



Linear Synthesis of Non-Axial Surface Eddy Current Probes

Vladimir Ya. HALCHENKO, Ruslana V. TREMBOVETSKAYA, Vladimir V. TYCHKOV

Department Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies,
Cherkassy State Technological University; Cherkassy, Ukraine
e-mail: halchvl@gmail.com, r.trembovetska@chdtu.edu.ua, tvvpanda@ukr.net

Abstract

Using metaheuristic algorithms for optimization of the search for a global extremum, a linear surrogate synthesis of surface circular eddy current probes with uniform sensitivity was performed. To implement the optimal synthesis problem, a metamodel of the surface eddy current probe was preliminarily constructed using artificial neural networks, namely RBF-neural networks. In the synthesis problem, the target function was formulated as a quadratic functional. The results of the obtained solution are presented in the form of the lines of the level of density distribution of eddy currents and the values of the absolute error of synthesis for various structures of excitation of the probe. The values of the reduced error in the testing zone of the probe for various structures are represented by the histogram of the distribution and the average value of this error. For the purpose of comparative analysis with the classical excitation system, for the obtained variants of the excitation structures, the width of the testing zone was determined with an error not exceeding a given 10% of the value.

Keywords: Linear Synthesis, Eddy-Current Probe, Eddy-Current Density, Surface Circular Eddy Current Probe

Линейный синтез несоосных накладных вихретоковых преобразователей

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

1. Введение

Задачи синтеза разнообразных технических систем с априори заданными свойствами представляют большой интерес во многих областях, но имеют существенные трудности при их решении. Рассмотрим несколько из них, которые присущи вихретоковому контролю изделий. Поскольку задача синтеза структуры возбуждения вихретокового преобразователя (ВТП) с однородной чувствительностью является обратной задачей электродинамики, а ее решение имеет некоторые особенности и трудности, то необходимо определить пути их решения. Топография целевой функции в задаче синтеза характеризуется многомерным «овражным» видом, что обусловлено некорректностью рассматриваемой задачи. Для анализа возбуждающей структуры в большинстве случаев используются численные решения электродинамических задач, представленных в интегральной или дифференциальной постановке с соответствующими начальными и граничными условиями, что требует весьма значительных вычислительных и временных затрат. А если учитывать, что анализ необходимо выполнить многократно для структуры возбуждения, обеспечивая расчет плотности вихревых токов (ПВТ) в совокупности точек как на поверхности в зоне контроля, так и в более глубоких слоях объекта контроля (ОК), то решение задачи синтеза становится практически невозможным. Не помогут исправить ситуацию и современные бионические метаэвристические алгоритмы оптимизации в которых используется алгоритмическая формулировка функции цели. Кроме этого нелегкой и

противоречивой задачей проектанта есть выбор методов поиска экстремумов целевой функции. Большинство известных детерминированных методов поиска неприменимы, поскольку ищут локальный оптимум и не приспособлены для работы в «овражных» ситуациях. Поэтому внимание необходимо сосредоточить на алгоритмах оптимизации, ищущих глобальный оптимум, а не локальный.

2. Исследование и результаты

Технология суррогатной оптимизации позволяет избежать проблемы критической ресурсоёмкости [1-2], а стохастические метаэвристические алгоритмы [3-5] находят глобальный оптимум, и неплохо зарекомендовали себя при поиске экстремумов многомерных «овражных» целевых функций.

Целью работы является линейный параметрический синтез несоосных вихретоковых преобразователей с равномерной чувствительностью в зоне контроля, обеспечивающийся стохастическим поиском глобального решения экстремальной задачи.

Необходимость уменьшить недостатки, присущие классическим конструкциям вихретоковых преобразователей [6-7], вызывает необходимость поиска новых технических решений, а именно, к созданию нестандартной конструкции в виде совокупности возбуждающих катушек. Это позволяет получить желательное равномерное распределение ПВТ в зоне контроля преобразователя и повысить чувствительность вихретокового метода. Для решения обратной задачи вихретокового контроля используется функция цели в ее классической квадратичной постановке:

$$F_{target} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^M J_{ik} - J_{reference} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $J_{reference}$ – желаемое значение модуля ПВТ в контрольной точке; J_{ik} – модуль ПВТ в контрольной точке ОК с номером i , созданная k -ой катушкой системы возбуждения накладного вихретокового преобразователя (НВП); N – количество контрольных точек в зоне; M – количество катушек в системе возбуждения кругового НВП.

Математическая модель зависимости распределения ПВТ J_{ik} от множества параметров для конкретного типа системы возбуждения ВТП получена аналитически решением прямой задачи электродинамики в виде дифференциальных уравнений Максвелла [8-11]. Но ее использование в задаче синтеза невозможно, поскольку ее вычислительная ресурсоемкость очень велика, например, расчет распределения ПВТ структуры возбуждения в виде витка круговой формы на поверхности ОК выполняется за 8-20 часов, а витка прямоугольной формы составляет 5-9 часов [12]. Решением этой проблемы является использование метамоделей [13-15]. Наибольшее распространение среди известных методов построения метамоделей получил алгоритм искусственных нейронных сетей. В данном исследовании RBF-нейронная сеть используется как аппроксиматор многомерной поверхности отклика. Для создания метамоделей в простейшем случае при изменении только двух переменных $J = f(x, y)$, оказалось достаточным использование архитектуры нейронной сети в виде одиночной RBF-сети, обеспечивающей удовлетворительное значение средней модельной погрешности (MAPE) в пределах 6 % на этапе обучения и до 9 % на этапе реконструкции. В случае построения метамоделей при вариации трех переменных x, y, r , полученные одинарные RBF-метамоделей не дают необходимую точность. Поэтому имеет смысл применение

дополнительных методов повышения точности нейросетевого решения [16]. Так, используя построение нейронной сети в виде комитета, удалось добиться лишь незначительного уменьшения погрешности на 4-9 % на этапах обучения и реконструкции, что тоже не может быть принято, как хороший результат. В случае построения сети в виде композита нейронных сетей значение $MAPE$ уменьшается почти в 2 раза как на этапе обучения, так и на этапе реконструкции [1]. Таким образом, построение метамоделей многомерной поверхности отклика с использованием комитетов и каскадов нейронных сетей позволяет уменьшить значение $MAPE$ в сравнении с одиночной сетью, но в то же время не обеспечивает каждому в отдельности высокой точности аппроксимации.

Для построения функции-заместителя использовались совокупности ЛП_r-последовательностей Соболя $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{52}$, обеспечивая план эксперимента с равномерным компьютерным заполнением точками многомерного пространства поиска $N_{реконстр.}$ [17, 1-2].

При следующих исходных данных табл. 1, рассматривается модельный пример синтеза кругового несоосного НВТП, где на первом этапе задачи синтеза создаётся метамоделю неподвижного преобразователя ($v_x = 0$ м/с; $v_y = 0$ м/с).

Таблица 1 – Исходные данные для построения метамоделю НВТП

Толщина токопроводящего материала ОК	$d = 10$ мм
Высота расположения витка над ОК	$z_0 = 3$ мм
Частота	$f = 1$ кГц
Электрофизические параметры материала	$\sigma = 3,745 \cdot 10^7$ См/м, $\mu_r = 1$

RBF-метамоделю строилась при условии вариации параметров: диапазон пространственных координат $x = 0 \dots 30$ мм; $y = 0 \dots 30$ мм; радиусы катушек возбуждения $r = 2 \dots 15$ мм. С целью максимального повышения точности аппроксимации построение метамоделю выполнено с предварительной декомпозицией пространства поиска на три подобласти. Аппроксимационные зависимости получены для каждой подобласти с использованием композита нейронных сетей, а на последнем этапе композита применен комитет из сетей, производительность которых больше 90 %.

Такое построение нейронных сетей позволило уменьшить $MAPE$ от 1,62 до 2,25 раза в сравнении с начальной одиночной нейронной сетью. Для примера в поддиапазоне $2 \leq r < 6$ мм одиночная сеть RBF-3-299-1, которая взята в качестве начальной для построения композита, имеет $MAPE$ – 11,49 % и 13,12 % соответственно на этапах обучения и реконструкции. Значение погрешности $MAPE$ для каждого поддиапазона, которое удалось достичь с помощью композит-комитета нейронных сетей, представлены в табл.2.

Таблица 2 – Выборочные показатели оценки адекватности метамоделю кругового неподвижного НВТП

Декомпозиционные подобласти	Метамоделю, составляющие гибрида «композит-комитета» нейросетей J_{Σ}	$N_{обуч.}/N_{реконс.}$	MAPE, %	
			Этап обучения	Этап реконструкции
$2 \leq r < 6$ мм	RBF-3-297-1(4); RBF-3-298-1(9); RBF-3-299-1(12); RBF-3-306-1(48)	1036/ 2060	5,38	6,76
$6 \leq r < 11$ мм	RBF-3-326-1(3);	1299/	4,48	4,8

	RBF-3-329-1(20); RBF-3-326-1(42); RBF-3-332-1(80)	2575		
$11 \leq r \leq 15$ мм	RBF-3-297-1(1); RBF-3-301-1(22); RBF-3-309-1(63)	1040/ 2061	3,56	4,78

Кроме погрешности $MAPE$, оценивались и другие объективные показатели, характеризующие адекватность и информативность полученной метамоделли, а именно: сумма квадратов остатков SS_R , средний квадрат остатков MS_R , коэффициент детерминации R^2 , отношение стандартных отклонений $S.D.ratio$.

Таким образом, построена RBF-метамоделль НВТП для простейшего случая, когда он неподвижен. Используя полученную метамоделль для расчета одной из составляющих целевого функционала (1), далее решается задача линейного оптимального синтеза. Для решения задачи синтеза преобразователя исходными данными является априори заданное распределение ПВТ $J_{reference}$ в зоне на поверхности ОК (рис.1). В рамках линейного оптимального синтеза, чтобы получить такое П-образное распределение ПВТ или близкое к нему с минимально возможной погрешностью, определялась магнитодвижущая сила (МДС) Iw_k каждой катушки системы возбуждения. При этом структура системы возбуждения, т.е. координаты размещения катушек в пространстве и их количество $M=var$, определялась интуитивно.

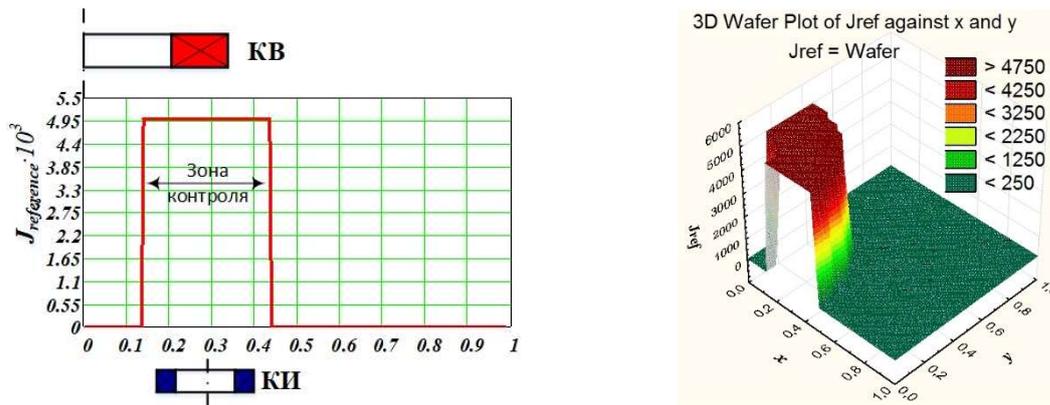


Рис. 1 Распределение ПВТ на поверхности ОК несоосного НВТП:
КВ–катушка возбуждения, КИ–катушка измерительная

Пусть структура возбуждения имеет M катушек радиусами r_k ($k = 1 \dots M$), которые расположены равномерно или неравномерно на одинаковой высоте z_0 над ОК. Катушки подключаются встречно или согласно и могут иметь разное количество витков w_k , а питающий ток I может быть одинаков для всех катушек системы возбуждения.

На рис.2 проиллюстрирован результат линейного синтеза несоосного НВТП, имеющего П-образное распределение ПВТ:

$$J_{reference} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq r \leq 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; r > 14,55 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ 5000 \text{ А/М}^2 & \text{при } 4,5 \cdot 10^{-3} < r \leq 14,55 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{cases}$$

Решение такой обратной задачи выполнено с помощью оптимизационных алгоритмов, которые дают хороший результат при поиске экстремумов многомерных целевых функций, имеющих «овражный» вид [4, 5]. Использовались такие алгоритмы как генетический, гибридный алгоритм на основе генетического с локальным поиском симплексным методом Нелдера-Мида, алгоритм роя частиц PSO-RND со стратегией случайной топологии связей. Но наилучшие результаты синтеза получены с использованием алгоритма оптимизации роем частиц с эволюционным формированием состава роя, представляющего собой низкоуровневую гибридизацию генетического алгоритма и алгоритма PSO [3].

В исследованиях выполнен параметрический линейный синтез для структур возбуждения, имеющих от четырех до семи катушек, расположенных в пространстве как равномерно, так и неравномерно. В результате предварительного анализа результатов синтеза определены несколько структур возбуждения с удовлетворительным значением приведенной погрешности в зоне контроля. Так структура возбуждения, состоящая из $M=5$ катушек с радиусами $r_k=4\cdot 10^{-3}$; $6,625\cdot 10^{-3}$; $9,25\cdot 10^{-3}$; $11,875\cdot 10^{-3}$; $14,5\cdot 10^{-3}$ м с равномерным их расположением, имеет среднюю приведенную погрешность в зоне контроля 8,95 %, а структура с неравномерным расположением катушек $r_k=4\cdot 10^{-3}$; $6\cdot 10^{-3}$; $10\cdot 10^{-3}$; $13\cdot 10^{-3}$; $14,5\cdot 10^{-3}$ м – 11,25 %. Тогда как структура $M=6$ обеспечивает среднюю приведенную погрешность в зоне контроля 10,36 % при равномерном расположении катушек с радиусами $r_k=4\cdot 10^{-3}$; $6,1\cdot 10^{-3}$; $8,2\cdot 10^{-3}$; $10,3\cdot 10^{-3}$; $12,4\cdot 10^{-3}$; $14,5\cdot 10^{-3}$ м и соответственно 10,92 % с неравномерным их расположением с радиусами $r_k=4\cdot 10^{-3}$; $6,5\cdot 10^{-3}$; $9\cdot 10^{-3}$; $11\cdot 10^{-3}$; $13\cdot 10^{-3}$; $14,5\cdot 10^{-3}$ м. Общее количество равномерно расположенных контрольных точек в зоне адекватности метамоделей $(x \times y) = (30 \times 30)$ мм составляет 210.

Результаты численных экспериментов линейного синтеза НВТП представлены линиями уровня распределения ПВТ на рис. 2, а параметры МДС для соответствующих катушек в табл. 3. Абсолютное значение погрешности полученного решения показано линиями уровня на рис. 3 а, в, д, ж. Значения приведенной погрешности в зоне контроля преобразователя $4,5 \text{ мм} \leq r \leq 14,55 \text{ мм}$ структур возбуждения с различной конфигурацией расположения катушек представлено гистограммой распределения на рис. 4 б, г, е, з.

Таблица 3 – Результаты расчета параметров катушек различных структур системы возбуждения НВТП

Параметры k-й катушки системы	1	2	3	4	5	6
$\frac{I_{W_k}}{r_k \cdot 10^{-3}}, \frac{A \times \text{turn}}{m}$	$\frac{-1,832}{4}$	$\frac{1,690}{6,625}$	$\frac{-0,587}{9,25}$	$\frac{1}{11,875}$	$\frac{-0,043}{14,5}$	-
	$\frac{-0,757}{4}$	$\frac{1,059}{6}$	$\frac{0,093}{10}$	$\frac{0,877}{13}$	$\frac{-0,282}{14,5}$	-
	$\frac{-0,533}{4}$	$\frac{-0,058}{6,1}$	$\frac{1,138}{8,2}$	$\frac{-0,830}{10,3}$	$\frac{1,215}{12,4}$	$\frac{-0,173}{14,5}$
	$\frac{-0,991}{4}$	$\frac{0,975}{6,5}$	$\frac{0,863}{9}$	$\frac{-1,822}{11}$	$\frac{2,290}{13}$	$\frac{-0,763}{14,5}$

На рис 2 обозначено: а) структура $M = 5$ с равномерным расположением катушек; б) структура $M = 5$ с неравномерным расположением катушек; в) структура $M = 6$ с равномерным расположением катушек; г) структура $M = 6$ с неравномерным расположением катушек.

Кроме погрешности синтеза (рис. 3), не менее важным показателем качества полученного решения можно считать ширину зоны контроля, характеризующуюся погрешностью, не превышающей некоторого заданного значения. При этом ширина зоны, полученная с помощью синтезированной системы возбуждения, сравнивается с шириной зоны, которую обеспечивает одиночный виток.

Одиночный виток с радиусом в диапазоне 2 – 14,5 мм обеспечивает ширину зоны контроля, например, на уровне 10 % погрешности от максимального значения, примерно 0,0507 – 0,08203 отн.ед. или 1,52 – 2,46 мм (рис. 4 а).

На рис. 4 б-д показаны результаты распределения ПВТ для синтезированных структур возбуждения (см. табл. 3) с указанием полученной ширины зоны контроля на уровне 10 % погрешности.

Структура возбуждения, состоящая из $M = 5$ катушек с равномерным их расположением, имеет ширину зоны в 1,715 большую чем у одного витка, а при неравномерном расположении ширина зоны незначительно увеличивается всего лишь в 1,28 раза (рис. 4 б, в). Также имеется увеличение ширины зоны контроля при использовании структуры из шести катушек. А именно, ширина зоны для структуры возбуждения с равномерным расположением катушек составляет $I_{\text{сист.витк.}} = 0,1328$ отн. ед., что в 1,62 раза больше, чем у одного витка и в случае неравномерного расположения увеличение составляет 2,09 раза.

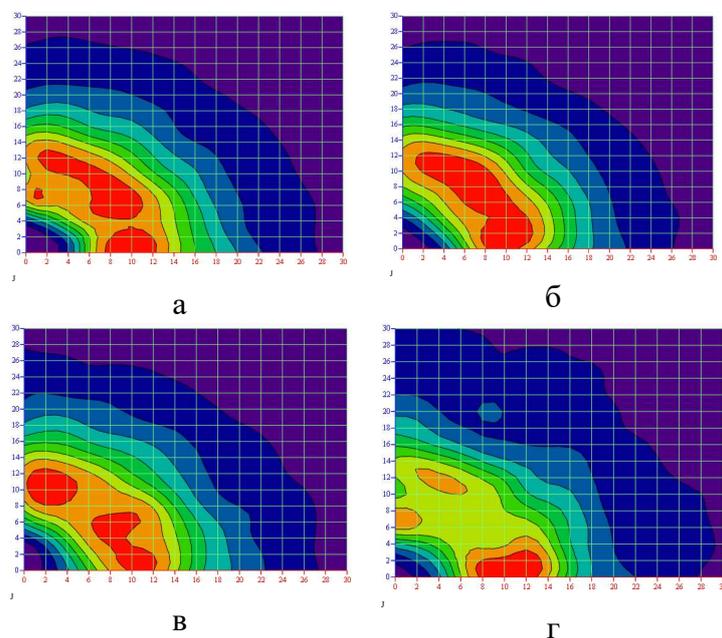
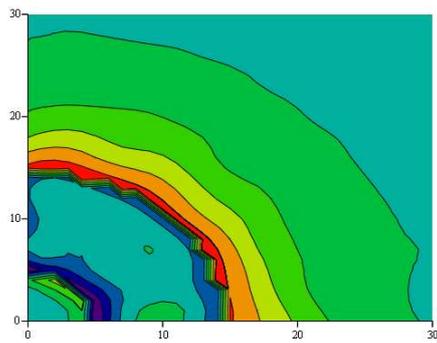
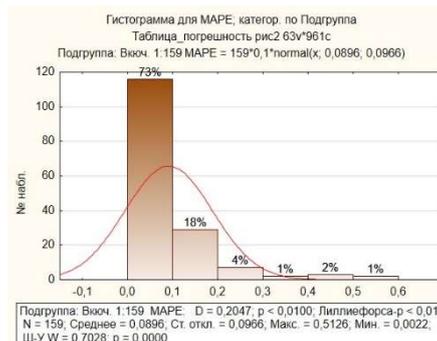


Рис. 2 Распределение ПВТ, полученное в результате линейного синтеза структур возбуждения ВТП

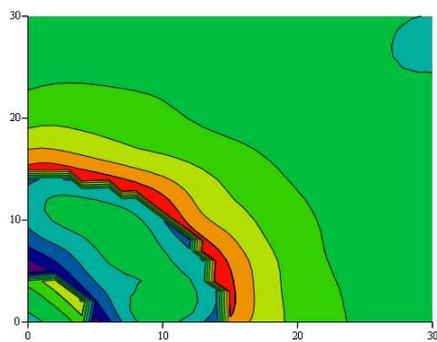


а

а

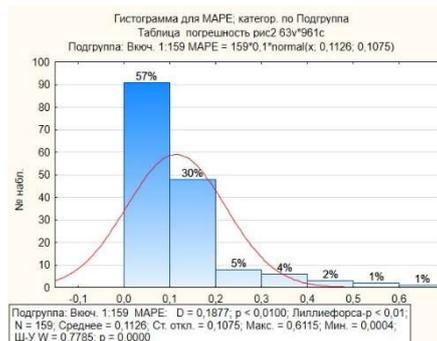


б

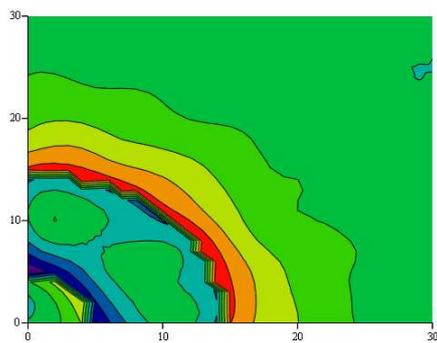


в

в

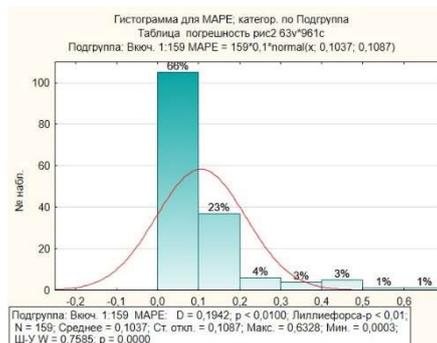


г

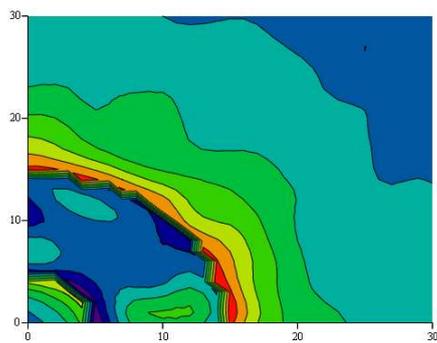


д

д

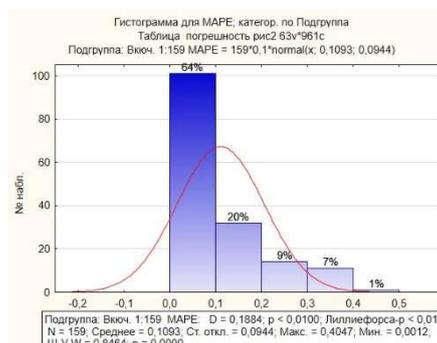


е



ж

ж



з

Рис. 3 Значения приведенной погрешности в виде линий уровня и гистограммы распределения:
а, б) структура $M = 5$ с равномерным расположением катушек;
в, г) структура $M = 5$ с неравномерным расположением катушек;
д, е) структура $M = 6$ с равномерным расположением катушек
ж, з) структура $M = 6$ с неравномерным расположением катушек

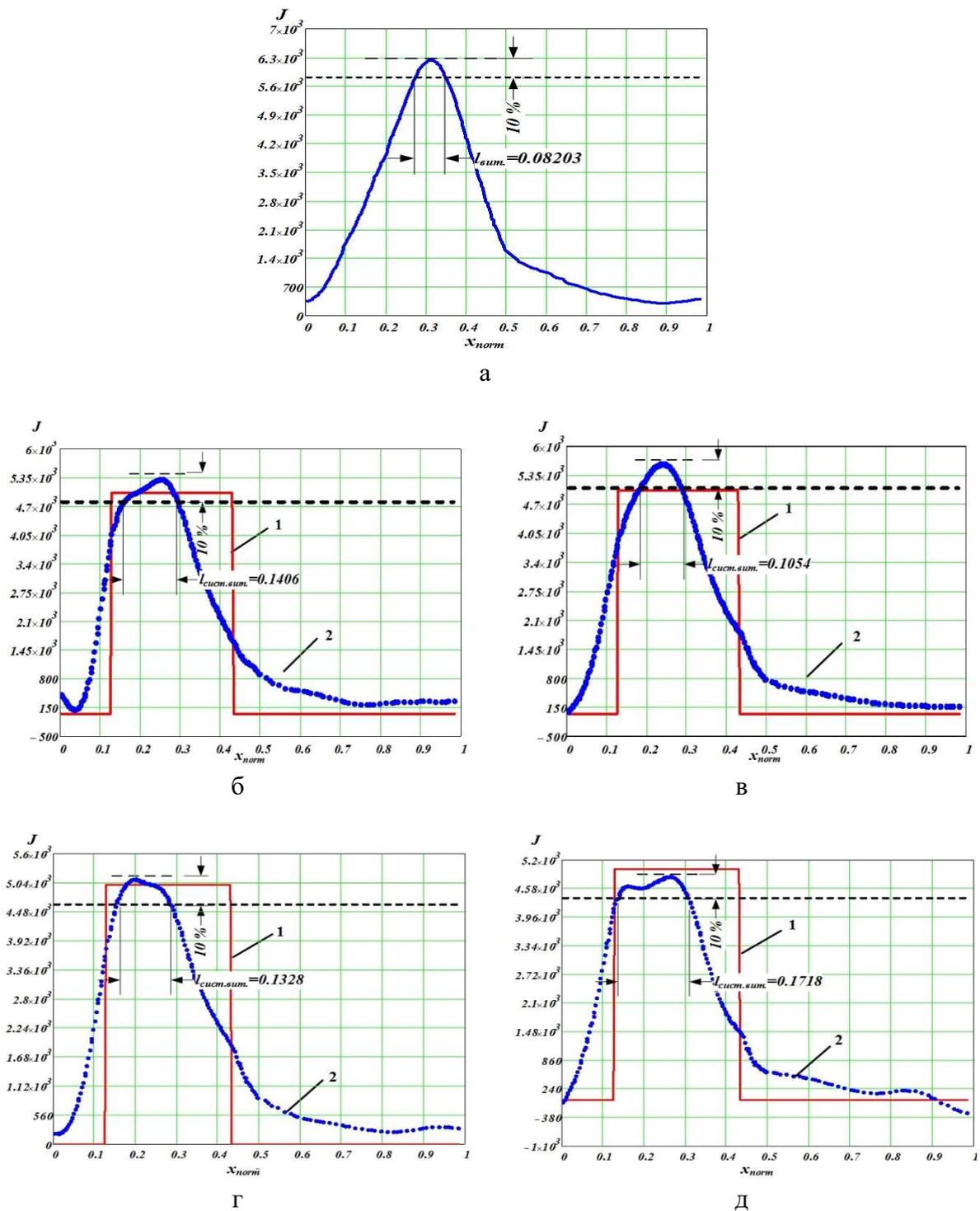


Рис. 4 Распределение ПВТ и ширина зоны контроля: а) один виток радиусом 12 мм; б) структура возбуждения $M = 5$ с равномерным расположением катушек; в) структура $M = 5$ с неравномерным расположением катушек; (1 – заданное распределение ПВТ; 2 – синтезированное распределение ПВТ) г) структура $M = 6$ с равномерным расположением катушек; д) структура $M = 6$ с неравномерным расположением катушек; (1 – заданное распределение ПВТ; 2 – синтезированное распределение ПВТ)

3. Заключение

Таким образом, в исследовании численными экспериментами проиллюстрировано эффективность линейного суррогатного синтеза НВТП, обеспечивающего равномерную чувствительность в зоне контроля. Предложенные нейросетевые метамодел и алгоритмы суррогатного линейного синтеза позволяют получить приемлемую точность синтезированных структур возбуждения в зоне контроля. Использование системы катушек позволяет расширить ширину зоны контроля с заранее регламентированной погрешностью.

Литература

1. Halchenko V.Ya., R.V. Trembovetska, V.V. Tychkov. Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. *Electrical Engineering & Electromechanics*, №1, 2019, p. 28-38.
2. Halchenko V.Ya., R.V. Trembovetska, V.V. Tychkov. The RBF-metamodel development of surface eddy-current probe for the surrogate optimal synthesis problem. *International Journal "NDT Days"*, 1, №4, 2018, p. 425-433.
3. Гальченко В.Я., А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко Поиск глобального оптимума функций с использованием гибрида мультиагентной роевой оптимизации с эволюционным формированием состава популяции. *Информационные технологии*. №9, 2010, с. 9-16.
4. Gal'chenko V.Y., A.N. Yakimov, D.L. Ostapushchenko. Pareto-optimal parametric synthesis of axisymmetric magnetic systems with allowance for nonlinear properties of the ferromagnet. *Technical Physics*, 82, №7, 2012, p. 1-7.
5. Galchenko V.Ya., A.N. Yakimov. A turmitobionic method for the solution of magnetic defectometry problems in structural-parametric optimization formulation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, №2, 2014, p. 10-24.
6. Gal'chenko V.Ya., M.A. Vorob'ev. Structural Synthesis of Attachable Eddy-Current Probes with a Given Distribution of the Probing Field in the Test Zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 41, №1, 2005, p. 29–33.
7. Halchenko V.Ya., O.K. Pavlov, M.O. Vorobiov. Neliniyni syntez mahnitnykh poliv zbudzhennia vykhrostru movykh peretvoriuvachiv defektoskopiv. *Metody i pryklady kontroliu yakosti*, №8, 2002, p. 3-5.
8. Itaya T., K. Ishida, Ya. Kubota, A. Tanaka, N. Takehira. Visualization of eddy current distributions for arbitrarily shaped coils parallel to a moving conductor slab. *Progress In Electromagnetics Research M*, 47, 2016, p. 1-12
9. Itaya T., K. Ishida, A. Tanaka, N. Takehira, T. Miki. Eddy current distribution for a rectangular coil arranged parallel to a moving conductor stab. *IET Science, Measurement & Technology*, 6, №2, 2012, p. 43–51.
10. Ishida K., T. Itaya, A. Tanaka, N. Takehira. Magnetic field analysis of an arbitrary shaped coil using shape functions. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45, №1, 2009, p. 104–112.
11. Theodoulidis T., J.R.Bowler. Interaction of an eddy-current coil with a right-angled conductive wedge, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, p. 1034–1042.
12. Trembovetska R.V., V.Ya. Halchenko, V.V. Tychkov. Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 95, №5/5, 2018, p. 39-46.
13. Bilicz S., M. Lambert, S. Gyimothy, J. Pavo. Solution of inverse problems in nondestructive testing by a kriging-based surrogate model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48, №2, 2012, p. 495-498.
14. Couckuyt I., F. Declercq, T. Dhaene, H. Rogier, L. Knockaert. Surrogate-based infill optimization applied to electromagnetic problems, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 20, №5, 2010, p. 492-501.
15. Wang S., S.L. Huang, Q. Wang, L.S. Peng, W. Zhao. Accelerated optimizations of an electromagnetic acoustic transducer with artificial neural networks as metamodels, *Journal of sensors and sensor systems*, 6, №2, 2017, p. 269-284.

16. Трємбовецька Р.В., В.Я. Гальченко, В.В. Тичков. Методи покращення точності нейромережєвих метамоделей накладних вихрострумєвих перетворювачів для сурогатного синтезу. Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union (NDT-UA 2018) Conference proceedings. – Poland: USNDT, №2, 2018, p. 47-49.
17. Гальченко В.Я., Р.В. Трємбовецька, В.В. Тичков. Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен. Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, №74, 2018, с. 60-72.