

УДК 623.004.67

В.Б. Кононов

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

ВИДИ ТА МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ЗАСОБАМИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

В статті розглянуті види та методи оцінювання результатів вимірювання засобами вимірювальної техніки. Проведено порівняльний аналіз кількісних характеристик невизначеності та похибок вимірювання. Встановлено, що кількісні характеристики невизначеності мають або той самий, або децю модифікований вигляд, як і для похибок, зберігаючи в основному свій фізичний зміст.

Ключові слова: невизначеність вимірювання, похибки.

Вступ

Постановка задачі. В окремих видах метрологічної діяльності, зокрема, при виконанні робіт за міжнародними проектами, при акредитації випробувальних та калібрувальних лабораторій згідно з ДСТУ ISO/IEC 17025-2001, при постачанні продукції та наданні послуг згідно з вимогами закордонного замовника, при міжнародному звірванні національних еталонів тощо, необхідно надавати звіти про результати вимірювання з встановленням їх невизначеності. Перехід від похибок до невизначеностей вимірювань для України полягає не тільки в заміні відповідних термінів, а потребує системних заходів у метрологічному забезпеченні наукової діяльності, тощо. В теперішній час вимірювання є обов'язковою складовою професійної діяльності спеціалістів-метрологів. Тому питання, які пов'язані з визначенням видів та методів оцінювання результатів вимірювання засобами вимірювальної техніки, відносяться до важливих науково-технічних задач, актуальність яких полягає у гармонізації вітчизняних нормативних документів в галузі метрології та метрологічного забезпечення з європейськими щодо переходу на невизначеність вимірювання.

Аналіз літератури. У відомій літературі [1–4] викладені основні питання стосовно визначення понять метрології та надійності в вимірювальній техніці. Так в роботах [1, 3, 4] запропоновані основні терміни метрології, наведена класифікація засобів вимірювальної техніки, визначені похибки вимірювань. В роботі [2] викладені основні теорії похибок засобів вимірювальної техніки військового призначення (ЗВТ ВП), їх динамічних характеристик та методів дослідження цих характеристик. В роботі [5] вперше офіційно введено в міжнародну практику поняття "невизначеності вимірювання". Робота [6] є російським перекладом роботи [5]. В [7] викладені рекомендації щодо використання керівництва щодо визначення невизначеності вимірювання. Але в цих роботах не розглядається питання аналізу існуючих

поглядів на види та методи вимірювання відповідно до порівняння невизначеності та похибок вимірювання.

Метою статті є аналіз існуючих видів та методів вимірювання відповідно до порівняння невизначеності та похибок вимірювання.

Основний матеріал

Вимірювання – це відображення фізичних величин їхніми значеннями за допомогою експерименту (а іноді обчислень) із застосуванням спеціальних технічних засобів [1]. Під спеціальними технічними засобами розуміють засоби вимірювальної техніки. Відрізняють істинне і умовно істинне (дійсне) значення фізичної величини (ФВ) [1].

Істинне значення фізичної величини – це значення фізичної величини, що ідеально відображає в якісному і кількісному відношенні відповідну властивість даного об'єкта вимірювання [1].

Проте через недосконалість вимірювань і ЗВТ істинне значення ФВ, яке існує об'єктивно, незалежно від його пізнання нами, визначити експериментально в принципі неможливо. Тому для значення фізичної величини, знайденого шляхом вимірювання, застосовують терміни "умовно істинне (дійсне) значення" і "результат вимірювання" [1].

Умовно істинне (дійсне) значення фізичної величини – це значення фізичної величини, знайдене експериментально і настільки наближене до істинного значення, що може бути використано замість нього для даної мети [1].

Результат вимірювання – це значення фізичної величини, одержане шляхом її вимірювання. Результати вимірювань знаходять за показами засобів вимірювань (ЗВ) безпосередньо або після додаткових обчислень [1].

Математично результат вимірювання X (значення фізичної величини) в загальному вигляді подають у формі запису, названого *основним рівнянням вимірювання*:

$$X = \{X\}[X] = N_X X, \quad (1)$$

де $\{X\} = N_X$ – числове значення вимірюваної фізичної величини (показ ЗВ); $[X]$ – одиниця вимірювань (одиниця фізичної величини) [1].

За характером зміни вимірюваної величини (або залежності вимірюваної величини) в часі розрізняють статичні і динамічні вимірювання [1].

До статичного вимірювання належить вимірювання, при якому засіб вимірювальної техніки працює в статичному режимі, тобто тоді, коли вимірювана величина і відповідний їй сигнал вимірювальної інформації засобу вимірювальної техніки залишаються практично постійними протягом часу

вимірювання або часу використання сигналу [1].

До динамічного вимірювання належить вимірювання, яке виконується засобом вимірювальної техніки в динамічному режимі, тобто коли вимірювана величина і відповідний їй сигнал вимірювальної інформації засобу вимірювальної техніки змінюються в часі так, що для одержання результату вимірювання необхідно враховувати ці зміни [1].

Звернемось до похибок вимірювань [1]. Класифікація похибок надана на рис. 1. У загальному випадку повна похибка результату вимірювання складається з систематичної і випадкової складових, тому її слід розглядати в цілому як випадкову величину.

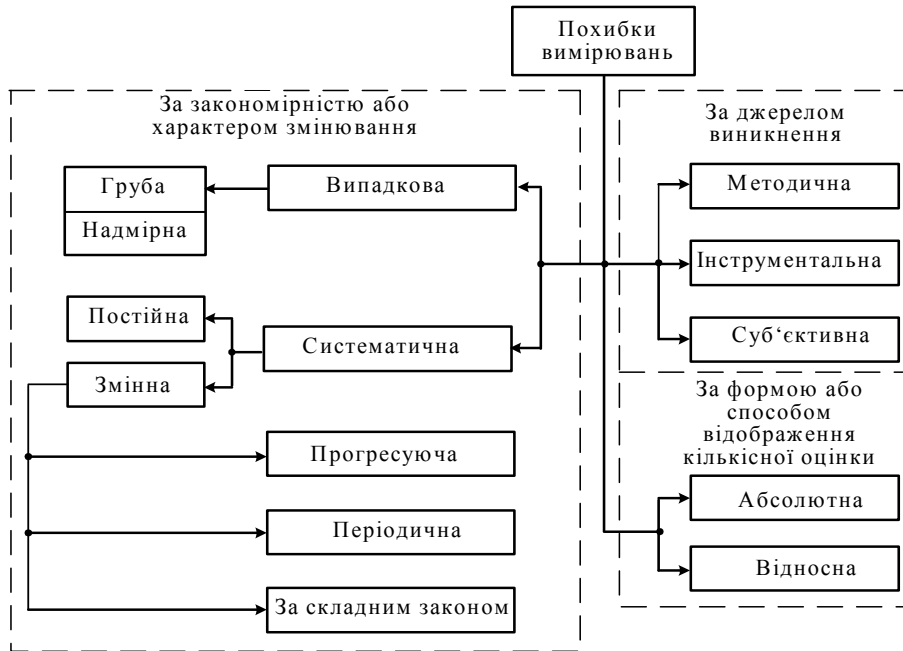


Рис. 1. Класифікація похибок

Математичне сподівання повної похибки вимірювань являє собою її абсолютну систематичну складову Δ_c , центрована складову повної похибки вимірювань – її абсолютну випадкову складову $\overset{\circ}{\Delta}$. Виходячи з вказаного, за будь-яким законом розподілу абсолютну повну похибку вимірювань можна подати у вигляді:

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}, \tag{2}$$

де $\Delta_c = M[\Delta]$; $\overset{\circ}{\Delta} = \Delta - M[\Delta] = \Delta - \Delta_c$; M – знак математичного очікування [1].

Якщо постійна систематична складову похибки вимірювання Δ_c відома, її вилучають з результату вимірювання X (або вводять поправку) і тим самим переходять до виправленого результату вимірювання

$$\tilde{X} = X - \Delta_c. \tag{3}$$

Кількісні характеристики похибок вимірювань відображають у двох формах (двома способами): абсолютній і відносній. Відповідно розрізняють абсолютну і відносну похибки вимірювань.

Абсолютна похибка вимірювання – різниця між результатом вимірювання X та істинним значенням вимірюваної величини X_i . Якщо істинне значення вимірюваної величини невідоме, то замість нього використовують умовно істинне (дійсне) значення X_y [1]. Таким чином,

$$\Delta X = X - X_i = X - X_y. \tag{4}$$

Відносна похибка вимірювання – відношення абсолютної похибки ΔX вимірювання до істинного чи умовно істинного (дійсного) значення вимірюваної фізичної величини або до результату вимірювання X [1].

Відносна похибка вимірювання виражається у відносних одиницях

$$\delta X = \Delta X / X_i = \Delta X / X_y = \Delta X / X, \tag{5}$$

або у відсотках

$$\delta X = (\Delta X / X_i) 100 = (\Delta X / X_y) 100 = (\Delta X / X) 100, \% \tag{6}$$

З відносною похибкою вимірювання пов'язане кількісне визначення точності вимірювань, яке іноді

оцінюють величиною, зворотною модулю відносної похибки. Для кількісної оцінки впливу повної похибки, а також її систематичної і випадкової складових на результат вимірювання, використовують показники якості вимірювань: точність, правильність, збіжність, відтворюваність.

Нагадаємо, що точність вимірювань звичайно характеризується відносною похибкою вимірювань: чим менша відносна похибка, тим вища точність вимірювань.

Правильність вимірювань – це показник якості вимірювань, що відбиває близькість до нуля систематичних похибок у результатах вимірювань. Тобто правильність характеризує вплив систематичної похибки на результат вимірювання [1].

Збіжність вимірювань – це показник якості вимірювань, що відбиває близькість між собою результатів вимірювань того самого розміру фізичної величини, які виконуються повторно тими самими методами вимірювань і засобами вимірювальної техніки в однакових умовах [1].

Таким чином, збіжність результатів вимірювань відображає близькість до нуля випадкової похибки.

Відтворюваність (або повторюваність у встановлених границях похибки) вимірювань визначається близькістю між собою результатів вимірювань того самого розміру фізичної величини, які отримують у різних місцях і в різний час виконання експерименту, різними методами вимірювань і засобами вимірювальної техніки, але приводять до однакових умов виконання вимірювань (температури, тиску, вологості та інших впливних величин) [1].

Збіжність і відтворюваність можуть бути оцінені кількісно дисперсією результатів вимірювань.

У вітчизняних нормативних документах для оцінювання точності вимірювань зберігається традиційний підхід, що ґрунтується на понятті "похибка вимірювань". Новий підхід рекомендується МКМВ, МОЗМ, Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК) та іншими міжнародними організаціями. Цей підхід ґрунтується на оцінюванні точності вимірювань за допомогою поняття "*невизначеність вимірювань*" (або просто "*невизначеність*").

Поняття "*невизначеності вимірювання*" офіційно введено в міжнародну практику в 1993 р., коли було опубліковано роботу [5] та її російський переклад [6]. Одночасно було розроблено [7].

Невизначеність вимірювання (а точніше невизначеність результату вимірювання) – це параметр, що зв'язаний з результатом вимірювання та характеризує певну дисперсію (розсіяння) значень, які можуть бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині [6].

Отже, невизначеність вимірювань означає сумнів відносно вірогідності результатів вимірювань.

У літературі з метрології та в будь-яких міжнародних документах нема досить переконливих обґрунту-

вань щодо відмови від терміна "похибка" і заміни його новим терміном "невизначеність" [1 – 4]. Це найактуальніша тема в метрології за останні 5 – 6 років. В сучасній літературі наголошуються на переваги невизначеності як показника вимірювань у порівнянні з класичним поняттям похибки вимірювань [3, 4].

Визначаються три переваги невизначеності:

- з уведенням поняття невизначеності усувається поняття істинне значення вимірювальної величини;

- з уведенням поняття невизначеності усувається поняття абсолютна похибка вимірювань, яка виражається через істинне значення вимірювальної величини;

- усувається розподіл похибок вимірювань на систематичні та випадкові похибки [3, 4].

Оскільки в класичній метрології поняття істинне значення вимірювальної величини, абсолютна похибка вимірювань, і розподіл похибок на систематичні та випадкові є фундаментальними положеннями, то ставиться під сумнів вся класична метрологія, хоча все це не ґрунтується на поглибленому аналізі [7].

Дійсно, в класичному підході в метрології притаманні окремі вади та протиріччя, хоча ні одне з них не вдалося усунути введеним поняття невизначеності вимірювання.

По-перше, відмова від істинного значення. Керівництво [7] не категорично в цьому твердженні. Ведеться мова про те, що значення вимірювальної величини та істинне значення вимірювальної величини еквівалентні поняття. Таким чином, можна відмітити, що наведені визначення не зовсім коректні, на мій погляд, така оцінка повинна бути компромісною: істинне значення вимірювальної величини не усувається, а лише замінюється значенням вимірювальної величини. На практиці в класичних вимірюваннях істинне значення визначити експериментально в принципі неможливо, можна здійснити тільки його оцінку, наприклад середнє арифметичне значення результатів багатократних вимірювань, на що спирається невизначеність вимірювання. Здійснюється лише перехід від ідеальних (абстрактних термінів до реальних, чим усувається неузгодженість у цій частині і практики вимірювань).

Співставимо рекомендовані оцінки для відображення кількісних характеристик невизначеності та похибок. Кількісні характеристики невизначеності мають або той самий, або дещо модифікований вигляд, як і для похибок, зберігаючи в основному фізичний зміст. Тому заміна вказаних термінів обумовлена не принципово якісними, фундаментальними обґрунтуваннями, а асоціативністю їх розуміння. Так, термін "похибка" асоціюється з визначеною величиною, а термін "невизначеність" – з сумнівом, невпевненістю, що нібито більше відображає фізичний зміст результату вимірювання [7].

Види невизначеності вимірювань [6]:

- стандартна невизначеність (типи А і В);
- сумарна стандартна невизначеність;
- розширена невизначеність.

Стандартна невизначеність – це невизначеність результату прямих вимірювань, яка виражена через середнє квадратичне відхилення.

За методом обчислення розрізняють два типи стандартної невизначеності:

- стандартна невизначеність за типом А;
- стандартна невизначеність за типом В.

Стандартна невизначеність типу А – це невизначеність, яка обчислюється статистичними методами обробки результатів багаторазових вимірювань (спостережень) [6].

Вихідні дані – результати багатократних вимірювань, представлених вибіркою $X_q, q = \overline{1, n}$.

а) стандартна невизначеність за типом А окремого результату вимірювань $X_q, q = \overline{1, n}$:

$$\hat{\sigma}_{X_q} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (X_q - \bar{X})^2} = u_{A_{X_q}} \equiv u_{A(X_q)} \quad (7)$$

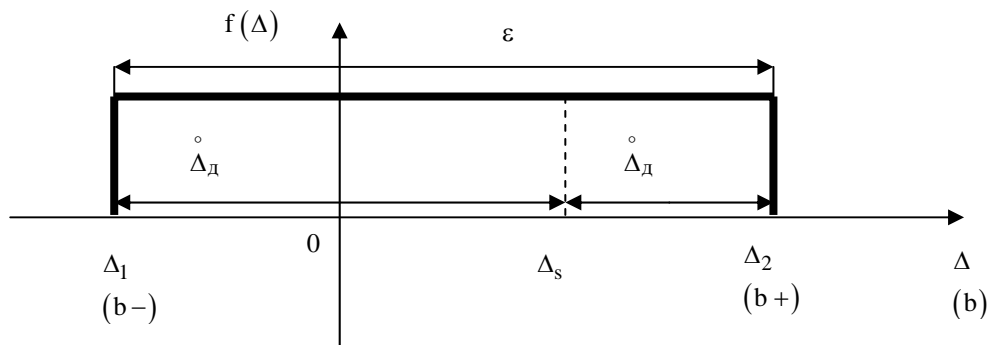


Рис. 2. Стандартна невизначеність за типом В

Вихідні дані невизначеність вимірювань типу В:

- дані попередніх вимірювань величин, що входять у рівняння вимірювань; відомості про закони (функції розподілу ймовірностей цих величин);
- дані, що ґрунтуються на загальних знаннях про поведінку та властивості відповідних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);
- невизначеності констант і довідкових даних;
- дані повірок і калібрувань, відомості виробника ЗВТ про їх властивості (характеристики) і т.ін.

$$\hat{\sigma}_X = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2\sqrt{3}} = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{3}} = u_B; \quad \hat{\sigma}_\Delta = \frac{\Delta_d}{\sqrt{3}} = u_B \quad (9)$$

Сумарна стандартна невизначеність – це стандартна невизначеність результату вимірювання, яка представляє суму складових цієї невизначеності. [6]. Вона має фізичний зміст дисперсії результату вимірювань і обчислюється через дисперсії (квадрати стандартних невизначеностей) інших фізичних

б) стандартна невизначеність за типом А середнього арифметичного результатів багатократних вимірювань $X_q, q = \overline{1, n}$:

$$\hat{\sigma}_{\bar{X}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{q=1}^n (X_q - \bar{X})^2} = u_{A_{\bar{X}}} \equiv u_{A(\bar{X})} \quad (8)$$

Стандартна невизначеність типу В – це невизначеність, яка обчислюється за деякою апріорною інформацією: даними попередніх вимірювань величин, що входять в рівняння; даними вимірювань, що ґрунтуються на досвіді експериментатора або загальних знаннях про поведінку відповідних об’єктів і засобів вимірювальної техніки, даними їх повірки, атестування і калібрування; невизначеності констант і довідкових даних тощо [6] (рис. 2). Невизначеність усіх цих даних звичайно відображають границями відхилення результату вимірювання фізичної величини від оцінки її істинного значення. Тому невизначеність вимірювань типу В залежить від закону розподілу можливих значень вимірюваної величини.

величин (аргументів), через які визначається шукана фізична величина:

а) суму складових невизначеності прямих багатократних вимірювань

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}; \quad (10)$$

б) суму складових невизначеності опосередкованих вимірювань $Y = f(X_1, \dots, X_i, \dots, X_m)$:

- для корельованих величин $X_i, i = \overline{1, m}$:

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 u^2(X_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial X_i} \frac{\partial f}{\partial X_j} r(X_i, X_j) u(X_i) u(X_j)} \quad (11)$$

Аналог похибки:

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \hat{\sigma}_{X_i}^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial X_i} \frac{\partial f}{\partial X_j} r(X_i, X_j) \hat{\sigma}_{X_i} \hat{\sigma}_{X_j}}; \quad (12)$$

– для некорельованих величин X_i , $i = \overline{1, m}$,

якщо $r(X_i, X_j) = 0$:

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 u^2(X_i)}. \quad (13)$$

Аналог похибки:

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}. \quad (14)$$

Розширена невизначеність – це величина, що визначає інтервал, у границях якого знаходиться більша частина результатів непрямих вимірювань, які з достатньою підставою можуть бути приписані вимірюваній величині [6]. Розширена невизначеність вимірювань обчислюється через сумарну стандартну невизначеність $U = k_0 \cdot u_c$, де k_0 – коефіцієнт охоплення.

Проаналізуємо інтервальну оцінку похибки

$$\Delta_d = k_p \bar{\sigma}_\Delta. \quad (15)$$

Звичайно

$$k_o = t_o(v_{\text{еф}}) \quad \text{і} \quad k_p = t_p(v_{\text{еф}}), \quad (16)$$

де $t_p(v_{\text{еф}})$ – коефіцієнт Стюдента, або квантіль розподілу Стюдента з ефективним числом степенів вільності $v_{\text{еф}}$ і довірчою ймовірністю (рівнем довіри) P .

Для коефіцієнта k_o :

$$v_{\text{еф}1} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(X_i)}{v_i} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^4}. \quad (17)$$

Для коефіцієнта k_p :

$$v_{\text{еф}2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 \right]^2}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i + 1} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^4 \sigma_{X_i}^4} - 2. \quad (18)$$

ВИДЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В.Б. Кононов

В статье рассмотрены виды и методы оценивания измерения средствами измерительной техники. Проведён сравнительный анализ количественных характеристик неопределённости и погрешности измерения. Установлено, что количественные характеристики неопределённости имеют или такой же самый, или несколько модифицированный вид, как и для погрешностей, сохраняя в основном их физическое содержание.

Ключевые слова: неопределённость измерения, погрешности.

KINDS AND METHODS OF EVALUATION OF RESULTS OF MEASURING FACILITIES OF MEASURING TECHNIQUE

V.B. Kononov

Kinds and methods of evaluation of measuring facilities of measuring technique are considered in the article. The comparative analysis of quantitative descriptions of vagueness and measuring error is conducted. It is set that quantitative descriptions of vagueness have or the same same, or a few the modified kind, as well as for errors, saving their physical maintenance mainly.

Keywords: measuring vagueness, errors.

ВИСНОВКИ

1. В статті проаналізовані основні визначення теорії похибок та невизначеності.

2. Проведено порівняльний аналіз кількісних характеристик невизначеності та похибок вимірювання, за результатами якого встановлено, що кількісні характеристики невизначеності мають або той самий, або дещо модифікований вигляд, як і для похибок, зберігаючи в основному свій фізичний зміст. Тому заміна вказаних термінів обумовлена не принципово якісними, фундаментальними обґрунтуваннями, а асоціативністю їх розуміння.

3. Вирішено питання гармонізації вітчизняних нормативних документів в галузі метрології та метрологічного забезпечення з європейськими щодо переходу на невизначеність вимірювання доцільно враховувати порівняльний аналіз кількісних характеристик невизначеності та похибок вимірювання, якій приведений в цій статті.

Список літератури

1. Чинков В.М. *Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. Частина 1* / В.М. Чинков. – Х.: ХВУ, 2001. – 424 с.

2. Чинков В.М. *Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. Частина 2* / В.М. Чинков. – Х.: ХУПС, 2007. – 86 с.

3. Бичківський Р.В. *Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація: підручник* / Р.В. Бичківський, П.Г. Столярчук, П.Р. Гамула. – 2-ге вид., випр. і доп. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2004. – 560 с.

4. Боженко Л.І. *Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація: навчальний посібник* / Л.І. Боженко. – Львів: Афіша, 2004. – 324 с.

5. *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement: First edition – ISO/Switzerland, 1993. – 101 p.*

6. *Руководство по выражению неопределённости измерения.* – СПб.: – НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 134 с.

7. *Рекомендация ГСИ МИ2552-99 Применение „Руководства по выражению неопределённости измерения”.*

Надійшла до редколегії 14.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.І. Кондрашов, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.