи.

Предложенные алгоритмы суррогатного линейного синтеза с использованием нейросетевых RBF-метамоделей позволяют получить объемную структуру СВ,

обеспечивающую приемлемую однородность распределения плотности вихревого тока в широкой зоне контроля. Полученные в исследовании результаты могут быть использованы как начальные в процедуре нелинейного синтеза с целью уточнения геометрических размеров компонентов структуры возбуждения, что, несомненно, скажется на снижении погрешности однородного распределения плотности вихревого тока в зоне контроля.

## Литература

1. Стеблев Ю.И. Синтез заданных характеристик вихретоковых преобразователей. Дефектоскопия, № 11, 1984, С. 12-20.
2. Стеблев Ю.И. Синтез вихретоковых преобразователей с заданной структурой возбуждающего поля в зоне контроля. Дефектоскопия, № 4, 1986, С. 58-64.
3. Гальченко В.Я., Воробьев М.А. Структурный синтез накладных вихретоковых преобразователей с заданным распределением зондирующего поля в зоне контроля. Дефектоскопия, № 1, 2005, С. 40–46.
4. Rosado L.S., Gonzalez J.C., Santos T.G., Ramos P.M., Piedade M. Geometric optimization of a differential planar eddy currents probe for non-destructive testing. Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 197, 2013, pp. 96-105.
5. Su Z., Efremov A., Safdarnejad M., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for near uniform interrogating field generation. AIP Conference Proceedings, Vol. 1650, 2015, pp. 405–413.
6. Su Z., Ye C., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 52, No. 1-2, 2016. pp. 315-322.
7. Repelianto A.S., Kasai N., Sekino K., Matsunaga M. A Uniform Eddy Current Probe with a Double-Excitation Coil for Flaw Detection on Aluminium Plates. Metals, No. 9, 2019, Article № 1116.
8. Liu Z., Yao J., He C., Li Z., Liu X., Wu B. Development of a bidirectional-excitation eddy-current sensor with magnetic shielding: Detection of subsurface defects in stainless steel. IEEE Sensors J, Vol. 18, No. 15, 2018. pp. 6203-6216.
9. Ye C., Udpa L., Udpa S. Optimization and Validation of Rotating Current Excitation with GMR Array Sensors for Riveted Structures Inspection. Sensors, Vol. 16, No. 9, 2016, Article № 1512.
10. Rekanos I.T., Antonopoulos C.S., Tsiboukis T.D. Shape design of cylindrical probe coils for the induction of specified eddy current distributions. IEEE Trans. Magnetics, Vol. 35, No. 3, 1999, pp. 1797-1800.
11. Гальченко В.Я., Трёмбовецкая Р.В., Тычков В.В. Линейный синтез несоосных накладных вихретоковых преобразователей. International Journal “NDT Days”. Vol. II, No. 3, 2019, С. 259-268. <http://www.bg-s-ndt.org/journal/vol2/JNDTD-v2-n3-a03.pdf>
12. Трёмбовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В. Оптимальний сурогатний параметричний синтез накладних кругових неспіввісних вихрострумівих перетворювачів із рівномірною чутливістю в зоні контролю. Вісник Херсонського національного технічного університету. Т. 69, № 2, частина 2, 2019, С. 118-125. <https://mkmm.org.ua/upload/Вісник%20ХНТУ%20частина%202.pdf>
13. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V., Storchak A.V. Nonlinear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes. Przegląd elektrotechniczny, No. 9, 2019, pp. 76-82. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2019.09.15>
14. Halchenko V.Ya., Trembovetskaya R.V., Tychkov V.V. Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. Electrical Engineering & Electromechanics, No. 1, 2019. Pp. 28-38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.05>
15. Trembovetska R.V., Halchenko V.Ya., Tychkov V.V.. Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 95, No. 5/5, 2018, pp. 39-46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143309>.

16. Itaya T., Ishida K., Tanaka A., Takehira N., Miki T. Eddy current distribution for a rectangular coil arranged parallel to a moving conductor slab. IET Science, Measurement & Technology, Vol. 6, No. 2, 2012, pp. 43–51.
17. Trembovetska R.V., Halchenko V.Y., Tychkov V.V. Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system. International Scientific Journal «Mathematical Modeling», Vol. 3, No. 4, 2019, pp. 113-116.  
<https://stumejournals.com/journals/mm/2019/4/113>
18. Гальченко В.Я., Трємбовецька Р.В., Тичков В.В.. Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен. Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, № 74, 2018, С. 60-72.  
DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.74.60-72>
19. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. 2nd Edition. O'Reilly Media, Inc. 2019. 856 p.
20. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V., Storchak A.V. The Construction of Effective Multidimensional Computer Designs of Experiments Based on a Quasi-random Additive Recursive  $R_d$ -sequence. Applied Computer Systems, Vol. 25, No. 1. 2020. pp. 70-76.  
DOI: <https://doi.org/10.2478/acss-2020-0009>
21. Бринк Х., Ричардс Дж., Феверолф М. Машинное обучение. Спб.: Питер. 2017. 336 с.
22. Гальченко В.Я., Якимов А.Н., Остапущенко Д.Л. Поиск глобального оптимума функций с использованием гибрида мультиагентной роевой оптимизации с эволюционным формированием состава популяции. Информационные технологии, № 9, 2010, С. 9-16.