

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE



В І С Н И К
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ
ВИПУСК 4

***BULLETIN OF ENGINEERING
ACADEMY OF UKRAINE***

Issue 4

Київ 2015 Kyiv

**ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE**

**Журнал друкує статті науковців вузів та установ
України, інших країн відповідно до рубрик:**

Авіаційна і космічна техніка
Військово-технічні проблеми
Геологія, видобування та переробка корисних
копалин
Інженерні проблеми агропромислового комплексу
Інформаційні системи, обчислювальна й електронна
техніка, системи зв'язку та приладобудування
Матеріалознавство
Машинобудування
Медична інженерія
Металургія
Охорона навколишнього середовища (інженерна еко-
логія) і ресурсозбереження
Стандартизація, метрологія і сертифікація
Будівництво та будіндустрія
Технологія легкої промисловості
Технологія харчової промисловості
Хімічні технології й інженерна біотехнологія
Економіка, право та керування в інженерній
діяльності
Енергетика
Освіта та виховання

Матеріали друкуються українською, російською або
англійською мовами.

Номер затверджено на засіданні Вченої ради
Кіровоградського національного технічного
університету

Протокол № 4 від 30.11.2015р

Вісник Інженерної академії України включений у но-
вий Перелік наукових фахових видань України, в яких
можуть публікуватися результати дисертаційних робіт
на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата
наук в галузі технічних наук (Наказ МОН України від
13.07.2015р. №747)

Співзасновники:

Кіровоградський національний технічний
університет
Інженерна академія України
Одеська державна академія технічного регулювання
та якості

ISBN 5-7763-836

**Journal submits articles of researchers of universities
and institutions of Ukraine and other countries in
accordance with headings:**

Aviation and Space Engineering
Military-technical problems
Geology, Mining and Processing of Minerals

Engineering Problems of Agroindustrial Complex
Information systems, computers and electronic equip-
ment, communication systems and instrumentation
Material Science
Mechanical Engineering
Medical Engineering
Metallurgy
Preservation of Environment (Ecological Engineering)
and Resource Saving
Standardisation, Metrology and Certification
Building and Construction Engineering
Technology of Light Industry
Technology of Food Industry
Chemical Technologies and Engineering Biotechnology
Economics, law and management in engineering

Energetics
Education and training

Materials are submitted in Ukrainian, Russian or English
languages.

The issue is approved at the meeting of Academic
Council of Kirovograd National Technical University

Protocol No.4 dated 30.11.2015

Bulletin of Engineering academy of Ukraine is included
into the new List of Scientific special editions of
Ukraine, in which results of dissertation works may be
published for to be conferred with academic degrees of
doctor and candidate of sciences in the field of
engineering sciences (Decree of Ministry Education and
Science of the Ukraine No.747 dated 13.07.2015)

Cofounders:

Kirovograd National Technical University

Engineering Academy of Ukraine
Odessa State Academy of Technical Regulation
and Quality

Редакція
Головний
Відповідає
Редактор

Члени

А.І. Баб

техніка

Л.Р. Ви

Р.Б. Ге

В.І. Да

управлі

В.В. Др

ма, об

з'явлю

Ігор Е

кад ін

М.Ю. І

рич.

Л.В. К

метро

В.І. Л

нерна

А.П. М

В.М. Я

перер

Й.С. Я

О.О. Я

гідр

В.В. С

серед

В.І. С

лов

О.К.

нерні

М.І.

О.І.

мист

М.І.

ріан

С.І.

Пі

Ці

Ал

ко

Те

Е-

Коломієць Л.В., Кузнєцова Л.В., Боряк К.Ф., Лобус Р.С., Шкуліпа П.А. ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ АПАРАТУ ГЕМОДІАЛІЗУ	233
Кучерук В.Ю., Ліщук Р.І. ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ	240
Нестеренко О.И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ СИСТЕМОЙ	245
Овчаров Ю.В. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗЫ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ И ПРЕЦИЗИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНО- СТИ	250
Орнатський Д.П., Катаєва М.О. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ШВИДКОДІЇ ВИМІРЮВАНЬ ЛІНІЙНО-КУТОВИХ ВЕЛИЧИН ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНИМИ ДАТЧИКАМИ	254
Петрище М.О., Попенака А.М., Бородулін С.О., Крутов С.Л. АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ЩОДО ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ	258

Будівництво та будіндустрія

Гончарук В.В. МОДЕЛЮВАННЯ КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ	262
Шумінський В.Д., Титаренко В.А., Винников Ю.Л., Біда С.В. РОЗРОБКА НОРМАТИВНОГО АКТУ З ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ТЕРИТОРІЙ, БУДИНКІВ І СПОРУД ВІД ЗСУВІВ ТА ОБВАЛІВ	267

Освіта та виховання

Гнатюк С.А., Наджи А., Труфанов А.И., Кинаш Н.А. СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СТРАН С ВЫСОКИМ ИНДЕКСОМ НЕДЕЕСПОСОБНОСТИ	274
АНОТАЦІЇ	280
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	289
ВИМОГИ ДО СТАТЕЙ	291

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБЛАДІВ¹Вінницький національний технічний університет, e-mail: Vladimir.Kucheruk@gmail.com²Уманський національний університет садівництва, e-mail: roma_lir@mail.ru

У статті запропоновано спосіб автоматичного визначення динамічних метрологічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, який дозволяє підвищити точність вимірювання та швидкість роботи за рахунок використання оптичної системи зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів.

Ключові слова: динамічні характеристики, передаточна функція, MatLab

Вступ

Сучасний рівень інформаційно-вимірювальних систем з використанням засобів технічного зору дають широкі можливості автоматизації випробувань стрілочних вимірювальних приладів. Розв'язання задачі підвищення рівня автоматизації виробництва стрілочних приладів передбачає розробку й впровадження гнучких інформаційно-вимірювальних систем випробувань стрілочних вимірювальних приладів. Результати досліджень [1-4], які присвячені автоматизації контролю виробництва стрілочних індикаторів за допомогою оптико-електронних систем, що розпізнають покази стрілочних вимірювальних приладів, свідчать про високий рівень розвитку технічних і алгоритмічних засобів. Дані інформаційно-вимірювальні системи дають можливість повірити стрілочні вимірювальні прилади у статичному режимі роботи. Лише у роботі [4] розроблена імітаційна модель функціонування системи автоматизації перевірки, яка дозволяє імітувати різні способи перевірки, включаючи і динамічний режим.

Тому, незважаючи на досягнення, невирішеною залишається задача створення інформаційно-вимірювальних систем, що забезпечують побудову універсальних автоматизованих комплексів для випробувань аналогових стрілочних вимірювальних приладів у динамічному режимі роботи.

Метою даної статті є автоматизація процесу визначення динамічних метрологічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, що дозволить підвищити точність вимірювання за рахунок використання оптичної системи зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів.

Аналіз існуючих досліджень

В роботі [4] реалізований спосіб автоматичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів при їхній повірці. Оптично сканують всю шкалу приладу в напрямку, що збігається з напрямком шкали при встановленому на нульову відмітку шкали стрілку (такий випадок буде при нульовому вхідному сигналі, тому що для усунення систематичної помилки у вимірюванні перед повіркою показчик виставляють на нуль). У зчитаному рядку виділяються сигнали, положення ϕ , які відповідають положенням відміток, а їх кількість дорівнює N . Після цього на вхід приладу, що повіряють, подають задане значення вхідного сигналу й знову здійснюють сканування всієї шкали. Зі зчитаного рядка виділяються сигнали та визначаються їхні положення $\phi_j = \phi_1, \phi_2, \phi_j$, і їх число L . У випадку збігу числа L виділених сигналів із числом N відміток шкали ($L=N$) фіксують суміщення індикатора з відміткою шкали, що повіряють. А якщо ні, то ($L=N+1$) послідовно порівнюють кожен координату ϕ_j з L з кожною координатою ϕ_i з N . Координата ϕ_j , для якої виконується умова $|\phi_i - \phi_j| \geq \Delta\phi$, де $\Delta\phi$ похибка отримання координат, є положенням показчика, а різниця $\phi_i - \phi_j$ є відстань від показчика до відмітки шкали приладу, що повіряють. Аналогічно визначають покази у всіх відмітках, що повіряють. Похибка отримання координат $\Delta\phi$ визначається чутливістю граничних елементів, що формують відеосигнал, або дискретністю матриці фотодатчика.

Способи автоматичної перевірки в динамічному режимі орієнтовані на відмітки відлікового пристрою, що повіряють.

Основною причиною, що обмежує використання при повірці динамічного вхідного сигналу, є інерційність рухомої частини системи живлення приладу. В результаті чого стрілка прямує за сигналом, який подається на вхід приладу, який відстає від його значення на динамічну похибку, яка складається із двох складових: постійної та згасаючої змінних.

При автоматичній повірці на перших відмітках шкали стрілка є інертною по відношенню до вхід-

ного сигналу. Для запобігання динамічної похибки є розрахунок її значення через динамічні характеристики рухомої частини приладу, що повіряється: власну кругову частоту коливань ω_0 і коефіцієнт затування β .

Розрахунок значень власної кругової частоти і коефіцієнта затування проводять за результатами вимірювання моментів накладання стрілки приладу з контрольними відмітками, які задаються вхідним сигналом.

Запропонований спосіб автоматичної повірки вимірювальних приладів складається з двох циклів [5].

В основному циклі подають вхідний сигнал, що змінюється за лінійним законом

$$I = S_c \cdot t, \tag{1}$$

де t – час; S_c – швидкість зміни вхідного сигналу, яка дорівнює

$$S_c = \frac{I_n}{T}, \tag{2}$$

де I_n – значення вхідного сигналу, яке відповідає кінцевій точці шкали приладу, що повіряють; T – час збільшення вхідного сигналу від нуля до I_n .

Далі визначають моменти часу в яких відбувається співпадіння стрілки з відмітками на шкалі приладу, що повіряється I'_n , та знаходять відповідні моменти часу t_k значенням вхідного сигналу I_n .

Різниця між значення вхідного сигналу та значення вхідного сигналу вимірюваного приладом є абсолютною похибкою вимірювального приладу

$$\Delta_k = I'_k - I_k. \tag{3}$$

По відношенню до вхідного сигналу стрілка є інертною, що призводить до виникнення динамічної похибки повірки

$$\Delta_k = I'_k - I_k + \Delta_{gk}, \tag{4}$$

де $\Delta_{gk} = \Delta_{g0} + \Delta_{gtk}$; Δ_{g0} – постійна складова динамічної похибки; Δ_{gtk} – змінна складова динамічної похибки.

Через технологічні похибки виробництва електровимірювальних приладів класу точності 1,5 і нижче значення β і ω_0 сильно змінюються, тому значення β і ω_0 визначають для кожного приладу, що повіряється, у допоміжному циклі.

Для цього подають на прилад вхідний сигнал, який відповідає кінцевій точці шкали I_n . Рух стрілки приладу описується рівняннями:

$$I'_k |_{\beta < 1} = I_n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot e^{\beta \omega_0 t_k} \cdot \sin \left(\omega_0 \cdot t_k \cdot \sqrt{1 - \beta^2} + \arctg \left(\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \right) \right) \right]; \tag{5}$$

$$I'_k |_{\beta > 1} = I_n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot e^{\beta \omega_0 t_k} \cdot \text{sh} \left(\omega_0 \cdot t_k \cdot \sqrt{1 - \beta^2} + \text{arth} \left(\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \right) \right) \right], \tag{6}$$

що є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 I'}{\partial t^2} + 2\beta\omega_0 \frac{\partial I'}{\partial t} + \omega_0^2 I' = \omega_0^2 I_n. \tag{7}$$

Випадок, $\beta=1$, можливий тільки теоретично і тому не розглядається.

Безпосереднє використання виразів (5) і (6) для визначення β і ω_0 неможливе через нелінійність отриманих системи алгебраїчних рівнянь, а вирішення цієї системи потребує багато часу. Так як спосіб автоматичної повірки вимірювальних приладів повинен працювати в реальному часі, то затримка, яка необхідна для обчислення β і ω_0 досить суттєво впливає на швидкодію повірки.

Тому розрахунок β і ω_0 за допомогою рівнянь (5), (6), (7) виконують у два етапи. Спочатку знаходять наближені значення, а потім точні значення величин.

Для знаходження наближених величин рівняння (7) розкладають в ряд Тейлора

$$I'(t) = I'(0) + \frac{1}{11} \frac{\partial I'}{\partial t} |_{t=0} \cdot t + \frac{1}{21} \frac{\partial^2 I'}{\partial t^2} |_{t=0} \cdot t^2 + \dots \tag{8}$$

В динамічному режимі, що відповідає допоміжному циклу повірки, задають такі початкові умови:

$$I'(0) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial I'}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (10)$$

Беручи до уваги лише два члени розкладу в (8) і враховуючи (9), (10), отримаємо

$$I'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t^3 \right]. \quad (11)$$

Так як вираз (11) отримано за допомогою розкладу в ряд Тейлора (8), в допоміжному циклі для підвищення точності перевірки після подачі вхідного сигналу I_n визначають моменти часу t_1 та t_2 , що відповідають двом першим відміткам на початку шкали I_1' та I_2'

$$\begin{cases} I_1'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t_1^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t_1^3 \right]; \\ I_2'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t_2^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t_2^3 \right]. \end{cases} \quad (12)$$

З системи рівнянь (12) знаходять власну кругову частоту коливань ω_0 і коефіцієнт згасання β

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{I_2'}{I_n \left(\frac{1}{2} t_2^2 - \frac{1}{3} \lambda t_2^3 \right)}}; \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\lambda}{\omega_0}; \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{3}{2} \left(t_1^2 - \frac{I_1'}{I_2'} t_2^2 \right) \cdot \left(t_1^3 - \frac{I_1'}{I_2'} t_2^3 \right)^{-1}. \quad (15)$$

Для значень кругової частоти коливань ω_0 і коефіцієнт згасання β була проведена оцінка похибок рівнянь (13) і (14) за допомогою моделювання на ПК процесів (5) і (6). В результаті було показано, що при використанні двох перших відміток на шкалі для серійних приладів їх похибка у визначенні кругової частоти коливань ω_0 по формулі (13) складає соті долі відсотка і її можна вважати надзвичайно малою, а похибка у визначенні коефіцієнта згасання β за формулою (14) складає не більше 15 відсотків.

Розглянуті вище методики дають добрі результати у статичному режимі, але в динамічному режимі роботи, похибка визначення коефіцієнта згасання β складає не більше 15 відсотків, що досить суттєво впливає на визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів.

Основний зміст

Відхилення стрілки стрілочного вимірювального індикатора можна описати коливальною ланкою, що є найпростішим динамічним елементом системи автоматичного керування та має передаточну функцію виду (рис. 1)

$$W(S) = \frac{k}{T^2 S^2 + 2\xi TS + 1}. \quad (16)$$

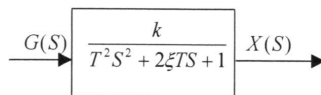


Рисунок 1 – Структурне зображення коливальної ланки

Динамічні властивості коливальної ланки визначаються трьома параметрами [6]: k – коефіцієнтом підсилення (передачі) коливальної ланки; T – постійною часу коливальної ланки; ξ – відносним коефіцієнтом згасання коливальної ланки $0 \leq \xi < 1$.

Перетворюючи рівняння (1), отримаємо:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{\xi}{T} \cdot t} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t + \varphi \right) \right] \quad (17)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

Рівняння (17) описує затухаючий коливальний процес з відносним коефіцієнтом затухання та частотою $\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}$. Усталене значення цільової функції визначається як $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$. Графік функції $h(t)$ показаний на рис. 2:

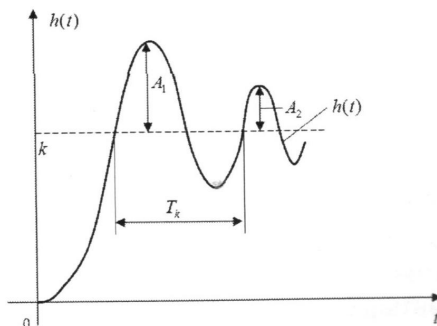


Рисунок 2 – Затухаючий коливальний процес
(T_k – період коливань, A_1, A_2 – амплітуди двох сусідніх коливань)

За графіком функції $h(t)$ можна визначити параметри коливальної ланки. Коефіцієнт підсилення коливальної ланки визначають за встановленим значенням перехідної функції $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$. Постійну часу T і коефіцієнт затухання ξ можна знайти з рівнянь:

$$\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot T_k = 2 \cdot \pi ; \quad (18)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{-\frac{\xi}{T} \cdot T_k} \quad (19)$$

Для автоматизації процесу визначення динамічних метрологічних характеристик фотографують покази приладу через певний дискретний час. При практичних випробуваннях встановлено, що один кадр зображення отримувався в середньому за 15-40 мс. До цього проміжку часу додавався час на запис зображення у постійну пам'ять комп'ютера. При циклічному фотографуванні приладу створюється папка з цифровою фотографією показу приладу. Далі ці зображення також у циклічному режимі розпізнають.

У результаті маємо масив зображень показів приладу з відповідним їм рядом часу, в моменти якого ці фото були отримані. Для визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів ці масиви імпортуються в пакет прикладних програм MatLab.

За допомогою пакету Curve Fitting апроксимуємо ці значення відповідно до рівняння, яке описує затухаючий коливальний процес [7]. Результат представлений на рис. 3.

Параметри математичної моделі (довірчий інтервал з надійністю 95%): $T = 72.53$ (71.92, 73.15); $k = 43.44$ (43.3, 43.59); $\xi = 0.3776$ (0.3697, 0.3855).

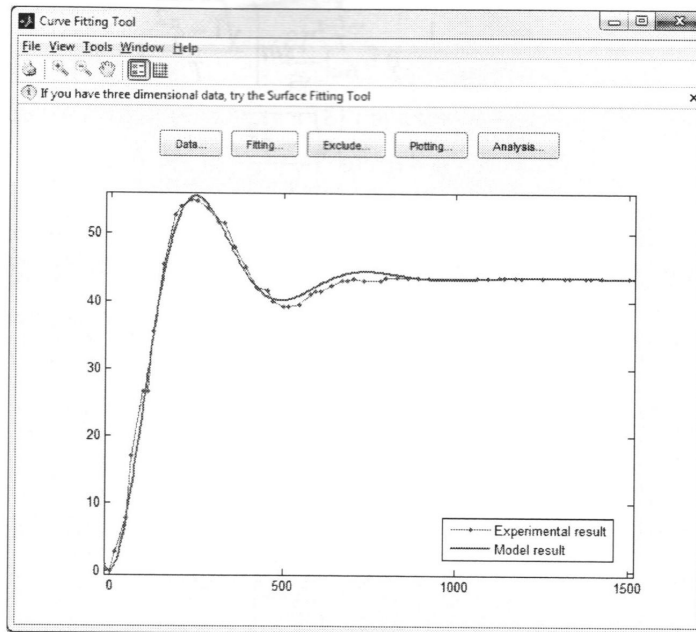


Рисунок 3 – Результат апроксимації

Статистичні показники: $SSE = 10,41$; $R\text{-square} = 0,9984$; $\text{Adjusted } R\text{-square} = 0,9983$; $RMSE = 0,4706$. Квадрату змішаної кореляції ($R\text{-square} = 0,9984$) та уточненого квадрату змішаної кореляції ($\text{Adjusted } R\text{-square} = 0,9983$) наближаються до 1, що свідчить про гарне наближення вихідних даних параметричною моделлю.

Наближення суми квадратів похибок ($SSE=10,41$) до нуля говорить про гарну якість наближення даних параметричною моделлю. Але візуальний аналіз графіка побудованої моделі показує добре наближення між емпіричними даними та теоретичними даними.

Список літературних джерел

1. Свинолупов Ю.Г., Седов Э.Н. Автоматизированные установки для поверки и градуировки стрелочных приборов // Проблемы систем управления. - 1995. - № 2. - С.30-34.
2. Патент 2054689 Россия, МКИ G 01 R 35/00 Способ автоматической поверки стрелочных измерительных приборов / С.К. Киселев, Л.В. Федотов, В.А. Мишин. (Россия). - № 92008502/09-96.
3. Киселев С.К. Система автоматизации поверки электроизмерительных приборов // Датчики и системы. - 2003. - №6. - С.33-37.
4. Киселев С.К. Способы автоматической поверки стрелочных электроизмерительных приборов в динамических режимах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.05 «Прилади і методи вимірювання електричних та магнітних величин» // Киселев С.К. – Ульяновск, 1994. – 20 с.
5. Патент 2035746 Россия, МКИ G 01 R 35/00. Способ автоматического считывания показаний шкал стрелочных измерительных приборов при их поверке / С.К. Киселев, В.А. Мишин (Россия). - №5021979/21-95.
6. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994.
7. Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс Цифровая обработка изображений в среде MATLAB – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.