

УДК 620.179

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ПЛИННОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА ЗНАЧЕННЯМИ ЇХ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

Є.Р. Доценко, М.О. Карнаш, О.М. Карнаш

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська,
15, м. Івано-Франківськ, тел.(380-342)504708, e-mail: dotsenko@nung.edu.ua*

Представлені результати лабораторних випробувань експериментальної установки для визначення питомого електричного опору конструкційних сталей. Описано конструкцію електроконтактного чотиризондового вимірювального перетворювача, принцип роботи експериментальної установки. Розкрито спосіб визначення границі плинності сталей за значеннями їх питомого електричного опору і твердості, а також подано результати експериментального досліджень на сталених зразках.

Ключові слова: питомий електричний опір, твердість, границя плинності, конструкційна сталь, нейронні мережі.

Представлены результаты лабораторных испытаний экспериментальной установки для определения удельного электрического сопротивления конструкционных сталей. Описана конструкция электроконтактного четырехзондового измерительного преобразователя, принцип работы экспериментальной установки. Раскрыт способ определения предела текучести сталей по значениям их удельного электрического сопротивления и твердости, а также поданы результаты экспериментальных исследований на стальных образцах.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, твердость, предел текучести, конструкционная сталь, нейронные сети.

The results of laboratory test of the experimental plant for determining the resistivity of structural steels are given. The design of the four-point sensor, the principle of the experimental setup are described. The method of determining the yield strength steels by using electrical resistivity and hardness is exposed. The results of experimental studies on steel samples are given.

Keywords: electrical resistivity, hardness, yield strength, structural steel, neural network.

Проблема визначення фактичного напруження плинності матеріалу сталевих конструкцій, що перебувають в довготривалій експлуатації, є надзвичайно актуальною з точки зору забезпечення їх безпечної експлуатації. Раніше авторами [1] було запропоновано метод контролю механічних характеристик за кількома інформативними параметрами, такими як твердість, питома теплопровідність та питомий електричний опір. Причому було показано, що за добуток теплопровідності та питомого електричного опору принципово можна визначити до якої структурної групи відноситься та чи інша сталь, а точність визначення механічних характеристик в межах структурної групи за трьома інформативними параметрами може збільшитися в 2-3 рази.

Однією з основних перешкод у практичній реалізації запропонованого методу є відсутність технічних засобів для вимірювання питомого електричного опору феромагнітних

конструкційних сталей. Наявні вихрострумові прилади контролю питомої електропровідності поширюються тільки на немагнітні матеріали [2]. Тому першочерговим було поставлено завдання розробити експериментальну установку для визначення питомого електричного опору сталей. Теоретичні дослідження показали, що для вирішення такої задачі найбільш доцільно використати чотиризондовий електроконтактний метод на постійному струмі, оскільки при цьому магнітна проникність металу не впливає на результати вимірювання [3].

З метою підвищення достовірності визначення питомого електричного опору було проведено математичне моделювання процесу контролю питомого опору чотиризондовим методом, завдяки чому були визначені аналітичні залежності, які описують вплив кінцевих розмірів сталевих конструкцій на результати вимірювання [4].

Метою даної роботи є розробка і виготовлення експериментальної установки для визначення питомого електричного опору сталей та встановлення характеру залежності границі плинності від інформативних параметрів (питомого електричного опору та твердості) для лабораторної апробації нового методу контролю механічних характеристик конструкційних сталей.

Принцип чотиризондового методу вимірювання питомого електричного опору полягає в наступному. На поверхні об'єкта контролю вздовж однієї прямої лінії розміщують чотири металеві електроди-зонди з невеликою площею контакту. Через два зовнішніх зонди пропускають електричний струм, генерований джерелом постійного струму. На двох внутрішніх зондах вимірюють падіння напруги. За вимірним значенням різниці потенціалів та струму можна визначити величину питомого електричного опору матеріалу зразка [4].

В конструктивному плані експериментальна установка для вимірювання питомого електричного опору чотиризондовим методом [5] повинна містити контактний та вимірювальний блоки. Вимоги, які пред'являються до контактної частини, є наступними: а) оптимальні розміри взаємного розташування зондів для досягнення високої чутливості методу; б) односторонній доступ до поверхні об'єкта контролю; в) висока міцність матеріалу зондів-електродів. Вимоги, які пред'являються до вимірювального блоку: а) високий вхідний опір вимірювача напруги; б) можливість вимірювання низьких значень активного електричного опору.

В якості вимірювального блоку було вибрано атестований мікроомметр, оскільки принцип вимірювання електричного опору базується саме на чотиризондовому методі. Окрім того, теоретичні дослідження показали, що для визначення малих значень питомого електричного опору сталей з похибкою 10 нОм·м пристрій для вимірювання опору повинен представляти собою мікроомметр.

На попередніх етапах експериментальних досліджень контакт з об'єктом контролю (ОК) здійснювався за допомогою використання двох зажимних струппин, при цьому сила вдавлювання контактних наконечників регулювалася за допомогою динамометричного ключа [6]. Проте такій реалізації контактної частини були притаманні ряд недоліків. По-перше, вся операція щодо забезпечення контакту з ОК була досить тривалою і вимагала певних навичок в оператора, який здійснював контроль.

По-друге, обов'язково повинен бути забезпечений двосторонній доступ до об'єкта контролю, що не давало можливості проводити вимірювання на реальних сталевих конструкціях.

Тому, провівши аналіз літературних джерел та здійснивши математичне моделювання процесу контролю питомого електричного опору [4], було запропоновано нову конструкцію чотиризондового вимірювального перетворювача з одностороннім доступом до поверхні об'єкта контролю (рис.1).

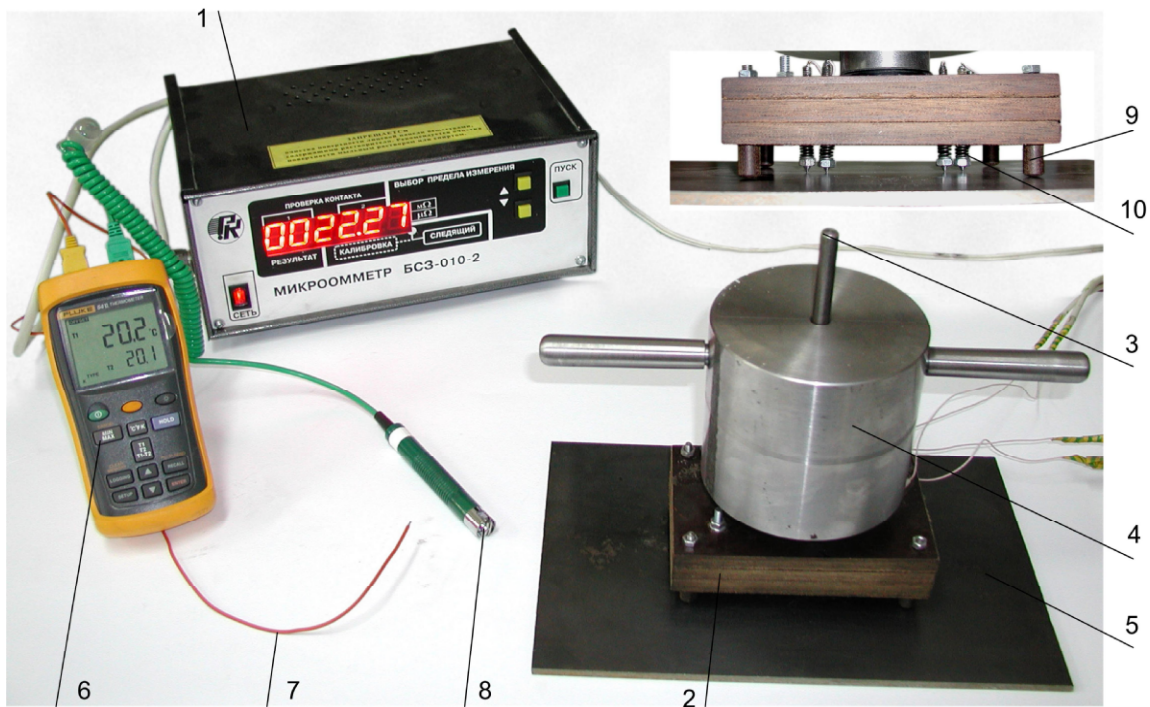
Діаметр зондів становить 5 мм. Відстань між внутрішніми потенціальними (вимірювальними) зондами становить 60 мм, а між струмовими та відповідними їм потенціальними зондами – 10 мм. Такі лінійні розміри системи зондів отримані у ході математичного моделювання і є оптимальними з точки зору збільшення чутливості чотиризондового методу, що являється доцільним для вимірювання малих значень питомого опору сталей [4].

Підпружинення упор 9 та зондів 10 дозволяє самовстановлюватись корпусу та лінії зондів відносно досліджуваної поверхні з урахуванням її незначних нерівностей. Окрім того, зонди та упори виконуються з можливістю осьового переміщення відносно корпусу, що дозволяє проводити вимірювання питомого електричного опору на циліндричних поверхнях, наприклад, трубах.

До переваг нової конструкції чотиризондового вимірювального перетворювача слід віднести: підвищену чутливість, зменшення операційного часу для проведення контролю, односторонній доступ до поверхні ОК.

Методика визначення питомого електричного опору за допомогою розробленої експериментальної установки полягає в наступному. Чотиризондовий вимірювальний перетворювач без вантажу встановлюють на попередньо підготовлену досліджувану поверхню ОК та чітко позиціонують його положення відносно неї. Гайками, нагвинченими на упори, відрегульовують положення корпусу разом із зондами так, щоб забезпечити попередній зазор 1...2 мм між ними і поверхнею. У разі необхідності осьове положення зондів регулюють гайками, нагвинченими на них. При цьому необхідно зберегти паралельність умовної лінії, що проходить через кінці зондів та вимірювальної площини.

У випадку вимірювання питомого електричного опору на поверхнях циліндричної форми необхідно забезпечити паралельність умовної лінії та твірної циліндричної поверхні.



1 – мікроомметр; 2 – чотиризондовий вимірювальний перетворювач; 3 – стрижень; 4 – навантажувальна гантель; 5 – об'єкт контролю; 6 – цифровий термометр; 7 – точкова термопара; 8 – контактна термопара; 9 – підпружинені упори; 10 – підпружинені зонди-електроди

Рисунок 1 - Загальний вигляд експериментальної установки

Після цього плавно насаджують навантажувальну гантель на стрижень. В результаті цього пружини на упорах стискуються, забезпечуючи самовстановлення корпусу на вимірювальній поверхні. Таким чином встановлюється стабільний електричний контакт зондів із ОК, що робить установку готовою для вимірювання.

У випадку розміщення чотиризондового вимірювального перетворювача у центрі прямокутного зразка, при якому зонди розміщені вздовж центральної лінії паралельній довшій стороні зразка, питомий електричний опір розраховується за формулою [4]:

$$\rho = 2\pi R S f(m, a/S, b/S, h/S), \quad (1)$$

де R – покази мікроомметра; $f(m, a/S, b/S, h/S)$ – геометрична функція поправки, яка залежить від реальних кінцевих розмірів (довжини a , ширини b та товщини h) прямокутного зразка та від співвідношення лінійних розмірів системи зондів.

Для даної конструкції датчика $m = S_2 / S = 6$, де S_2 – відстань між

потенціальними зондами, яка рівна 60 мм, S – відстань між струмовими та відповідними їм потенціальними зондами, яка становить 10 мм.

В результаті проведеного математичного моделювання шляхом застосування методу дзеркальних відображень було отримано формулу для розрахунку геометричної функції поправки [4]:

$$f\left(m, \frac{a}{S}, \frac{b}{S}, \frac{h}{S}\right) = \left(\frac{-2m}{m+1} + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} [(-1)^k \times \left\{ 2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S) \pm 1)^2 + 4q^2(h/S)^2]^{1/2} - \left\{ -2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S) \pm [m+1])^2 + 4q^2(h/S)^2]^{1/2} \right\} \right] \right)^{-1}, \quad (2)$$

де k, n, q – кількість рівнів уявних джерел струму, які вводяться для просторової побудови системи дзеркальних відображень у тривимірній системі координат з метою виконання на всіх гранях зразка однорідної умови Неймана (нормальна складова густини струму на всіх гранях рівна 0).

Для практичних розрахунків достатньо, щоб максимальна кількість рівнів k, n, q була не меншою 30.

Адекватність формули для розрахунку питомого електричного опору прямокутних зразків була перевірена на сталених зразках різних геометричних розмірів.

Методика проведення експериментальних досліджень щодо визначення фізико-механічних характеристик сталей була наступною. Було відібрано 14 повнорозмірних зразків конструкційних сталей, з них 8 плоских зразків прямокутної форми та 6 зразків, вирізаних з труб нафтогазового сортаменту.

На кожному зразку було проведено 10-кратні вимірювання твердості контактно-резонансним твердоміром ТД-32 та активного електричного опору розробленою експериментальною установкою. На очищену від забруднень та механічно зачищену в місці контакту зондів і шупа твердоміра поверхню ОК прикладають чотиризондовий вимірювальний перетворювач. При цьому датчик розміщують по центру зразка, лінія зондів повинна бути розміщена вздовж центральної лінії, паралельній довшій стороні зразка (у випадку трубних зразків – вздовж твірної).

Вимірювання проводились в однакових лабораторних умовах при температурі $20 \pm 0,3^\circ\text{C}$. Виміряне значення електричного опору висвітлюється на цифровому табло мікроомметра (рис.1). Розрахунок питомого електричного опору здійснювався за формулами (1) і (2). Границя плинності була визначена шляхом проведення руйнівних випробувань на розтяг стандартних пропорційних зразків, виготовлених з повнорозмірних зразків, на розривній машині згідно [7]. Осереднені результати вимірювань наведено в табл.1.

На рис. 2 і 3 зображено графіки залежностей границі плинності від твердості та питомого електричного опору відповідно. Також на цих рисунках зображено криві апроксимації.

Параметри апроксимації були наступними:

1) залежність границі плинності від твердості апроксимована функцією вигляду $f(x) = ax + b$, де $a=2,03$, $b = - 6,83$. Середнє квадратичне відхилення (СКВ) апроксимації становить 40,45 МПа. Коефіцієнт кореляції між границею плинності та твердістю становить 0,91;

2) залежність границі плинності від питомого електричного опору апроксимована функцією вигляду $f(x) = a \cdot \exp(bx)$, де $a=156,03$, $b=2,69 \cdot 10^{-3}$. СКВ апроксимації становить 71,51 МПа. Коефіцієнт кореляції між границею плинності та питомим електричним опором становить 0,69.

Види функцій апроксимації зображених вище залежностей, окрім випадку твердості, носять нелінійний характер. Крім того, залежності границі плинності від інформативних параметрів носять прямо-пропорційний характер, що узгоджується із раніше встановленими теоретично кореляційними залежностями [1]. Теоретичне значення коефіцієнту кореляції між питомим електричним опором та границею плинності для феритно-перлітних (дулексних) сталей (сталеві конструкції нафтогазового сортаменту) становить 0,76 (експериментальні значення коефіцієнту кореляції 0,69).

Враховуючи те, що коефіцієнти кореляції вказують на нелінійний характер залежності границі плинності від твердості та питомого електричного опору, то є доцільним апроксимувати границю плинності, враховуючи твердість та питомий електричний опір у комплексі. Таку задачу успішно можуть вирішувати сучасні алгоритми штучних нейронних мереж (ШНМ) – [8]. Алгоритми нейронних мереж передбачають процедуру так званого “навчання” і тестування правильності навчання. Нейронна мережа заданої будови тренувалась для розв’язання задачі апроксимації границі плинності як функції двох вимірюваних параметрів - твердості та питомого електричного опору. Шляхом порівняння тестових виходів натренованих нейронних мереж можна визначити яка структура мережі є оптимальною. Критерієм відбору є мінімальна похибка визначення границі плинності на тестових зразках.

Для двох вхідних параметрів було здійснено тренування нейронних мереж чотирьох різних архітектур (10 x 1; 12 x 1; 14 x 1; 16 x 1). Наприклад, архітектура (12 x 1) означає, що в першому прихованому шарі міститься 12 нейронів, у другому – 1.

Підготовка даних (як вхідних, так і вихідних) здійснювалась за стандартною процедурою нормування для одержання значень параметрів у межах (0 ÷ 1). Як тренувальний алгоритм в усіх мережах використовувався алгоритм Левенберга-Марквардта [9], який використовується для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням.

Найкраще здатною до апроксимації границі плинності від комплексу вхідних параметрів виявилася ШНМ з архітектурою 10x1. Результати тестування нейронної мережі наведено в табл. 2.

Таблиця 1 - Результати експериментальних досліджень щодо визначення інформативних параметрів і границі плинності

Позначення зразка	h/S	a/S	b/S	Геометрична функція поправки f , ум.од	Електричний опір R , ($\times 10^{-6}\text{Ом}$)	Питомий електричний опір ρ , ($\times 10^{-9}\text{Ом}\cdot\text{м}$)	Твердість за шкалою Брінеля, НВ	Границя плинності σ_T , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1П	1	34,6	9	0,2037	13,97	178	141,5	238
2П	1,42	35	19,5	0,3156	10,00	198	114,9	251
3П	1,47	33	3	0,1523	27,97	267	122,2	253
4П	1,26	30	20	0,2870	18,25	329	175,6	349
5П	1,63	30	16,4	0,3416	7,72	165	123,2	246
7П	0,83	30	19,6	0,1990	11,28	141	133,1	294
8П	1,17	30	19,7	0,2703	10,15	172	139,2	268
9П	0,5	30	19,5	0,1216	22,54	172	160,6	269
1Т	0,7	40	27,6	0,1737	35,47	387	184,2	384
5Т	0,85	39,5	7,4	0,1638	21,83	224	168,7	294
8Т	1,1	40	5	0,1703	29,66	317	215,2	470
10Т	1,17	40	6,5	0,2059	24,36	315	234,8	392
12Т	1,88	40,3	18,4	0,3805	11,75	281	221,2	472
21Т	1,65	28	16,2	0,3436	12,92	279	218,6	492

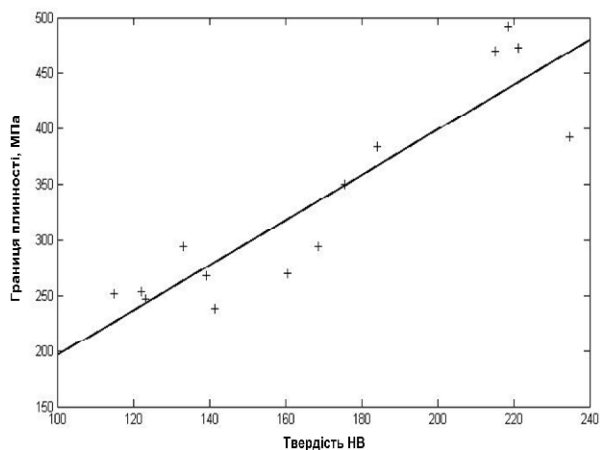


Рисунок 2 – Залежність границі плинності від твердості сталі

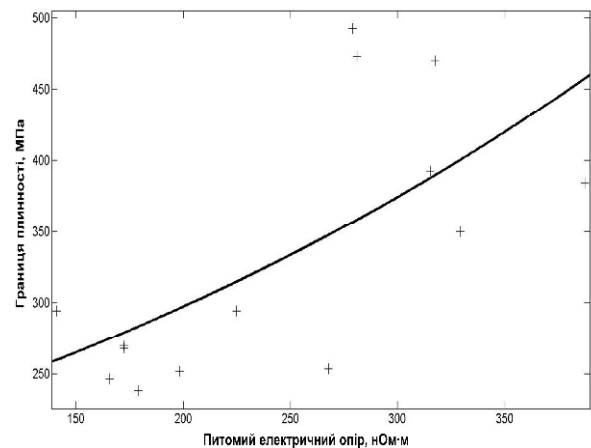


Рисунок 3 – Залежність границі плинності від питомого електричного опору сталі

Таблиця 2 – Результати тестування нейронної мережі

Зразок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Похибка тестування	
															МПа	%
Дійсні значення σ_T , МПа	238	251	253	349	246	294	268	269	384	294	470	392	472	492	26	2,5
Реальні виходи мережі, МПа	239	230	259	347	281	314	237	247	269	326	459	352	486	487		

Примітка: виділені тестові значення границі плинності належать зразкам, вхідні параметри яких не використовувалися у ході тренування мережі.

Для оцінювання точності роботи мережі проведемо регресійний аналіз в програмному середовищі MathLab 7.3 за допомогою функції $\text{postreg}(t,x)$, де t – цільовий вектор, x – вихідний вектор мережі. Дана функція порівнює вихідний масив мережі з цільовим (рис. 4). Вихідним аргументом цієї функції є коефіцієнт кореляції, який в нашому випадку рівний 0,929.

На рис. 4 стрілками вказано на вихідні значення мережі для зразків, які не використовувалися у ході тренування.

Таким чином за результатами виконаних експериментальних досліджень можемо стверджувати, що комплекс параметрів твердість та питомий електричний опір можуть бути використані для визначення границі плинності конструкційних сталей. Ці результати також підтверджують раніше одержані теоретичні висновки щодо вибору інформативних параметрів контролю [1,3].

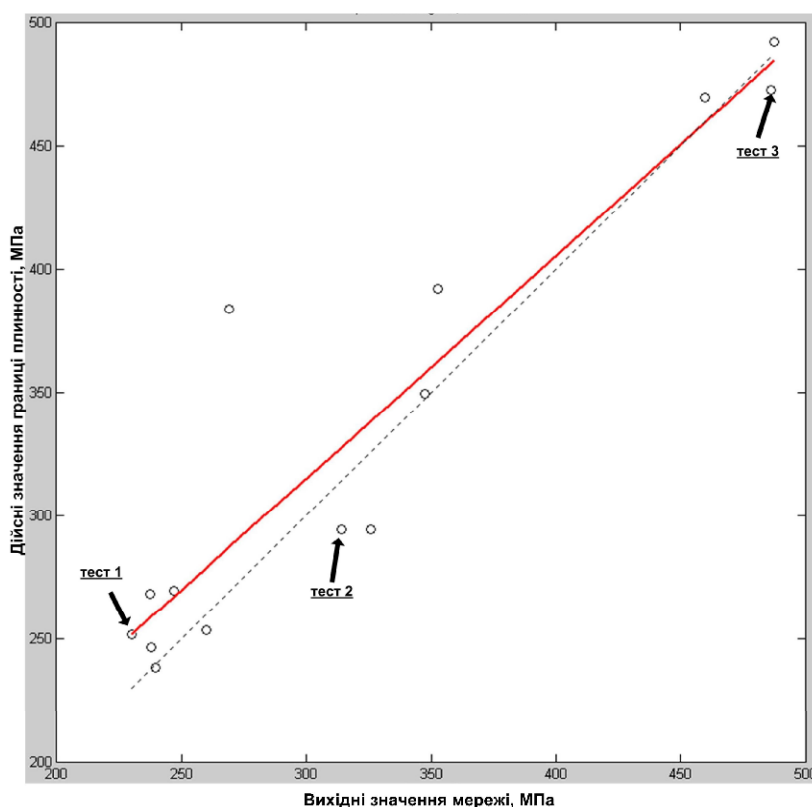
ВИСНОВКИ

Розроблено експериментальну установку, яка реалізує чотиризондовий метод для

визначення питомого електричного опору сталей і проведено багатократні вимірювання на відібраних сталевих зразках. Перерахунок виміряних значень активного електричного опору в питомий опір здійснюється з допомогою розробленої математичної моделі.

За результатами експериментальних досліджень було встановлено наявність та характер залежності границі плинності від обраного комплексу параметрів (питомого електричного опору та твердості), а саме прямопропорційний для обох випадків. Виявлено, що цей комплекс параметрів відзначається такими коефіцієнтами кореляції з границею плинності: твердість 0,91 та питомий електричний опір 0,69.

Використано сучасні методи статистичної обробки інформації (штучні нейронні мережі) для апроксимації границі плинності як функції параметрів твердість-питомий опір. При цьому абсолютна похибка тестування нейромережі становила 26 МПа, відносна похибка тестування становила 2,5%.



“o” – вихідні значення мережі; “- - -” - пряма для ідеального випадку ($R=1$);

“—” - лінія регресії для вихідного вектору мережі ($R=0,929$)

Рисунок 4 - Розкид вихідних значень мережі відносно лінії регресії

З метою застосування розробленої експериментальної установки на реальних сталевих конструкціях необхідно дотримуватися певних вимог. По-перше, в місці контакту зондів з об'єктом контролю необхідна механічна зачистка поверхні до металічного блиску. По-друге, під час вимірювання при температурі, відмінній від 20°C, необхідно урахувати температурний коефіцієнт опору сталі. Вимірювання доцільно проводити на об'єктах контролю з плоскою поверхнею.

1. Карнаш М.О. Новий підхід до визначення фізико-механічних характеристик сталей з врахуванням їх структури / М.О. Карнаш, Є.Р. Доценко, О.М. Карнаш // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), випуск 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: зб. наук. праць.* – Львів, 2008. – С. 203 – 208. 2. Дорофеев А.Л. Физические основы электромагнитной структуроскопии / А.Л. Дорофеев, Р.Е. Еришов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 180 с. 3. Карнаш О. М. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації / О.М. Карнаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карнаш // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* – 2009. – № 1. – С. 36 – 41. 4. Доценко Є.Р. Математичне моделювання контролю

питомого електричного опору матеріалів електроконтактним чотиризондовим методом / Є.Р. Доценко // *Розвідка та розробка нафтогазових родовищ.* – 2010, №1. – С.82-90. 5. Michael B. Heaney. *Electrical Conductivity and Electrical Conductivity and Resistivity // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook / Michael B. Heaney.* - CRC Press LLC, 1999. – Chapter 43. – ISBN 084932145X. 6. Доценко Є.Р. Експериментальні дослідження щодо можливості застосування чотириконтактного електричного методу для контролю питомого електричного опору габаритних сталевих конструкцій / Є.Р.Доценко, О.М. Карнаш, М.О.Карнаш // *Науковий вісник ІФНТУНГ.* – 2010, №1. – С.186-191. 7. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. 8. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник / О.Г. Руденко, Є.В. Бодяньський. – Харків: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2006. – 404 с. – ISBN 966-8530-73-X. 9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. /Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

Поступила в редакцію 13.05.2010 р.

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Костишин В.С.**