

ВІБРОШУМОВА ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ АПАРАТУРИ

У статті розглядається один з варіантів контролю працездатності релейної апаратури залізничної автоматики з використанням методу шумової діагностики (ідентифікація шумових сигналів на основі використання моментів щільності розподілу імовірності випадкових шумових сигналів).

В статье рассматривается один из вариантов контроля работоспособности релейной аппаратуры железнодорожной автоматики с использованием метода шумовой диагностики (идентификация шумовых сигналов на основе использования моментов плотности распределения вероятности случайных шумовых сигналов).

In the article one of variants of checking the operability of relay equipment for railway automation is examined with the use of method of noise diagnostics (an identification of noise signals on the basis of using the moments of density of probability distribution for random noise signals).

Вступ

Сучасна обчислювальна техніка дозволяє удосконалити технологію перевірки параметрів реле залізничної автоматики за рахунок автоматизації процесів вимірювання і використання програмних засобів діагностики. У багатьох країнах, що використовують електромагнітні реле в залізничній автоматичній, розв'язуються питання контролю електричних і часових параметрів електромагнітних реле за допомогою різних автоматичних цифрових пристроїв і систем. Наприклад, автоматична тестова система Automatic Relay Test System INDIA індійського виробництва, RelayPro Automated Relay Tester виробництва MRD Rail Technologies Австралії, автоматичний програмний комплекс ІАПК РТУ російського виробництва.

Відзначимо, що з використанням мікропроцесорної техніки залишаються невирішеними проблеми надійного контролю механічних параметрів електромагнітних реле. Зараз для цього використовуються методи і технології, розроблені у середині минулого сторіччя. Причому виконання ремонтно-профілактичних робіт вимагає високої кваліфікації фахівців, що виконують вручну основний об'єм технологічних операцій по вимірюванню і контролю механічних параметрів реле. Такі роботи передбачають значний час, зокрема розбирання і збирання приладу, що перевіряється, незалежно від його фактичного стану.

Одними з ефективних методів попередження аварій, виявлення несправностей у вузлах двигунів, підшипників, гідросистем, гідролокаторів, електромеханічних вузлів радіоелект-

ронної апаратури (РЕА) є акустичні методи [1]. Акустичні методи діагностування можуть використовуватись для таких електромеханічних пристроїв, як соленоїди, реле, контактори. Зокрема реле генерують електродинамічний і електромагнітний шуми, які можуть бути використані для їх діагностування.

Новітня технологія профілактичних робіт на релейній апаратурі повинна включати тестовий контроль параметрів електромагнітних реле і оптимізацію міжремонтного періоду. Ця проблема розв'язується із застосуванням пристрою і способу для вимірювання і контролю параметрів реле, запропонованого і запатентованого авторами роботи [2].

У даній статті обґрунтовується побудова акустичного каналу у пристрої [2] та розглядається принцип аналізу шумових сигналів електромагнітного реле на прикладі зміни одного з механічних параметрів.

Аналіз шумових сигналів та методів їх ідентифікації

Шумовий сигнал РЕА являє собою суму шумових сигналів від різних джерел. Такий шум може мати деяку тональність, яка визначається частотою, що відповідає максимальній амплітуді в його спектрі. Спектр шуму може бути рівномірним, позбавленим будь-якої тональності.

Однією з найбільш інформативних діагностичних характеристик шумового сигналу є розподіл ймовірностей амплітуд звукового тиску.

Характерні шумові сигнали механізмів РЕА, як показують експерименти, мають періодичні

та неперіодичні складові. Параметри шумових сигналів змінюються з часом – у бездефектних пристроїв повільно, у обладнанні, що наближається до стану руйнування, дуже швидко. Тому можна вважати, що в межах усього терміну служби пристроїв його характерний шумовий сигнал є інтервально-стаціонарним процесом за умови, що інтервали спостережень вибираються розумно, а сигнали розглядаються як реалізації випадкового процесу з нормальним розподілом.

Основним елементом комплексу програм обробки акустичних сигналів на базі аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) є цифрова фільтрація, яка використовується для відновлення сигналу після дискретизації та фільтрації непотрібних частотних складових [3]. Набір програм дозволяє обчислювати параметри розподілу: максимальне і мінімальне значення, стандартне відхилення і кореляційну функцію. Алгоритми модифікації включають масштабування, цифрову фільтрацію та інтегрування.

Після цього виникає задача ідентифікації шумових сигналів, тобто побудова математичної моделі (статистичної або динамічної) діагностування об'єкта (з дефектом і без дефекту) на основі експериментальних даних з метою вибору інформативних (визначальних) параметрів для побудови діагностичної системи. При цьому доводиться вирішувати два завдання: аналіз шумових сигналів в частотній і часовій областях, визначення зв'язків між складовими шумового сигналу і станом об'єкта, що діагностується.

Відомі два методи ідентифікації шумових сигналів: на основі частотного (спектрального) аналізу і з використанням просторових характеристик розподілу сигналів. При спектральному аналізі стан об'єкта, що діагностується, оцінюється показником порівняльного становища, при якому середньоквадратичний рівень спектрального компонента відповідного шумового або вібраційного процесу порівнюється з граничним, який вважається типовим для обладнання без дефекту [4].

Мета діагностики полягає у виявленні розвитку відмови раніше області найбільш інтенсивного зносу або руйнування точки (рис. 1.) Тому необхідно мати часову залежність роботи дефектних і бездефектних об'єктів контролю, а для забезпечення достовірних результатів застосовувати статистичні методи моделювання. Відповідно до ймовірнісного підходу, всі від-

хилення від норми розглядаються як випадкові величини, а основною вимогою до конструкції є мінімально допустима ймовірність руйнування. Труднощі реалізації методів діагностування при експлуатації складної РЕА полягає в тому, що лише в окремих випадках є інформація про кожний конструктивний параметр, яка достатня для надійного опису розподілу ймовірностей виходу цього параметра за межі допустимої величини.



Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування об'єкту контролю від часу

Звичайно використовують фізико-статистичні моделі, що описують взаємозв'язок Y -нормованого параметра об'єкта, що діагностується (ступінь зносу деталі, роз регулювання), і X -параметра шуму (амплітуди певної складової, потужності шуму і т.п.). Тоді метод статистичної ідентифікації буде полягати в тому, щоб приймати ті чи інші рішення виходячи з ймовірностей випадкової величини X , за якою ми можемо судити про величину Y .

Визнаним способом накопичення інформації та встановлення основних діагностичних оцінок є метод експертних оцінок, які є результатом накопиченого досвіду у фахівців і на основі яких складаються переліки основних несправностей і основних ознак, як правило, що є в експлуатаційній документації у вигляді таблиць типових несправностей.

Для ідентифікації методом розпізнавання образів можуть бути використані алгоритми [9], але в усіх випадках необхідно знати закони розподілу контрольованих параметрів, які в основному можуть бути визначені експериментально.

Перераховані методи ідентифікації шумових сигналів відповідним станам реального пристрою (справне, несправне) можуть бути успішно застосовані, якщо існує достовірна статистика оцінки шумових сигналів. Зокрема, інтерес представляє закон густини імовірності розподілу шумових сигналів [5].

Постановка завдання

Для створення віброшумового каналу вимірювання електродинамічних процесів, роботи електромагнітних реле необхідно визначити тип акустичних датчиків, які перетворюють акустичні коливання в електричні сигнали.

Використовуючи електродинамічні процеси, які супроводжують роботу електромагнітних реле, необхідно зафіксувати та проаналізувати створенні акустичні коливання з метою технічної діагностики блоку реле.

Шляхи рішення завдання

При роботі реле коливання передаються елементам конструкції реле і повітрю у вигляді акустичної енергії, поширюваної в середовищі. В різних точках середовища виникає змінний звуковий тиск, який і повинен сприйматися первинним перетворювачем (мікрофоном). Рівень звукового тиску в певних точках простору залежить від потужності джерела, умов розповсюдження (інтенсивності звуку в певному напрямі) і відстані до джерела.

Рівень сигналів на виході приймача залежатиме ще і від шумів навколишнього середовища і технічних характеристик приймача. Мікрофон перетворює акустичну енергію – коливання тиску – в електричну. Це перетворення можна здійснювати різними способами. За способом перетворення мікрофони діляться на електродинамічні, вугільні, п'єзоелектричні та електростатичні. Мікрофони характеризуються рядом параметрів, основні з яких приведені в [9].

Основні технічні характеристики конденсаторних мікрофонів, які можуть використовуватися в акустичній діагностиці РЕА, надані в [6].

Для прийому акустичних сигналів можуть застосовуватися і контактні п'єзоперетворювачі, описані в [7]. Але вони мають ряд недоліків, пов'язаних з обов'язковим контактом з твердим тілом. Тому останніми роками з'явилися нові методи і засоби реєстрації коливань, які використовують методи візуалізації акустичних коливань на базі елементів нелінійної оптики і акустичної голографії [8]. Але основним недоліком цих методів є їх висока вартість.

При прийомі шумових сигналів, як правило, розв'язуються дві вимірювальні задачі: виявлення джерел шуму і визначення рівня їх шумів [9].

У випадку з електромагнітним реле основним джерелом шуму є якір реле. Але навколо блоку реле створюються електромагнітні хвилі, які можуть негативним чином вплинути на електродинамічні мікрофони; для зменшення цьо-

го впливу усередині такого мікрофону розташовують додаткову обмотку. Вугільні мікрофони мають низьку якість перетворення середніх та високих звукових частот. Тому для зменшення електромагнітного впливу та підвищення якості перетворення акустичних коливань доцільно використовувати п'єзоелектричні або електростатичні мікрофони. П'єзоелектричні мікрофони дуже перспективні для таких досліджень, оскільки є можливість їх сумісного одночасного використання на кожному зовнішньому елементі реле та у будь-якому місті його корпусу. Але при виростанні п'єзоелектричних мікрофонів важко забезпечити однаковий тиск та однакову точку приєднання мікрофону до елементів реле, які перевіряються. Електростатичні мікрофони володіють меншою залежністю від зміни зовнішнього електромагнітного поля, в порівнянні з електродинамічними мікрофонами, та не існує великих проблем з їх розташуванням біля корпусу реле. Для якнайменших спотворень при перетворенні звукових коливань в електричний сигнал доцільно розташувати мікрофони в середині шумонепроникної чарунки з блоком реле, біля його корпусу, в безпосередній близькості від якоря реле. В якості мікрофону оптимальним за простотою, якістю сигналу та вартістю буде застосування конденсаторного мікрофону типу МК51 («Неватон»).

Велике значення при вимірюваннях і аналізі шумів при роботі реле має правильний вибір часу реєстрації (спостереження). Час реєстрації цих шумів повинен на порядок або більш перевищувати найтриваліші періоди шумового сигналу.

Крім того, шуми різних елементів РЕА можуть ставитися в широкі межі по частоті і по рівню залежно від режиму роботи і виду несправності. Тому для шумової діагностики і визначення вигляду і параметрів розподілу шумових сигналів у комплексі з мікрофоном необхідно застосовувати перетворювачі та пристрої, які можуть проводити статистичну обробку сигналів. Наприклад, до виходу первинного перетворювача мікрофону підключається вторинний перетворювач – АЦП та комп'ютер для управління, обробки і запису сигналів, які застосовуються у комплексі [2]. У цьому вимірювальному комплексі використовується електростатичний мікрофон, сертифікований АЦП типу LCARD E-140 зі своїм інтерфейсом та комп'ютер, що забезпечує високий ступінь точності результатів при мінімальних витратах коштів, часу і мінімальних вимогах до кваліфікації фахівців, що виконують роботу.

Аналіз шумових сигналів реле

Розглянемо один з варіантів контролю працездатності релейної апаратури залізничної автоматики з використанням методу шумової діагностики (ідентифікація шумових сигналів на основі використання моментів щільності розподілу імовірності випадкових шумових сигналів).

На рис. 2 представлені шумова діаграма роботи реле 1 в поєднанні з фактичним рухом якоря 2 після подання струму в обмотки реле НМШ 2-900.

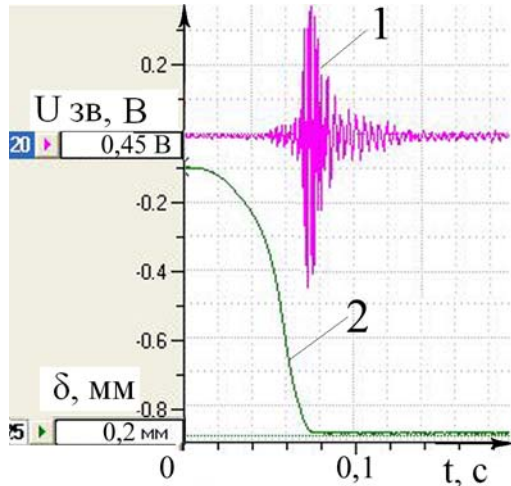


Рис. 2. Шумова діаграма 1 та рух якоря реле 2

Початок зростання амплітуди шуму співпадає з зупинкою якоря реле під час його удару о полюсний наконечник реле та може використовуватись для діагностування роботи реле.

На рис. 3 представлені акустичні шумові «портрети» механічних переміщень, що відбуваються під час включення всередині справного блоку реле типу НМШ 2-900 (рис. 3, а), при зносі антимагнітного штифта (рис. 3, б) та при штучно збільшеному антимагнітному штифті (рис. 3, в).

На діаграмі (рис. 3, б) видно, що амплітуда акустичних коливань при спрацьовуванні реле більша (величина a). Це обумовлено великим вільним ходом і прискоренням якоря перед ударом зменшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник. Час до максимуму цієї амплітуди від початку включення, також більший (величина ϵ). Це обумовлено більшою відстанню, яку проходить якорь до удару зменшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник.

На діаграмі (рис. 3, в) видно, що амплітуда акустичних коливань при спрацьовуванні реле менша (величина a). Це обумовлено зменшеним вільним ходом і меншим прискоренням якоря перед ударом збільшеного антимагнітно-

го штифта о полюсний наконечник. Час до максимуму цієї амплітуди від початку включення, менший (величина ϵ). Це обумовлено меншою відстанню, яку проходить якорь до удару збільшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник.

Дослідження, проведені з різною висотою антимагнітного штифта, показують, що в цих випадках амплітудні показники мають більш характерні розбіжності, ніж відповідні часові показники. Це обумовлено збільшенням прискорення якоря перед його ударом о полюсний наконечник при зменшеній висоті штифта (й навпаки). Швидкість якоря та енергія, з якою він ударяється о полюсний наконечник, також зростає (або зменшується), відповідно зростає або зменшується енергія акустичної хвилі, що добре фіксує мікрофон.

Акустичні діаграми роботи реле доповнюють інформацію для визначення характеру несправності реле, отриману при вимірюванні струму і фізичного зазору працюючого реле.

Таким чином, шумові портрети об'єкту, що діагностується, повинні порівнюватися з еталонними записами можливих відхилень. Розбіжність (схожість) можна успішно оцінити за допомогою наведених вище параметричних або імовірнісних критеріїв, а також інших критеріїв та методів, вживаних в математичній статистиці та кластерному аналізі [10].

Розглянемо варіант випадкового процесу виникнення акустичних коливань при зменшеному антимагнітному штифті.

З рис. 3 видно, що випадковий сигнал носить характер імовірності в певному часовому інтервалі.

Представимо опис цього випадкового процесу у вигляді густини розподілу імовірності $f(A, A_0, \sigma)$, де $A > 0$ – випадкова величина, представлена десятковим логарифмом відношення $A = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}$, де U_0 – опорне значення, а

U_1 – отримане значення шуму.

В цьому випадку густина імовірності може бути описана наступною рівністю:

$$f(A, A_0, \sigma) = \begin{cases} 0 & \text{при } A \leq 0; \\ \frac{1}{M \sigma A \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg A - \lg A_0)^2}{2\sigma^2}} & \text{при } A > 0, \end{cases} \quad (3)$$

де $M = \frac{1}{\lg e} = 2,303$;

A_0 – математичне очікування випадкової величини $A = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}$;

σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини A .

Рівність (3) є описом густини розподілу випадкової величини $A = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}$ (нормальний логарифмічний розподіл).

Ступінь наближення (3) до нормального закону визначається величиною σ .

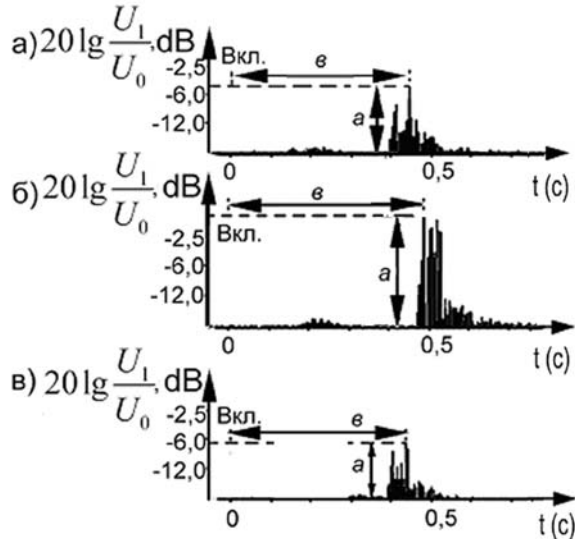


Рис. 3 Акустичні діаграми:

- а) Справного реле НМШ2-900;
- б) При зменшеному антимагнітному штифті;
- в) При збільшеному антимагнітному штифті

Правомірність застосування виразу (3) для опису випадкового процесу (рис. 3, а) може бути підтверджена методами математичної статистики і оцінки ступеня наближення статистичного розподілу випадкової величини до теоретичного розподілу.

Статистична обробка випадкових сигналів, отриманих за допомогою програмного вимірювального комплексу, дозволила визначити щільність імовірності амплітуд шумових сигналів при спрацьовуванні реле НМШ 2-900.

Амплітуди шумового сигналу при зменшеному антимагнітному штифті реле значно більше амплітуд відповідного сигналу нормального реле. Цю обставину можна використовувати для відбору реле для подальшого ремонту і регулювання.

Шумові сигнали носять випадковий характер, тому представляють інтерес отримання таких характеристик, як щільність імовірності розподілу шумових сигналів.

Використовуючи апарат статистичної оцінки законів розподілу випадкових величин амплітуди A , мають вигляд (рис. 4, 5), що узгоджується з логарифмічним нормальним розподілом (рис. 6).

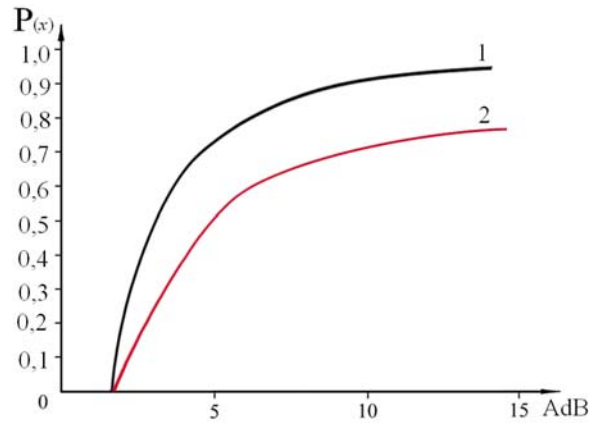


Рис. 4. Функція розподілу ймовірності шумових сигналів: 1 – несправного реле; 2 – справного реле

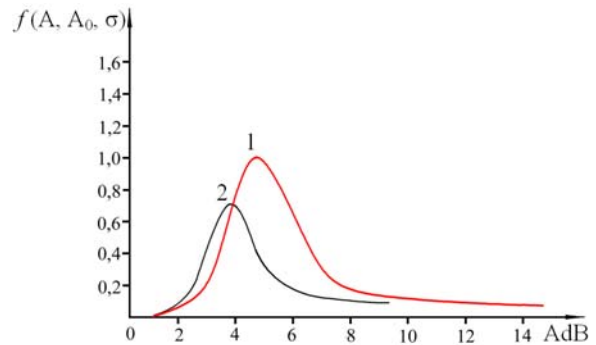


Рис. 5. Щільність розподілу ймовірності шумових сигналів: 1 – несправного реле; 2 – справного реле

При цьому функція розподілу $f(A, A_0, \sigma)$ матиме вигляд:

$$f(A, A_0, \sigma) = \begin{cases} 0 & \text{при } A \leq 0; \\ \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt & \text{при } A > 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{де } U = \frac{\lg A - \lg A_0}{\sigma}.$$

Процедуру відбракування ненадійних реле можна здійснювати за допомогою програмного комплексу шляхом порівняння середніх значень амплітуд шумових сигналів еталонного реле й того, що перевіряється. Якщо середнє значення шумових сигналів реле, що перевіряється, більше аналогічної характеристики еталонного реле, то ухвалюється рішення відбракування першого з подальшим аналізом причин відхилення від норми і відповідного регулювання або ремонту.

Так, при перевірці реле НМШ2-900 середня амплітуда шумових сигналів еталонного реле: $A_e = 0,47$ dB, а несправного реле – $A = 0,6$ dB, що підтверджує необхідність його регулювання

або ремонту. При цьому надійність прийняття рішення складає більш як 90 %.

При збільшеному антимагнітному штифті характер шумових сигналів також представляє собою імовірний процес (рис. 2, в). Прийняття рішення про справність реле в цьому випадку може бути здійснене за вищерозглянутим критерієм – порівнянням середніх значень амплітуд шумових сигналів справного і несправного реле.

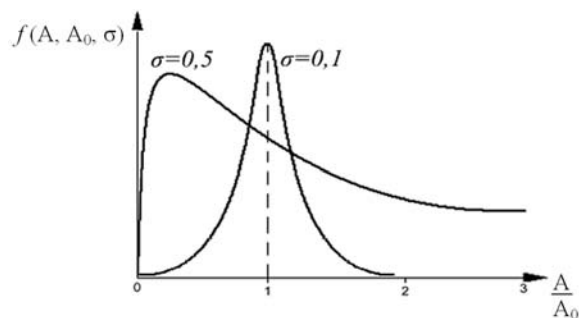


Рис. 6. Щільність розподілу ймовірності

У практичній роботі по розробці і впровадженню методів акустичної діагностики РЕА може виникнути необхідність розробки системи стандартів для підприємств галузі. В цьому випадку основними будуть три групи стандартів: по методах і засобах акустичної діагностики в широкому плані, а також по конкретних методах або методиках діагностування і, в окремих випадках, галузевий класифікаційний стандарт.

При розробці цих документів слід використовувати основні положення теорії і практики стандартизації в області засобів вимірювання. [11]. На додаток до них при розробці стандартів з акустичної діагностики складових частин РЕА можуть використовуватися принципи стандартизації методів і засобів інтегральної діагностики, викладені в [12].

Висновки

Віброшумова діагностика електромагнітної апаратури є достатньо надійним способом діагностики комутаційних засобів РЕА.

Для якнайменших спотворень при перетворенні звукових коливань в електричний сигнал доцільно розташувати мікрофони в середині шумонепроникної чарунки біля корпусу реле, в безпосередній близькості від якоря реле. В якості мікрофонів оптимальними за простотою, якістю сигналу та вартістю є застосування електростатичних мікрофонів.

Для віброшумової діагностики і визначення розподілу шумових сигналів у комплексі з мікрофонами необхідно застосовувати перетворювачі й комп'ютер із відповідним програмним

забезпеченням для управління та статистичної обробки сигналів. У пристрої [2] до виходу первинного перетворювача – мікрофону – підключаються вторинний перетворювач – АЦП типу LCARD E-140 зі своїм інтерфейсом і комп'ютер для управління, обробки і запису сигналів.

Акустичний канал у цьому комплексі використовується сумісно з оптичним, електричним і електродинамічним каналами діагностики реле і доповнює інформацію про стан об'єкту.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Коллакот, Р. А. Диагностирование технического оборудования [Текст] : [пер. с англ.] / Р. А. Коллакот; под ред. Ю. Н. Мясникова. – Л.: Судостроение, 1980.
2. Пат. 70568 на винахід Україна. Пристрій для вимірювання переміщення якоря електромагнітного реле [Текст] / Разгонов А. П., Андреевських О. В., Бондаренко Б. М., Безрукавий Д. А.; заявл. 25.04.07, Бюл. № 5 (2007).
3. Гоулд, Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов [Текст] : [пер. с англ.] / Б. Гоулд; под ред. Ю. И. Александрова. – М.: Мир, 1982.
4. Контроль шума в промышленности [Текст] : [пер. с англ.] / под ред. Дж. Д. Вебба. – Л.: Судостроение, 1981.
5. Санкар, Оценка надежности машин по степени усталостного повреждения, накопленного вследствие случайных вибраций [Текст] / Санкар, Остигат, Ксистрис // Конструирование и технология машиностроения. – 1978. – № 4.
6. Электронная аппаратура [Текст] : Каталог 1983/1984 г. фирмы «Брюль и Кьер».
7. Ермолов, И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля [Текст] / И. Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981.
8. Гик, Л. Д. Акустическая голография [Текст] / Л. Д. Гик, под ред. Н. Н. Пузырева. – Новосибирск: Наука, 1981. – 64 с.
9. Клюкин, П. И. Акустические измерения в судостроении. [Текст] / П. И. Клюкин, А. Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1966.
10. Классификация и кластер [Текст] : [пер. с англ.] / под ред. Дж. Вэн Райзин; под ред. Ю. И. Журавлева. – М.: Мир, 1980.
11. Бойцов, В. В. Роль метрологии в решении народнохозяйственных задач [Текст] / В. В. Бойцов // Измерительная техника. – 1978. – № 8. – С. 3-5.
12. Дубицкий, Л. Г. Принципы стандартизации методов и средств интегральной диагностики [Текст] / Л. Г. Дубицкий, В. Н. Сретенский, Р. И. Козлов // Электронная техника. Сер. 8. «Управление качеством, метрология, стандартизация». – 1980. – Вып. 7 (85).

Надійшла до редколегії 12.01.2010.

Прийнята до друку 18.01.2010.