

DOI: 10.31319/2519-8106.2(39)2018.154245

УДК 669.01

**С.В. Кадильников**, аспірант кафедри технологічного проектування, bat\_2008@ukr.net  
Національна металургійна академії України, м. Дніпро

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДІАГНОСТИКИ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБ ВЕЛИКИХ ДІАМЕТРІВ

*Метою даного дослідження є обробка вхідних та вихідних сигналів вимірювальної апаратури для діагностики залишкових напружень в зварювальних швах труб великих діаметрів з використанням методу магнітної пам'яті металу.*

*В статті розроблено математичну модель діагностики залишкових напружень в зварювальних швах труб великих діаметрів. У даній дослідницькій роботі проводилися вимірювання зразків на наявність в них залишкових напружень з використанням методу магнітної пам'яті металу за допомогою ІКН-ІМ-4 — приладу вимірювання концентрації напруги моделі. Отримано різницеві рівняння для програмної реалізації алгоритму цифрового диференціювання при різній кількості точок вхідного сигналу. Розроблено структурну схему алгоритму програмної реалізації дискретної передавальної функції. Сигнали з вимірювальних перетворювачів після попередньої обробки, яка полягає в перетворенні аналогового сигналу в цифровий, надходять на смуговий фільтр, призначення якого відрізати низкочастотну і високочастотну складові.*

**Ключові слова:** напруження, зварювання, індукція, різницеві рівняння.

*The purpose of this study is to process the input and output signals of the measuring apparatus for the diagnosis of residual stresses in the welding seams of pipes of large diameters using the method of magnetic memory of the metal.*

*In the article a mathematical model of diagnostics of residual stresses in welding joints of pipes of large diameters is developed. In this research, measurements of samples were carried out for the presence of residual stresses in them using the method of magnetic memory of the metal with the help of the INN-IM-4 instrument of measurement of the voltage concentration of the model. Difference equations for program realization of the digital differentiation algorithm with different number of points of the input signal are obtained. A structural scheme of the algorithm of the program realization of a discrete transfer function is developed. Signals from measuring converters after preprocessing, which consists in converting an analog signal into digital, are received on a bandpass filter whose purpose is to cut off the low frequency and high frequency components. The measurement method is based on three consecutive signal samples that are performed within the part of the signal period, which reduces the measurement time.*

**Keywords:** stress, welding, induction, difference equations.

### Постановка проблеми

Аналіз стану трубного ринку за останнє десятиліття показав, що з боку вітчизняних споживачів труб великого діаметру зросли вимоги до надійності і експлуатаційної працездатності цього виду труб [1].

У зв'язку з інтенсивним розвитком обчислювальної техніки стало можливим виконання будь-яких розрахунків, в тому числі і визначення залишкових зварювальних напружень. В даний час на передній план виходять більш універсальні методики, які характеризуються простою завдання вихідної інформації. В основі таких методик лежить математичне моделювання, що дозволяє вирішувати поставлені завдання.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виробництво сталевих труб великого діаметра засноване на двох різновидах виробничих процесів: прокаті і зварювальному виробництві. У свою чергу, в зварювальний спосіб входять два процеси — деформування зі зварюванням поздовжнього шва і деформування зі зварюванням спірального шва.

Виникнення зварювальних залишкових напружень і деформацій було описано в роботах багатьох вчених і дослідників [2—8]. Були сформовані класифікації напруг і деформацій, причини їх виникнення та різні способи визначення таких, також досліджені і описані методи попередження напруг і деформацій, що виникають в елементах в процесі їх зварювання. Методи використання комп'ютерних технологій при визначенні напружень та деформацій при зварюванні описані в роботах [9—12].

#### Формулювання мети дослідження

Кожен з відомих методів зниження залишкових напружень має більш-менш обмежену область раціонального застосування, тому виникає необхідність як удосконалення існуючих, так і пошуку принципово нових способів після зварювальної обробки зварних з'єднань з метою зняття залишкових напруг, а також діагностування їх геометрії і структурного стану [13].

Остаточне формування зварювальних на-напружень відбувається після завершення процесу зварювання і звільнення звареної конструкції від закріплень. Разом з цим відбувається перерозподіл напружено-деформованого стану конструкції, виникають залишкові деформації і внаслідок цього перерозподіляються і внутрішня напруга конструкції, при цьому найбільша концентрація напружень і деформацій виникає в зоні зварного шва і в зоні сплаву.

У даній дослідницькій роботі проводилися вимірювання зразків на наявність в них залишкових напружень за допомогою ІКН-1М-4-приладу вимірювання концентрації напруги моделі. ІКН — система вимірювання, реєстрації та обробки даних діагностики напружено-деформованого стану обладнання та конструкцій з використанням методу магнітної пам'яті металу.

#### Виклад основного матеріалу

Прилади типу ІКН за принципом роботи є спеціалізованими багатоканальними ферозондовими магнітометрами. Напруженість магнітного поля  $H_p$  на шкалах приладів проградувана в А/м (Ампер/метр). Довжина реєстрованого переміщення датчика проградувана в мм (міліметрах).

Прилади типу ІКН є унікальними засобами вимірювань, винятковими як у функціональному призначенні (визначення зон концентрації напружень — основних джерел розвитку пошкоджень обладнання), так і в конструктивних специфічних особливостях, які помітно виділяють їх серед відомих магнітометрів.

Вихідний сигнал вимірювальних каналів після дискретизації подається на пристрій безперервного диференціювання. Передавальна функція безперервної диференціовальної ланки:

$$W_0(p) = k_0 p, \quad (1)$$

де  $k_0$  — коефіцієнт пропорційності;  $p$  — параметр фільтра.

Вхід і вихід пристрою пов'язані рівнянням:

$$y(t) = k_0 \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

де  $x$  — складова магнітного поля;  $t$  — час, с.

Визначимо дискретну передавальну функцію диференціовальної ланки. У загальному випадку  $Z$  — перетворення від передавальної функції (1) не існує, тому дискретну передавальну функцію цифрової диференціовальної ланки одержуємо з рівняння (2). Нехай на вхід ланки надходить безперервний сигнал  $x(t)$ . Замінімо безперервний сигнал  $x(t)$  сигналом, який описується гранчастою функцією наступного вигляду:

$$x[i] = x(t)|_{t=iT_0}, \quad (3)$$

де  $i$  — ціле число,  $T_0$  — період дискретизації, с.

За гранчастої функції (3) побудуємо інтерполяційний поліном Лагранжа:

$$L_n(t) = \sum_{i=0}^n \Pi_{n+1}(t) x[i] / (t - iT_0) \Pi_{n-1}^i(iT_0), \quad (4)$$

де  $\Pi_{n+1}(t) = (t - 0T_0)(t - 1T_0)(t - 2T_0) \dots (t - nT_0)$ , тоді  $L_n(iT_0) = x[i]$ .

Вважаючи, що  $(t - 0T_0)/T_0 = q$ , одержуємо  $\Pi_{n+1}(t) = T_0^{n+1} \cdot q \cdot (q-1) \dots (q-n) = T^{n+1} q^{n+1}$  та  $\Pi_{n+1}(iT_0) = (iT_0 - 0T_0)(iT_0 - 1T_0) \dots (iT_0 - nT_0) = (-1)^{n-i} T^n i!(n-i)!$ .

Отже, для полінома Лагранжа справедлива рівність:

$$L_n(t) = \sum_{i=0}^n (-1)^{n-i} x[i] / [i!(n-i)!] \cdot q^{n+1} / (q-i). \quad (5)$$

Враховуючи, що  $\frac{dt}{dq} = T_0$ , одержуємо

$$x(t) \approx L_n(t) = \frac{1}{T_0} \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^{n-i} x[i]}{i!(n-i)!} \cdot \frac{d}{dq} \left\{ \frac{q^{[n+1]}}{q-i} \right\}. \quad (6)$$

Для оцінки похибки метода диференціювання  $r_n(t) = x'(t) - L'_n(t)$  скористаємося формулою похибки:

$$R_n[iT_0] = (-1)^{n-i} T_0^n i!(n-i)! x^{n+1}(\xi) / [(n+1)!], \quad (7)$$

де  $x^{n+1}(\xi)$  — похідна  $(n+1)$ -го порядку від вхідного сигналу між точками  $0T_0, 1T_0 \dots nT_0$ .

З рівняння (7) можна вивести різницеві рівняння для програмної реалізації алгоритму цифрового диференціювання при різній кількості точок вхідного сигналу, що використовуються в циклі обчислення значень похідної. Отримаємо різницеві рівняння для програмної реалізації алгоритму цифрового диференціювання і визначимо їх похибки диференціювання для різного числа точок.

Для  $n=1$  маємо  $l_1(t) = \sum_{i=0}^1 (-1)^{1-i} x[i] / [i!(1-i)!] \cdot q^2 / (q-i) = -x[0](q-1) + x[1]q$ .

Враховуючи, що  $\frac{dt}{dq} = T_0$ , одержуємо  $x(t) \approx L_1(t) = \{x[1] - x[0]\} / T_0$  або в загальному вигляді:

$$x'(t) = \{x[i] - x[i-1]\} / T_0. \quad (8)$$

Похибка диференціювання для різницевого рівняння (8) на основі виразу (7) має вигляд:

$$k_1(iT_0) = T_0 x''(\xi) / 2.$$

Застосовуючи  $Z$  — перетворення до різницевого рівняння (8), одержуємо  $x'[z] = k_0 x(z)(1 - z^{-1}) / T_0$ . Тоді дискретна передавальна функція буде мати вигляд:

$$D(z) = k_0(1 - z^{-1}) / T = b_0(1 - z^{-1}), \quad (9)$$

де  $b_0 = k_0 / T$ . На рис. 1 зображена її структурна схема алгоритму програмної реалізації.

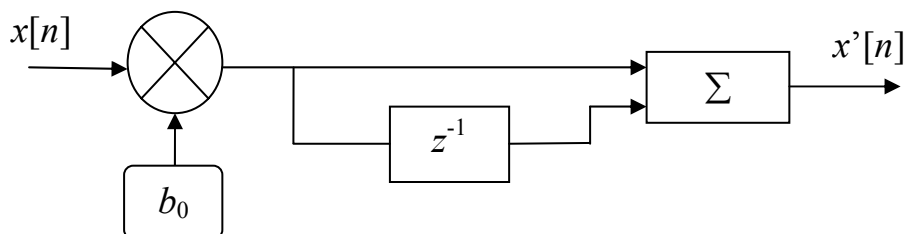


Рис. 1. Структурна схема програмної реалізації дискретних передавальних функцій

Сигнал  $x'(t)$  буде змінюватися за законом:

$$\begin{cases} x'[0] = 0, \\ x'[1] = k_0 x[1] / T_0, \\ x'[2] = k_0 \{x[2] - x[1]\} / T_0, \\ x[n] = k_0 \{ \}. \end{cases}$$

Враховуючи затримку  $\tau$ , яка вноситься приладом диференціювання при реалізації алгоритму, одержуємо:

$$D(z) = b_0(1 - z^{-1})e^{-\tau}, \text{ а при } \tau = T_0,$$

$$D(z) = k_0(1 - z^{-1})z^{-1}.$$

Частотні характеристики приладу диференціювання:

$$W(e^{j\omega T_0}) = b_0(1 - \cos \omega T_0 + j \sin \omega T_0). \quad (10)$$

Модулем (10) є вираз:

$$|W(e^{j\omega T_0})| = b_0 \sqrt{(1 - \cos \omega T_0)^2 + \sin^2 \omega T_0}. \quad (11)$$

Якщо враховувати запізнення на  $\tau = T_0$ , то

$$W(e^{j\omega T_0}) = b_0[(\cos \omega T_0 - \cos 2\omega T_0) - j(\sin \omega T_0 - \sin 2\omega T_0)].$$

Якщо розрахунок диференціовального приладу провести для  $n = 2$ , то маємо:

$$L_2(t) = \sum_{i=0}^2 (-1)^{2-i} x[i] / [i!(2-i)!] \cdot q^3 / (q-i),$$

$$x'(t) = \frac{1}{T_0} \left\{ \frac{1}{2} x[0](2q-3) - x[1](2q-2) + \frac{1}{2} x[2](2q-1) \right\}. \quad (12)$$

Зокрема для похідних  $x[iT_0]$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) маємо:

$$\begin{cases} x'[0] = \frac{1}{2T_0} (-3x[0] + 4x[1] - x[2]), \\ x'[1] = \frac{1}{2T_0} (-3x[0] + x[2]), \\ x'[2] = \frac{1}{2T_0} (x[0] - 4x[1] + 3x[2]). \end{cases} \quad (13)$$

В загальному вигляді різницеві рівняння (13) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} x'[i] = k_0(-3[i] + 4x[i+1] - x[i+2]) / 2T, \\ x''[i] = k_0(-x[i-1] + x[i+1]) / 2T, \\ x'''[i] = k_0(x[i-2] - 4x[i-1] + 3x[i]) / 2T. \end{cases} \quad (14)$$

З виразу (14) можна одержувати передавальні функції алгоритмів диференціювання:

$$\begin{cases} D'[z] = x'(z) / x(z) = k_0(-3 + 4z^{+1} - z^{+2}) / 2T, \\ D''[z] = x''(z) / x(z) = k_0(-z^{-1} + z^1) / 2T, \\ D'''[z] = x'''(z) / x(z) = k_0(z^{-2} - 4z^{-1} + 3z) / 2T. \end{cases}$$

Для програмної реалізації алгоритмів цифрового диференціювання в реальному масштабі часу необхідно використовувати  $D'''[z]$ , тому що вона використовує попередні значення гратчастої функції вхідного сигналу в моменти часу  $(i-2, (i-1))$ , а не в наступні  $(i+2, (i+1))$ , як в  $D'[z]$ .

В дискретну передавальну функцію  $D'''[z]$  введемо додаткові запізнення на один такт, так як в реальному масштабі часу в момент  $iT_0$  немає значення вхідного сигналу  $x[i+1]$  в момент часу  $(i+1)T_0$ .

Тоді  $D'''[z]$  приймає вигляд  $D'''[z] = \frac{k_0}{2T}(1-z^{-2})$ .

Основним прийомом поділу сигналів служить дворазове швидке перетворення Фур'є (пряме і зворотне) і перетворення Гільберта. Спектр вхідного сигналу, перекладеного в цифровий код, зрізається обмежувачем, потім виконується пряме швидке перетворення Фур'є. Подальші перетворення йдуть по двох каналах (паралельних), в одному з них виробляється зворотне перетворення Фур'є (інверсія), в іншому сигнал попередньо піддається перетворенню Гільберта (зрушення на  $90^\circ$  гармонійної функції). Ставлення вихідних напруг каналів дає шукану величину.

#### Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Сигнали з вимірювальних перетворювачів після попередньої обробки, яка полягає в перетворенні аналогового сигналу в цифровий, надходять на смуговий фільтр, призначення якого відрізати низькочастотну і високочастотну складові.

2. Параметри фільтра визначаються за методикою, викладеною в [14]. Метод вимірювань заснований на трьох послідовних вибірках сигналу, які здійснюються в межах частини періоду сигналу, що скорочує час вимірювання. Автоматичний вибір інтервалу вибірок визначається діапазоном частот сигналу.

3. Вибірки можуть бути взяті в будь-який момент часу, а послідовні вимірювання можуть дещо відрізнятись один від одного через відмінності моментів вибірки. Чисельними експериментами встановлено, що якщо  $x_2 < 0.005(x_{\max} - x_{\min})$ , то проводиться нова серія вибірок. Якщо обрана максимальна затримка, наприклад,  $0.03 T$  ( $T$  — період сигналу), тоді вибірки обрані занадто рідко.

4. З іншого боку, якщо вибірки занадто близькі один до одного, то різниця між ними складає близько крока квантування АЦП, що є причиною флуктуацій на виході. Якщо мінімальна затримка складає 6 % періоду, то інтервал вибірок необхідно збільшити. Якщо величина  $x_2$  менш за 5 % діапазону сигналу, то беруться три інші вибірки.

Запропонована методика виміру залишкових напружень має досить широку область раціонального застосування, а тому може застосовуватися для інших технічних об'єктів, в яких використовуються зварювальні технології.

#### Список використаної літератури

1. Антонов А. А. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводах / А. А. Антонов, О. И. Стрелков. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – №3. – С. 13–19.
2. Анучкин, М.П. Горицкий, В.Н. Мироненко, Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. – М. : Недра, 1986. – 231 с.
3. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Л.: ЛКИ. 1980. 331 с.
4. Исследование остаточных напряжений в соединениях, полученных линейной сваркой трением / [А. Ю. Медведев, В. М. Бычков, Е. Е. Тарасенко та ін.]. // Вестник УГАТУ. – 2012. – №7. – С. 59–62.
5. The welding process impact on residual stress and distortion / [P. Colegrove, C. Ikeagu, A. Thistlethwaitetain.]. // Science and Technology of Welding and Joining. – 2009. – №14. – С. 717–725.
6. Экспериментально-теоретический метод диагностики отслоений тонких покрытий / Р. В. Гольдштейн, В. М. Козинцев, А. Л. Попов, Г. Н. Чернышев. // ПММ. – 2000. – №2. – С. 332–336.
7. Остаточные сварочные напряжения в зоне кольцевых сварных стыков трубопроводов из аустенитной стали / [В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, В. М. Шекера та ін.]. // Автоматическая сварка. – 1998. – №11. – С. 32–39.

8. Experimental and numerical investigations of the warm-prestressing (WPS) effect considering different load paths / [H. Kordisch, R. Boschen, J. G. Blauel та ін.]. // Nuclear Engineering and Design. – 2000. – №84. – С. 447–450.
9. Колесников Я. А. Численное моделирование сварного соединения из стали 15х5м и оценка его напряженно-деформированного состояния / Я. А. Колесников, М. З. Ямилев, М. Р. Фазылов. // Сборник научных трудов. Уфа. – 2008. – С. 135–151.
10. Современные методы идентификации неметаллических включений в сварных соединениях трубных сталей / Е. М. Федосеева, М. Н. Игнатов, И. Ю. Летягин, К. П. Казымов. // Тяжелое машиностроение. – 2011. – №1. – С. 45–47.
11. Федосеева Е. М. Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода / Е. М. Федосеева, Т. В. Ольшанская, М. Н. Игнатов. // Тяжелое машиностроение. – 2011. – №3. – С. 31–37.
12. Stoney G. G. The tension of metallic films, deposited by electrolysis / Stoney. // Proc. Roy. Soc. London Ser. A. – 1999. – №553. – С. 172–175.
13. Michaleris P. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures / P. Michaleris, J. Dantzig, D. Tortorelli. // Welding Journal. – 1999. – №78. – С. 361–366.
14. Левенберг Л. И. Образцы контрольные цилиндрические для настройки электромагнитных дефектоскопов / Л. И. Левенберг. // Дефектоскопия. – 1985. – №8. – С. 83–89.

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESSES OF DIAGNOSTICS OF THE OUTDOOR DEFINITIONS IN THE HARVEST DOWN TUBES OF THE GREAT DIAMETER**

**Kadilnikov S.V.**

### **Abstract**

Analysis of the state of the pipe market over the last decade has shown that in connection with the intensive development of computer technology it became possible to determine the residual welding stresses. The basis of such techniques is mathematical modeling, which allows the use of systems for measuring, recording and processing data for the diagnosis of stress-strain state.

The purpose of this study is to process the input and output signals of the measuring apparatus for the diagnosis of residual stresses in the welding seams of pipes of large diameters using the method of magnetic memory of the metal. The final formation of the welding on the stresses occurs after the completion of the welding process, along with this there is a redistribution of the stress-deformed state of the design, there are residual deformations, and as a result, the internal stress of the structure is redistributed, with the greatest concentration of stresses and deformations occurring in the zone of the weld and in the zone of the alloy.

In the article a mathematical model of diagnostics of residual stresses in welding joints of pipes of large diameters is developed. In this research, measurements of samples were carried out for the presence of residual stresses in them using the method of magnetic memory of the metal with the help of the INN-1M-4 instrument of measurement of the voltage concentration of the model. Difference equations for program realization of the digital differentiation algorithm with different number of points of the input signal are obtained. A structural scheme of the algorithm of the program realization of a discrete transfer function is developed. Signals from measuring converters after preprocessing, which consists in converting an analog signal into digital, are received on a bandpass filter whose purpose is to cut off the low frequency and high frequency components. The measurement method is based on three consecutive signal samples that are performed within the part of the signal period, which reduces the measurement time. The automatic selection of the interval of the samples is determined by the frequency range of the signal.

The main method of signal separation is twofold rapid Fourier transform (direct and reverse) and Hilbert transform. The spectrum of the input signal translated into a digital code is cut off by a

limiter, then a direct fast Fourier transform is performed. Further transformations follow two parallel channels, in one of them the inverse Fourier transform is made, in the other the signal is previously subjected to the transformation of Hilbert. The proposed method for measuring residual stresses has a fairly wide area of rational use, and therefore can be used for other technical objects in which welding technologies are used.

### References

- [1] Antonov, A.A. Steklov, O.I. Investigation of technological residual stresses in welded joints of main pipelines // Procuring production in mechanical engineering. –2012. – No. 3. – P.13–19 (in Russian).
- [2] Anuchkin, M.P. Goritsky, V.N. Mironenko, B.I. Pipes for pipelines. – M.: Nedra, 1986. – 231 p. (in Russian).
- [3] Gatovsky KM, Karhin V.A. Theory of welding deformations and stresses. L .: LKI. 1980. 331 p. (in Russian).
- [4] Medvedev A.Yu., Bychkov V.M., Tarasenko E.E., Izmaylova N.F., Dubin A.I. Investigation of residual stresses in compounds obtained by linear friction welding. Vestnik UGATU. 2012. V. 16. No. 7 (52). Pp. 59–62 (in Russian).
- [5] Paul Colegrove, Chukwugozielkeagu, Adam Thistlethwaite, Stewart Williams, Tamas Nagy, WojciechSuder, Axel Steuwer, ThiloPirling. Stress and distortion. 2009. Vol. 14 (8). pp. 717–725.
- [6] Goldstein R.V., Kozintsev V.M., Popov A.L., Chernyshev G.N. Experimental-theoretical method for diagnosing delaminations of thin coatings // PMM 2000 T. 64. Issue. 2. pp. 332–336 (in Russian).
- [7] Makhnenko V.I., Velikoivanenko E.A., Shekera V.M., Rozyinka GF, Pivtorak N.I. Residual welding stresses in the zone of annular welded joints of austenitic steel pipelines // Automatic welding. 1998. № 11. S. 32–39 (in Russian).
- [8] Kordisch, H., Boschen, R., Blauel, J.G., Schmitt, W., Nagel, G. Experimental and numerical investigations of the warm-prestressing (WPS) // Nuclear Engineering and Design. 2000. Vol. 84 (3). pp. 447–450.
- [9] Kolesnikov Ya. A., Yamilev M.Z., Fazylov M.R. Numerical simulation of a welded joint made of steel 15x5m and evaluation of its stress-strain state // Proc. Ufa. 2008. p. 135–151 (in Russian).
- [10] Fedoseeva, E.M, Ignatov, M.N., Letyagin, I.Yu., Kazymov, K.P. Modern methods of identification of non-metallic inclusions in welded joints of pipe steels // Heavy mechanical engineering. 2011. No. 1. C. 45–47 (in Russian).
- [11] Fedoseeva EM, Olshanskaya T.V., Ignatov M.N. Simulation of non-stationary processes in the welded joint of the pipeline. Heavy machinery. 2011. № 3, p. 31–37 (in Russian).
- [12] Stoney G.G. The tension of metallic films deposited by electrolysis // Proc. Roy. Soc. London Ser. A. 1999. Vol. 82. No. 553. pp. 172–175.
- [13] Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures // Welding Journal. 1999. Vol. 78 (11). pp. 361–366.
- [14] Levenberg L.I. Cylindrical test samples for tuning electromagnetic flaw detectors / Levenberg LI // Defectoscopy. – 1985.– № 8.–P.83–89 (in Russian).