

621,3
3-14
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"

Ю.С. Козирев, К.В. Скульський, В.І. Лазненко, Є.В. Гошкін

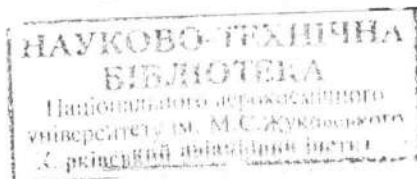
ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

Навчальна

Научно-техническая
библиотека
"ХАИ"



mt0224025



Харків "ХАИ" 2002

[389 782 2 4 700 31] (045.8)

УДК 53Б91

Загальні характеристики засобів вимірювань / Ю.С. Козирев, К.В. Скульський, В.І. Лазненко, Є.В. Гошкін. – Навч. посібник. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т "Харк. авіац. ін-т", 2002. – 37 с.

Розглянуто загальні питання організації метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки. Викладено основні визначення, загальні характеристики та класифікацію засобів вимірювань.

Для студентів, що проходять військову підготовку за профілем ВПС.

Іл. 8. Табл. 4. Бібліогр.: 10 назв

Рецензенти: д-р техн. наук А.Ф. Величко,
канд. техн. наук, доц. М.І. Зинов'єв

©Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут", 2002 р.

ВСТУП

Однією з основних умов підтримання заданої надійності та ефективності військової техніки є глибокі професійні знання і тривкі практичні навички обслуговуючого персоналу.

Експлуатація військової техніки пов'язана з проведенням вимірювань та аудитом великої кількості їх параметрів з використанням різних типів засобів вимірювань, тому обслуговуючий персонал повинен мати певні знання в галузі метрології.

Однак теоретичні і практичні основи метрології викладено в численних літературних джерелах, що створює певні труднощі для інженерно-технічних фахівців у пошуках відповідей на запитання, що виникають в їхній повсякденній діяльності.

Виникла необхідність в розробці навчального посібника, в якому б системно викладалася інформація з загальної теорії та практики вимірювань, де б були наведені метрологічні характеристики засобів вимірювань, правила їхнього вибору за діапазоном і точністю, порядок обробки результатів вимірювань та ін.

1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ТА ВИМОГИ ДО НИХ

1.1. Основні визначення метрології

Метрологія — наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їхньої єдності та способи досягнення потрібної точності.

До метрології відносять: загальну теорію вимірювань; одиниці фізичних величин та їхні системи; методи і засоби вимірювання; методи визначення точності вимірювання; основи забезпечення єдності вимірювань та одноманітності засобів вимірювань; еталони і зразкові засоби вимірювання; методи передачі розмірів одиниць від еталонів і (або) зразкових засобів вимірювання до робочих засобів вимірювання.

Фізична величина — властивість, загальна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів (фізичних систем, їхніх станів та процесів, що в них відбуваються), але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкта.

Значення фізичної величини — оцінка фізичної величини у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць. Абстрактне число, що визначає значення фізичної величини, називається числовим значенням.

Вимірювання — знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Результат вимірювання — значення фізичної величини, знайдене шляхом її вимірювання (деяке число, прийняте для даної фізичної величини і яке дає кількісну (вимірювальну) інформацію про властивості вимірюваної фізичної величини).

Істинне значення фізичної величини — значення, що ідеально відображає в якісному і кількісному відношеннях відповідну властивість даного фізичного об'єкта.

Дійсне значення фізичної величини — значення, знайдене експериментальним шляхом і яке настільки наближається до істинного значення, що для даної мети може бути використане замість нього.

Одиниця фізичної величини — фізична величина, якій за визначенням присвоєно числове значення, що дорівнює 1.

Єдність вимірів — такий стан вимірів, при якому їхні результати виражено в узаконених одиницях, похибки вимірювань відомі з заданою імовірністю. Єдність вимірювань дозволяє порівняти результати вимірювань, виконаних з використанням різних методів і засобів вимірювань у різних місцях і в різний час.

Похибка вимірювання — відхилення результатів вимірювань від істинного значення вимірюваної величини.

Точність вимірювань — якість вимірів, що відображає близькість їхніх результатів до істинного значення вимірюваної величини.

1.2. Класифікація засобів вимірювань

Усі засоби вимірювань поділяються на міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади, вимірювальні установки та вимірювальні системи. Засіб вимірювань може бути зразковим або робочим.

Зразковий засіб вимірювань (міра, вимірювальний прилад) служить для перевірки інших засобів вимірювань.

Робочий засіб вимірювань застосовується при вимірюваннях, не пов'язаних з перевіркою.

Величезну масу різноманітних мір і вимірювальних приладів можна поділити за призначенням на три групи:

1. Джерела каліброваних вимірювальних сигналів для впливу на досліджувані електричні або радіотехнічні об'єкти з метою одержання їхніх експериментальних характеристик. Зразкові джерела сигналів використовуються також для градування робочих приладів і вимірювання деяких параметрів сигналів.

2. Прилади для вимірювання значень фізичних параметрів сигналів і режимів ланцюгів. До цієї групи входять вольтметри, амперметри, ваттметри, осцилографи, частотоміри, вимірники нелінійності та ін.

3. Прилади для вимірювання характеристик і параметрів ланцюгів. До таких приладів належать: вимірники індуктивності котушок, ємності конденсаторів і опорів резисторів; вимірники добротності коливальних контурів; вимірники амплітудно-частотних і перехідних характеристик; прилади для випробувань напівпровідникових приладів, інтегральних мікросхем та ін.

1.3. Міри та еталони електричних величин

Мірою називається засіб вимірювання, призначений для відтворення фізичної величини заданого значення (розміру). За відтворюваними значеннями вони поділяються на однозначні, багатозначні та набори.

Однозначні міри відтворюють фізичну величину одного розміру, багатозначні – ряд однойменних величин різного розміру, набір мір містить комплект мір, що застосовуються як зокрема, так і в різних поєднаннях. Набір мір, конструктивно об'єднаний в одне ціле з переключальними приладами для відтворення ряду однойменних величин різних значень, називають магазином (магазин опорів, магазин ємностей і т. п.).

В області вимірів особливе місце займає еталон одиниці фізичної величини:

Еталон є комплексом засобів вимірювань, що виконується за особливою специфікацією і затверджений Держстандартом СРСР як еталон. Він призначений для відтворення і (або) зберігання одиниці з метою передачі її значення (розміру) засобам вимірювань, що стоять нижче в перевірній схемі.

Існують еталони одиниць довжини, часу, частоти, напруги, струму, опору, фази та інших величин.

Для кожної одиниці використовують сім'ю еталонів, яка включає:

- первинний еталон, що відтворює одиницю з найвищою в даній країні точністю;
- вторинний еталон, значення якого встановлюється за первинним еталоном;
- еталон-копію – вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці робочому еталону;
- робочий еталон – еталон, призначений для передачі розміру одиниці зразковим засобам вимірювань.

Первинний еталон, офіційно затверджений як початковий для країни, називається державним еталоном. Якщо державний еталон не можна швидко відтворити, то для перевірки його зберігання та заміни у випадку пошкодження або втрати застосовується еталон-свідок.

Усі перераховані еталони являють собою фізичні копії первинного

еталона; відмінність в назвах характеризує їхнє призначення та виконання.

Міри та еталон ЕДС. Як зразкову міру ЕДС використовують нормальні елементи, складові частини яких строго нормовані. Нормальні елементи випускають двох типів: насичені й ненасичені. Для обох типів елементів позитивним електродом є ртуть, негативним — амальгама кадмію і електролітом — водний розчин сірчанокислового кадмію. Насичені елементи поділяються на три класи: 0,001; 0,002; 0,005. Ці числа показують допустимі модифікації ЕДС за рік. Клас ненасичених елементів, що випускаються, — 0,02. Їх позитивна якість — мала залежність ЕДС від температури (0,0002% на 1 К). Нормальні елементи випускають в дерев'яних або пластмасових кожухах. Їх не можна валяти і струшувати, піддавати нагріву і сильному освітленню.

Еталон вольтів складається з 20 нормальних насичених елементів і компаратора для їхнього звіряння. Групу нормальних елементів поміщають в термостат з нестабільністю $\pm 0,01^\circ\text{K}$ при температурі близько 20°C . Середнім значенням ЕДС групи нормальних елементів прийнято 1,018640 В. Зберігання та передача розміру одиниці вторинним еталонам здійснюються із середньоквадратичною похибкою 10^{-7} .

Міри та еталон електричного опору. Як міри опору застосовуються зразкові резистори, виконані у вигляді котушок з одним значенням опору 10^{2n} , де n — ціле число. Застосовуються й набори зразкових резисторів —магазини опорів. Резистори виготовляють з манганіну — сплаву на основі міді з додаванням марганцю та нікелю; сплав має високий питомий опір (0,47 мкОм·м) і малий температурний коефіцієнт ($2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Для кожної котушки (магазину) встановлено граничне значення робочого струму з таким розрахунком, щоб підведена до котушки потужність не перевищувала 1 Вт. Магазины опорів випускають класами точності 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 та 1,0.

Державний еталон ома складається з манганінових котушок із номінальним опором 10 Ом і мостової вимірювальної установки. Середнє значення опору групи з 10 котушок, яке визначає розмір одиниці, дорівнює 1,00000002 Ом. Середньоквадратична похибка зберігання одиниці електричного опору і передачі розміру вторинним еталонам складає 10^{-7} .

Міри та еталон індуктивності та взаємної індуктивності. Зразкові міри індуктивності виготовляють у вигляді плоских котушок, що являють собою ізольований або високочастотний обмотковий провід, намотаний на порцеляновий або керамічний каркас, відносна магнітна проникність якого дорівнює одиниці. Міри змінної та взаємної індуктивностей виконують у вигляді магазинів, що складаються з

набору котушок і перемикачів, та варіометрів. Первинний еталон одиниці індуктивності – генрі – виготовляють у вигляді групи з чотирьох котушок із середнім значенням індуктивності 0,211570 Гн та мостової вимірювальної схеми. Індуктивність кожної котушки розраховується за її геометричними розмірами. Похибка відтворення не перевищує 10^{-5} .

Міри та еталон електричної ємності. Зразкові конденсатори постійної ємності виготовляють з повітряним або слюдяним діелектриком. Зразкові конденсатори змінної ємності виконують тільки з повітряним діелектриком. Тангенс кута втрат – не більш 10^{-4} ; опір ізоляції між затискачами досягає 10^{11} Ом. Індуктивність обкладок дуже мала. Зразкові конденсатори, призначені для роботи при високих напругах, поміщають в герметичні кожухи, які наповнюють вуглекислим газом або азотом при тиску до 1 МПа.

Первинний еталон одиниці ємності – фарада – являє собою розрахунковий конденсатор, в якому зміна ємності визначається за геометричними розмірами електродів, швидкістю світла та магнітною сталою. Зміна ємності складає $0,4002443 \cdot 10^{-12}$ пФ при частоті 1 кГц. Середньоквадратичне відхилення результату вимірювань не перевищує 10^{-6} .

Міри та еталон електричного струму. Як зразкові засоби вимірювань струму застосовують електродинамічні амперметри відповідних класів точності, а для відтворення одиниці сили струму — ампера — так звані струмові терези. Вони являють собою високочутливі рівносторонні терези, в яких замість однієї шальки підвішена плоска котушка, яка зрівноважується важками, поміщеними на другу шальку. Друга котушка, не зв'язана з терезами, розташовується коаксиально першій і з'єднується з нею послідовно. Коли по котушці протікає струм, внаслідок електродинамічної взаємодії котушок рухома котушка опускається, і для збереження рівноваги терезів необхідно додати певний вантаж, що компенсує силу взаємодії. Знаючи цю силу і параметри котушок, можна визначити силу струму.

Первинний еталон ампера складається з електродинамічної системи у вигляді двох котушок і терезів з дистанційним керуванням. Ціна поділки терезів складає 10^{-7} кг. Сила взаємодії струмів, які пропускаються по обмотках рухомої і нерухомої котушок, зрівноважується силою ваги важка.

Значення сили постійного струму, що відтворюється еталоном, складає 1,018646 А.

Середньоквадратичне відхилення результату вимірювань не перевищує $4 \cdot 10^{-6}$.

2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

2.1. Вимірювальні перетворювачі

Вимірювальним перетворювачем називається засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та (або) зберігання, але яка не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем.

В електровимірювальній техніці застосовуються такі види перетворювачів: електромеханічні, термоелектричні, випрямні, аналого-цифрові, масштабні.

В електромеханічному перетворювачі електромагнітна енергія $W_{ем}$, що надходить на вхід приладу, перетворюється в механічну, викликаючи переміщення рухомої частини перетворювача відносно нерухомої. Використовується здебільшого кутове переміщення, при якому рухома частина повертається навколо деякої осі на кут α , пропорційний вхідній електричній величині $\alpha = f(C, X)$, де C — параметр перетворювача.

Термоелектричні перетворювачі призначені для перетворення змінного електричного струму в постійний.

Випрямні перетворювачі перетворюють змінний струм в пульсуючий, постійна складова якого є вихідною величиною перетворювача. Залежно від схемного рішення випрямні перетворювачі поділяються на перетворювачі середньовипрямленого (середнього) значення і перетворювачі амплітудного (пікового) значення. Вихідна величина, тобто постійна складова випрямленого струму перетворювача, є функцією середньовипрямленого або амплітудного значення вхідної величини, тобто змінного струму або напруги.

Аналого-цифрові перетворювачі призначені для перетворення безперервної електричної величини $X(t)$ у дискретний сигнал. Головними позитивними якостями аналого-цифрових перетворювачів є висока завадостійкість, швидкодія та мала похибка перетворення.

Масштабні перетворювачі призначені для зміни значення електричної величини у задане число раз. До них відносять подільники напруги, атенюатори, вимірювальні трансформатори і вимірювальні підсилювачі.

Масштабні перетворювачі можуть бути окремими засобами вимірювань або входити частиною в інші засоби вимірювань.

Подільники напруги призначені для зменшення напруги.

Найпростіший подільник складається із двох послідовно з'єднаних резисторів.

Резисторні подільники напруги можна застосовувати на

постійному і змінному струмах до частот не вище 1 МГц. На більш високих частотах починають виявлятися паразитні ємності та індуктивності резисторів і монтажних приводів, і їхній коефіцієнт ділення не залишається постійним при зміні частоти.

На змінному струмі застосовують індуктивні подільники напруги. Коефіцієнт ділення індуктивного подільника не залежить від частоти при її значеннях до декількох мегагерц. На більш високих частотах на коефіцієнт ділення починають виявляти вплив міжвиткова ємність та поверхневий ефект проводів обмотки.

Ємнісний подільник можна застосовувати на більш високих частотах — аж до декількох сотень мегагерц. Цей подільник можна зробити з коефіцієнтом ділення, який плавно змінюється, для цього достатньо використати конденсатор змінної ємності.

Негативна якість ємнісних подільників — залежність їхніх вхідного та вихідного опорів від частоти.

Атенюатори являють собою чотириполюсники, які призначені для плавного, покрокового або фіксованого ослаблення сигналу (напруги, сили струму, потужності). На відміну від подільника напруги вхідний опір атенюатора в процесі регулювання не змінюється, якщо опір навантаження постійний. Атенюатори характеризуються діапазоном робочих частот, межами ослаблення, розсіюваною потужністю, вхідним і вихідним опорами та похибкою установлення ослаблення, а атенюатори, що працюють на НВ-частотах, — коефіцієнтом стоячої хвилі.

Вимірювальні трансформатори призначені для зменшення у відоме число раз змінного струму (трансформатори струму) або напруги (трансформатори напруги). Трансформатори складаються із замкнутого осердя, виготовленого з електротехнічної сталі або пермалою, та двох обмоток. Первинна обмотка підмикається до лінії, струм або напругу в якій необхідно виміряти; вторинна обмотка з'єднується з вимірювальним приладом.

Вимірювальні підсилювачі призначені для підсилення сигналів змінного і постійного струмів. За діапазоном частот вимірювальні підсилювачі поділяються на низькочастотні (20 – 25 ... 200 – 230 кГц), високочастотні (до 250 МГц) та селективні (вибірні), що посилюють сигнали у вузькій смузі частот. Усі підсилювачі випускають з нормованою похибкою коефіцієнта передачі, що досягається глибоким негативним зворотним зв'язком. Багато підсилювачів обладнані калібратором напруги та вимірником вихідної напруги, що дозволяє установлювати і контролювати коефіцієнт підсилення (від 20 до 100 дБ залежно від типу підсилювача). Промисловістю випускаються підсилювачі, призначені для підсилення малих струмів (10^{-15} ... 10^{-9} А); вхідний опір таких підсилювачів досягає 10^{12} Ом.

2.2. Вимірювальні прилади

Вимірювальним приладом називається засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Вимірювальні прилади складаються з вимірювальних перетворювачів та відлікового пристрою. За побудовою структурної схеми (рис. 2.1) усі прилади поділяються на прилади прямого перетворення (а), в яких перетворення вимірюваної величини відбувається в одному напрямку, та прилади зрівноважування або порівняння (б), в яких окрім прямого відбувається й зворотне перетворення (зворотний зв'язок). Вимірювана величина зазнає прямого перетворення $Пр_1, \dots, Пр_n$ та по ланцюгу зворотного зв'язку β_1, \dots, β_n надходить на порівнюючий пристрій (ПП) з деяким значенням X_β . Відліковий пристрій (ВП) реагує на Δx та дозволяє за відомим коефіцієнтом передачі ланцюга зворотного перетворення визначити значення вимірюваної величини.

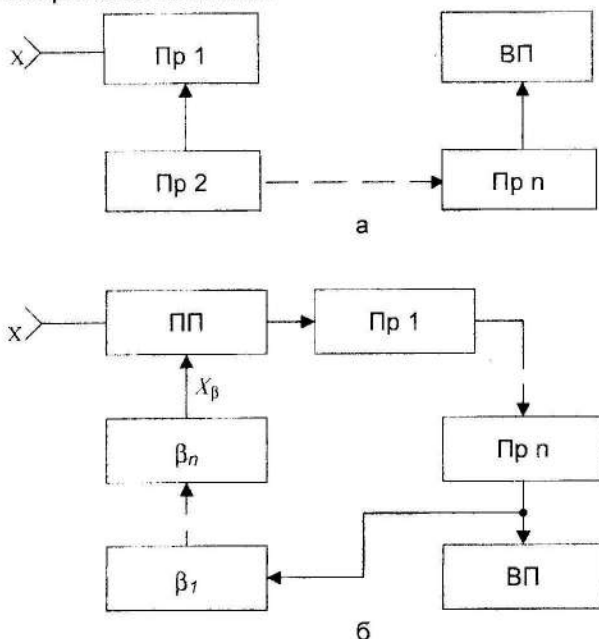


Рис. 2.1. Структурні схеми вимірювальних приладів:
а – прилади прямого перетворення; б – прилади зрівноважування

До приладів зрівноважування належать і компенсаційні прилади, у ланцюзі зворотного зв'язку яких поміщено зразкову міру; значення її встановлюється рівним значенню вимірюваної величини по нульовій позначці індикатора порівнюючого пристрою ($\Delta x = 0$).

Вимірювальні прилади можна класифікувати таким чином:

- за принципом дії перетворювача — електромеханічні, випрямні, термоелектричні, електронні;
- за видом струму – для вимірювань у постійному струмі, для вимірювань у змінному струмі, універсальні;
- за діапазоном частот – низькочастотні, високочастотні, надвисокочастотні;
- за видом інформації – стрілкові (аналогові), цифрові (дискретні);
- за формою інформації — показувальні, реєструючі, самописні, друкуючі.

2.3. Вимірювальні установки та системи

Вимірювальні установки — сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювань (міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади) і допоміжних приладів, призначених для вироблення вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття оператором, й розташованих в одному місці. Вимірювальні установки широко застосовуються для перевірки робочих мір, вимірювальних приладів і т. п.

Вимірювальна система (рис. 2.2) — сукупність засобів вимірювань і допоміжних приладів, з'єднаних для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для автоматичної обробки, передачі та використання в автоматичних системах керування. Створення таких систем пов'язане з новим перспективним етапом розвитку вимірювальної техніки — побудовою автоматизованих систем на базі радіовимірювальних (РВП) та електровимірювальних (ЕВП) приладів загального застосування.

Засоби вимірювань, що використовуються для побудови вимірювальних систем, повинні мати сумісність, уніфікацію елементної бази та конструктивну однаковість.



Рис. 2.2. Узагальнена схема вимірювальної системи

2.4. Основні властивості засобів вимірювань

Засоби вимірювань характеризуються чутливістю, межами вимірювання, варіацією показань, похибкою, вхідним та вихідним опорами, динамічними характеристиками, умовами застосування, стабільністю та надійністю.

Чутливістю вимірювального приладу називається відношення зміни величини на виході (показання α) до зміни величини X , що спричиняє її, на вході: $S = d\alpha / dX$. При рівномірній (лінійній) шкалі чутливість приладу постійна, а при нерівномірній – різна в різних її точках. $S = \Delta\alpha / \Delta X$, де $\Delta\alpha$ та ΔX – прирости показання та вхідної величини відповідно. Чутливість вимірюється у різних одиницях (вольт на поділку, міліметр на вольт і т. п.).

Характеризувати прилад можна і порогом чутливості. Поріг чутливості – зміна вимірюваної величини, що спричиняє найменшу

зміну показання приладу, яку можна зафіксувати без додаткових приладів. Поріг чутливості цифрових приладів збігається з одиницею молодшого розряду.

Границя вимірювання — область значень вимірюваної величини від X_{\min} до X_{\max} , для якої допустимі похибки нормовані. Границю вимірювання часто поділяють на декілька ділянок зі своїми границями (прилади у цьому випадку називаються багатограничними).

Діапазон робочих частот — смуга частот, в межах якої похибка приладу нормована.

Варіація показань вимірювального приладу розраховується як середня різниця показань в даній точці шкали при повільному підході до неї з двох напрямків — з боку меншого та з боку більшого значень вимірюваної величини.

Вхідний опір вимірювального приладу характеризує реакцію вхідного сигналу на підключення даного приладу до джерела вхідного сигналу з фіксованим опором. При вимірюванні на постійному струмі або струмі низької частоти ця реакція полягає в споживанні потужності від джерела вимірюваного сигналу.

При вимірюванні на високих частотах вхідний опір $Z_{вх}$ являє собою комплексний опір. Вхідне коло будь-якого вимірювального приладу можна зобразити у вигляді еквівалентної схеми (рис. 2.3), яка складається з індуктивності, ємності, активного опору.

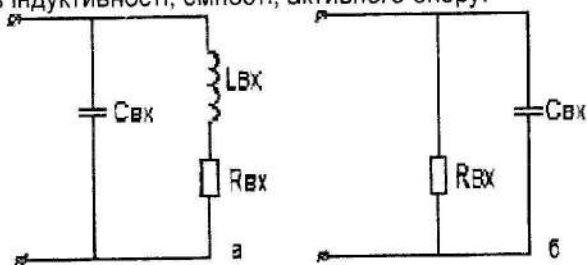


Рис. 2.3. Еквівалентні схеми вхідного кола вимірювального приладу:
 а — повна; б — для низьких частот

Вхідний опір $Z_{вх} = R_{вх} / (1 + j\omega C_{вх}R_{вх})$ залежить від частоти $f_{роб}$, на якій виконується вимірювання. Частота вимірюваної величини $f_{роб}$ повинна бути нижче власної резонансної частоти вхідного кола в 3-10 разів.

Вихідний опір характеризує реакцію вихідного сигналу на підключення до вихідних затискачів фіксованого навантаження. Вихідний опір $Z_{вих}$ часто визначається між вихідними затискачами даного приладу (наприклад генератора). В процесі вимірювання у більшості випадків вихідні затискачі джерела вимірюваного сигналу

з'єднуються з вихідними затискачами вимірювального приладу, тоді виникає необхідність узгодження вихідного і вхідного опорів (це досягається рівністю $Z_{вх} = Z_{вх}$).

Динамічні характеристики засобів вимірювань характеризують їх інерційні властивості. Динамічними характеристиками є перехідна характеристика, передавальна функція, сукупність амплітудно-частотної та фазочастотної характеристик. Якщо засіб вимірювань призначений для роботи в усталеному режимі, то за динамічну характеристику можна прийняти час установлення вихідного сигналу.

Стабільність засобу вимірювань — якісний показник, що відображає незмінність у часі його метрологічних властивостей.

Похибка вимірювального приладу Δ — різниця між показанням приладу A та істинним значенням вимірюваної величини A_x : $\Delta = A - A_x$. Практично замість істинного значення, яке невідоме, використовують значення, що відтворюється мірою, або дійсне значення, знайдене експериментально. Похибка міри — різниця між номінальним значенням міри та істинним значенням відтворюваної нею величини. Під істинним значенням розуміють розмір одиниці, відтворюваної еталоном даної величини. Похибка, яка розраховується за формулою $\Delta = A - A_x$, називається абсолютною та виражається в одиницях вимірюваної величини.

Відношення абсолютної похибки Δ до вимірюваного значення A ($\delta = \Delta/A$) називається відносною похибкою. Значення відносної похибки залежить від значення вимірюваної величини і при постійній абсолютній похибці зростає зі зменшенням A . Отже, треба вибирати прилад з такою границею вимірювання, щоб показання були в останній третій шкали. Для зручності порівняння приладів між собою користуються зведеною похибкою, %:

$$\delta_{зв} = \frac{A - A_x}{A_x} \cdot 100 = \frac{\Delta A}{A_x} \cdot 100,$$

де A_x — деяке нормоване значення (наприклад, кінцеве значення шкали, сума значень двосторонньої шкали і т. п.).

Багато які з вимірювальних приладів розрізняють за класом точності. Клас точності приладу — узагальнена характеристика його точності, але не безпосередній її показник. Клас точності приладу $\delta_{к.п}$ дорівнює найбільшій допустимій зведеній основній похибці, вираженій у відсотках, тобто $\delta_{к.п} = \delta_{зв. макс}$. Клас точності присвоюють з ряду: $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, де $n = 1; 0; -1; -2, \dots$. Значення максимальної похибки вимірювального приладу можна

обчислити за його класом точності: $\Delta A_{\text{макс}} = \delta_{\text{к. п}} A_{\text{к}}/100$.

Похибки деяких вимірювальних приладів можуть залежати від поточного значення вимірюваної величини внаслідок зміни чутливості. Тому похибки таких приладів подають не одночленним виразом

$\Delta = A - A_x$, а двочленним $\Delta = \pm(d + bA)$, в якому перший доданок d не залежить від значення вимірюваної величини, тобто є адитивною похибкою, а другий bA – залежить, тобто є мультиплікативною похибкою. Двочленний вираз відносної похибки визначається як

$\Delta = \pm \left(h + d \frac{A_{\text{к}}}{A} \right)$, де h і d – сталі числа. Похибки засобів вимірювань залежать від умов експлуатації.

Надійність — властивість виконувати свою функцію, зберігаючи установлені експлуатаційні характеристики у визначених межах протягом заданого часу в заданих умовах. Надійність характеризується середнім часом безвідмовної роботи при установленій довірчій імовірності.

Завадостійкість — властивість засобу вимірювань правильно відтворювати значення вимірюваної величини за наявності внутрішніх і зовнішніх завад.

Нормальні умови експлуатації засобів вимірювань — умови, за яких величини, що впливають, мають нормальні значення або знаходяться в межах нормальної області значень.

Величина, що впливає, — зовнішній вплив, який діє на показання приладу, але не є величиною, яку вимірює прилад (температура, вологість та тиск навколишнього середовища; частота або діапазон частот, в якому проводиться вимірювання; частота джерела живлення; механічні впливи і т. п.).

2.5. Електричний сигнал і його параметри

Основна мета вимірювань — кількісна оцінка значення фізичної величини в прийнятих для неї одиницях. Характерними особливостями електрорадіовимірників є багатовид вимірюваних величин, великі межі вимірюваних значень, широкий діапазон частот. Перед початком вимірювання необхідно класифікувати параметри або характеристики вимірюваної величини.

За характером вимірювання електричний сигнал може бути детермінованим і випадковим.

Детермінований сигнал — сигнал, заданий у вигляді деякої певної функції часу, тобто сигнал, миттєві значення якого в будь-який момент часу відомі. Цей сигнал може бути безперервним або дискретним.

Детермінований сигнал, який змінюється безперервно, може бути періодичним та неперіодичним.

Періодичний детермінований сигнал — сигнал, для якого виконується умова $f(t) = f(t+T)$, тобто миттєве значення сигналу $f(t)$ повторюється через рівні проміжки часу T .

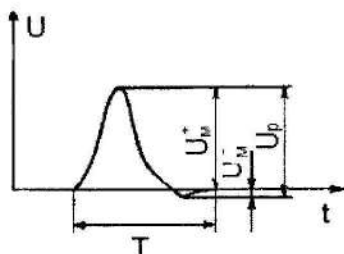


Рис. 2.4. Часова діаграма несинусоїдального сигналу

На рис. 2.4 зображена діаграма несинусоїдального різнополярного періодичного сигналу — напруги, характеристиками якої є: $u(t)$ — значення сигналу в заданий момент часу; U_M^+ та U_M^- — пікові значення сигналу (найбільші миттєві значення позитивної та негативної півхвилі сигналу, а U_M — амплітудне значення для гармонійних сигналів); U_p — сума модулів пікових значень U_M^+ і U_M^- .

Середнім значенням сигналу $U_{сер}$ за період T є його стала складова

$$U_{сер} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = U_0.$$

Змінною складовою сигналу U за період T є різниця між миттєвим значенням сигналу і його сталою складовою:

$$U_-(t) = U(t) - U_0.$$

Середньовипрямленим значенням сигналу $U_{сер.в}$ за період T є середнє значення модуля сигналу

$$U_{сер.в} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

(вводиться для сигналів, симетричних відносно осі часу).

Середньоквадратичне значення сигналу U за період T визначається за формулою

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Для синусоїдального сигналу середньоквадратичне значення називають діючим (ефективним) значенням сигналу.

Основна характеристика складного сигналу — його спектральна функція, що дає інформацію про амплітуду та фазу окремих гармонік.

Середньоквадратичне значення періодичного сигналу складної форми визначається виразом

$$U = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2},$$

де U_k — середньоквадратичне значення всіх гармонік; k — номер гармоніки.

Зв'язок між зазначеними вище значеннями сигналу установлюється через коефіцієнти амплітуди $K_a = \frac{U_M}{U}$ та форми

$$K_\phi = \frac{U}{U_{\text{ср.в}}}.$$

Для синусоїдального сигналу

$$K_a = \sqrt{2}; K_\phi = \frac{\pi}{2} \sqrt{2} = 1,11.$$

Частоти спектра електричного сигналу можна умовно класифікувати за діапазонами таким чином:

- інфранизькі (нижче 20 Гц);
- низькі (до 20 кГц — звукові, до 200 кГц — ультразвукові);
- високі (200 кГц — 30 МГц);
- ультрависокі (30 — 200 МГц);
- надвисокі (вище 300 МГц).

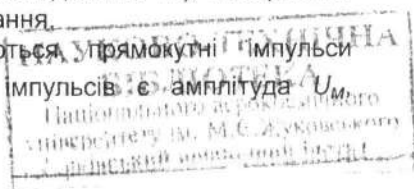
Імпульсні сигнали — детерміновані сигнали кінцевої енергії, істотно відмінні від нуля протягом обмеженого інтервалу часу. Імпульсні сигнали розділяють на відеоімпульси та радіоімпульси.

Відеоімпульси — однополярні імпульси струму або напруги, що можуть мати позитивну або негативну полярність відносно певного рівня, прийнятого за нульовий.

Радіоімпульси — серія височастотних коливань, які утворюються при впливі відеоімпульсів на коливання високої частоти.

Відеоімпульси (далі — імпульси) можуть бути різними за формою (прямокутні, трикутні, трапецеїдальні, пилоподібні та ін.), полярністю, амплітудою, тривалістю, частотою слідування.

Найчастіше в практиці зустрічаються прямокутні імпульси (рис. 2.5). Параметрами прямокутних імпульсів є амплітуда U_M



тривалість t_i , тривалості фронту t_ϕ та зрізу t_3 , викиди на вершині B_1 та зрізі B_2 , нерівномірність вершини ΔU_M .

Періодична послідовність прямокутних імпульсів з періодом повторення T характеризується шпаруватістю $Q = T/t_i$.

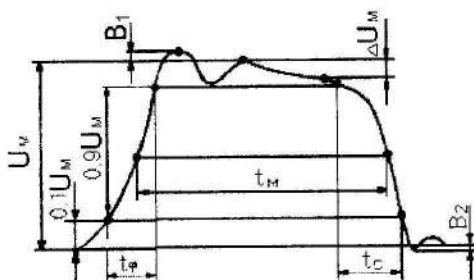


Рис. 2.5. Основні параметри прямокутного імпульсу

Випадковий сигнал — сигнал, миттєве значення якого є випадковою величиною, тобто набуває одного з безлічі можливих значень. Отже, для випадкових сигналів функцію, що їх відображає, подати неможливо. Основні характеристики випадкових сигналів: закон розподілу імовірностей (дозволяє знайти відносну тривалість перебування значення сигналу у певному інтервалі рівня, а також відношення максимального значення сигналу до середньоквадратичного та ін.); спектральний розподіл потужностей сигналу (дозволяє знайти розподіл по частотах середньої потужності сигналу). Поряд з корисними випадковими сигналами існують випадкові завади — шуми, що обмежують швидкість передачі інформації при заданому корисному сигналі.

2.6. Метрологічні характеристики засобів вимірювань

Метрологічними називаються характеристики засобів вимірювань, які впливають на результати та похибки вимірювань. Метрологічні характеристики нормуються. До нормованих метрологічних характеристик належать:

- межі вимірювань (межі шкали);
- ціна поділки рівномірної шкали аналогового приладу або багато-значної міри (при нерівномірній шкалі дається мінімальна ціна поділки);
- вихідний код, число розрядів, ціна одиниці найменшого розряду коду приладів з цифровим відліком;
- варіація показань;

- похибки приладу (систематична та випадкова складові, сумарна похибка);
- вхідний опір;
- вихідний опір;
- час установлення показань (швидкодія - для цифрових приладів);
- динамічні характеристики (для приладів, призначених до використання із навантаженням, що швидко змінюється).

3. ПОХИБКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

3.1. Загальні положення

Обов'язковими компонентами будь-якого вимірювання є: фізична величина, значення якої треба виміряти; одиниця фізичної величини; метод вимірювання; умови вимірювання; засіб вимірювання; оператор або мікропроцесор (ЕОМ); результат вимірювання.

Результат вимірювання залежить від вибраного методу, умов вимірювання, якості засобів вимірювань, кваліфікації оператора. Отже, будь-який результат вимірювання величини X містить деяку похибку Δ :

$$X = A_x + \Delta.$$

Похибка результату вимірювання $\Delta = X - A_x$ називається абсолютною похибкою і виражається в одиницях вимірюваної величини. Істинне значення вимірюваної величини A_x невідоме, тому його оцінюють дійсним значенням A . Дійсне значення – результат вимірювання, виконаного зразковим засобом вимірювання вищого розряду точності порівняно із застосуванням.

Відношення абсолютної похибки Δ до дійсного значення A або до результату вимірювання X називається відносною похибкою і виражається у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta}{X} 100\% \approx \frac{\Delta}{A} 100\%.$$

Похибка вимірювання δ є випадковою величиною, тобто з'являється у непередбачених випадкових змінах результатів вимірювання однієї й тієї ж величини в незмінних умовах одним і тим же засобом вимірювання, одним і тим же оператором. Результат вимірювання X є також випадковою величиною і характеризується математичним очікуванням $M[X]$ та дисперсією $D[X]$ або середньоквадратичним відхиленням $\sigma = \pm \sqrt{D[X]}$. Ці параметри знаходяться шляхом багатократних вимірювань (спостережень) протягом інтервалу часу T .

Обробка результатів вимірювань повинна вестися статистичними методами.

Більшість вимірювань виконується шляхом однократного вимірювання (спостереження). Показання вимірювального засобу приймають за результат з максимальною абсолютною похибкою Δ_{\max} , яка визначається за класом точності $\delta_{к.п}$ засобу вимірювання:
$$\Delta_{\max} = \pm \delta_{к.п} A_k / 100\%$$

Похибка вимірювання Δ є сумою систематичної Δ_c та випадкової $\Delta_{\dot{}}$ складових похибки: $\Delta = \Delta_c + \Delta_{\dot{}}$. Систематична похибка Δ_c залишається сталою або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях. Випадкова похибка $\Delta_{\dot{}}$ змінюється випадково при повторних вимірюваннях. Систематична складова похибки є математичним очікуванням похибки вимірювання Δ : $\Delta_c = M[\Delta]$, випадкова складова похибки є випадковою величиною з математичним очікуванням $M[\Delta_{\dot{}}]$, що дорівнює нулю.

3.2. Систематичні похибки

Систематичні похибки за причиною виникнення поділяються на методичні, апаратурні та суб'єктивні.

Методичні похибки виникають внаслідок недосконалості розробленого методу вимірювання, неточності аналітичних виразів, дії засобу вимірювань на об'єкт вимірювання, явища резонансу.

Апаратурні похибки зумовлені недосконалістю засобів вимірювань (зміна показань при зміні напруги живлення або температури навколишнього середовища), неточністю градування, неправильним розташуванням приладу (вертикальне замість горизонтального), дією одного приладу на другий (працюючого генератора на чутливий вольтметр), наявністю зовнішнього електромагнітного поля.

Суб'єктивні (особисті) похибки виникають внаслідок недосконалості органів людини і пов'язані з індивідуальними особливостями та кваліфікацією оператора. Цю похибку можна вилучити застосуванням засобів вимірювань з цифровим відліком. До суб'єктивних похибок відносять промахи, що з'являються внаслідок неправильних дій оператора: зі шкали записане показання, яке не стосується даного вимірювання; не урахована кома у відліку та ін.

Систематична похибка може бути сталою і змінною. Стала систематична похибка залишається незмінною в процесі вимірювань, її можна виявити та вилучити. Для зручності запису результату вимірювань впроваджується поправка C , яка дорівнює абсолютній

похибці приладу зі зворотним знаком: $C = -\Delta_C$. Результатом вимірювань вважається сума показання робочого приладу $A_{раб}$ та поправки: $A_{раб} = A_{раб} + C$. Для зменшення систематичної похибки в засобах вимірювань передбачено його калібрування за допомогою зовнішнього або внутрішнього джерела калібрувального сигналу з відомими параметрами. Зменшення систематичної похибки можливе методом заміщення та компенсації за знаком. Метод заміщення полягає в заміні вимірюваної величини A_X відомою величиною A_Y таким чином, щоб стан вимірювального приладу залишився незмінним; тоді $A_X = A_Y$. Наприклад, стрілковим омметром вимірюють опір резистора R_X та одержують показання $\alpha = R_X + \Delta_C$. Після цього замість вимірюваного резистора включають магазин опорів і шляхом його регулювання добиваються колишнього показання стрілкового омметра α ; установленне значення опору магазину буде значенням вимірюваного опору R_X .

Метод компенсації за знаком застосовується при направленій дії причини, яка викликає систематичну похибку (наприклад, при напруженості магнітного поля). Виконують два вимірювання (спостереження) так, щоб у їхні результати похибка входила з різними знаками: $\alpha_1 = A_X + \Delta_C$, $\alpha_2 = A_X - \Delta_C$. Звідси

$$A_X = (\alpha_1 + \alpha_2)/2.$$

Змінні систематичні похибки поділяються на прогресуючі та періодичні. Прогресуючі систематичні похибки зростають або знижуються в функції деякої величини, яка впливає. Періодичні похибки змінюються в інтервалі часу вимірювання (спостереження) з певним періодом. Для зменшення змінних систематичних похибок необхідно виявити закон їхньої зміни та визначити поправки. Це інколи вдається зробити шляхом перевірки, і тоді поправки складаються у вигляді графіків або таблиць, але частіше поправки знаходять аналітично, і тоді вони виражаються математичними рівняннями. Однак повне вилучення систематичної похибки не вдається. Завжди залишається частина невилученої похибки, яка є систематичною складовою Δ_C похибки вимірювання Δ .

3.3. Випадкові похибки

Випадкові похибки вимірювань виникають внаслідок одночасного впливу на об'єкт вимірювання декількох незалежних величин, зміни

яких носять флуктуаційний характер. Певний вклад у випадкову похибку вимірювання вносить випадкова похибка засобу вимірювань.

Припустимо, що систематична складова похибки вимірювання вилучена, тобто похибка вимірювання визначається тільки її випадковою складовою.

Випадкова похибка як величина характеризується густиною розподілу імовірностей (густиною імовірності) $f(\Delta) = dF(\Delta) / d\Delta$, де $F(\Delta)$ — функція розподілу. Отже, визначається не числове значення випадкової похибки, а тільки імовірність того, що вона перебуває у деякому інтервалі або не перевищує деякого значення. Якщо відомий закон розподілу, то відомі $F(\Delta)$ та $f(\Delta)$. Імовірність P перебування випадкової похибки в заданому інтервалі від Δ_1 до Δ_2 визначається за формулою

$$P[\Delta_1 < \Delta < \Delta_2] = \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f(\Delta) d\Delta.$$

Закономірність зміни випадкової похибки можна установити шляхом багатократних вимірювань (спостережень) її значень та статистичної обробки результатів вимірювань (спостережень).

Флуктуації величин, які впливають, є також випадковими та характеризуються своїми законами розподілу (рівномірний, трикутний, нормальний і т.п.). Однак внаслідок сумірності їх дисперсій вже при чотирьох-п'ятих величинах, що впливають, результируючий закон розподілу випадкової похибки вимірювання задовільно узгоджується з нормальним (рис. 3.1).

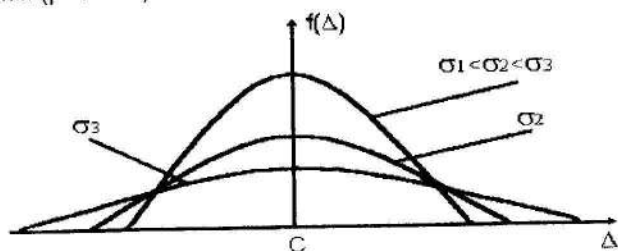


Рис. 3.1. Густина імовірності випадкових похибок при нормальному законі розподілу

Функція розподілу за нормальним законом визначається за формулою

$$F(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\Delta} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta,$$

а густина імовірності –

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}},$$

де $\sigma^2 = D = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 f(\Delta) d\Delta$ — дисперсія, яка характеризує розсіювання випадкової похибки відносно центра розподілу; $\sigma = \pm\sqrt{D} = \pm\sqrt{\sigma^2}$ — її середньоквадратичне відхилення.

Дисперсія та середньоквадратичне відхилення характеризують точність вимірювання: чим більші D та σ , тим менша точність. У практиці вимірювань здебільшого використовується середньоквадратичне відхилення σ , бо воно виражається в тих же одиницях, що й вимірювана величина.

Імовірність появи випадкової похибки в межах від $-\Delta$ до Δ визначається за формулою

$$P[-\Delta_1 < \Delta < \Delta_1] = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\Delta_1} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta.$$

Якщо ввести нормовану випадкову величину $z = \Delta/\sigma$, права частина рівності перетвориться в функцію Лапласа (інтеграл імовірностей), розподіл якої показаний на рис. 3.2. Аналітичний вираз функції Лапласа

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

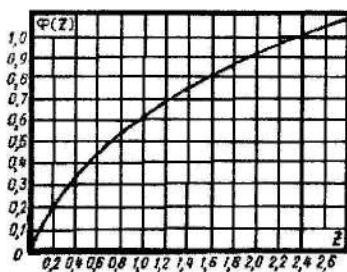


Рис. 3.2. Інтеграл імовірності

Цю функцію можна подати у вигляді табл. 3.1.

Деякі значення інтеграла імовіроностей $\Phi(z)$

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0,00	0,000	0,70	0,516	1,40	0,839	2,25	0,976
0,10	0,080	0,80	0,576	1,50	0,866	2,50	0,988
0,20	0,159	0,90	0,632	1,60	0,890	2,75	0,9940
0,30	0,236	1,00	0,683	1,70	0,911	3,00	0,99730
0,40	0,311	1,10	0,729	1,80	0,928	3,30	0,93903
0,50	0,383	1,20	0,770	1,90	0,943	3,50	0,99953
0,60	0,452	1,30	0,805	2,03	0,955	4,00	0,99994

Якщо задана імовірність $P = \Phi(z)$, то, визначивши $z = \Delta/\sigma$, знаходять $\Delta = z\sigma$. При нормальному законі розподілу максимальну похибку Δ_{\max} приймають рівною 3σ , що відповідає імовірності появи похибки, яка перевищує Δ_{\max} . Наприклад: $1 - P = 1 - 0,9973 = 0,0027 = 1/370$. Це означає, що в 369 із 370 вимірювань (спостережень) з імовірністю 0,9973 похибка належить інтервалу від -3σ до $+3\sigma$ і лише в одному вимірюванні (спостереженні) може вийти за його межі.

Рівномірний закон розподілу також застосовується при вимірюваннях. Наприклад, він характерний для вимірювання безперервних величин методом дискретного рахування. Густина імовірності появи похибки в інтервалі від $-\Delta_1/2$ до $\Delta_1/2$ можна подати в такому вигляді:

$$f(\Delta) = 1/\Delta_1 \text{ при } -\Delta_1/2 \leq \Delta \leq \Delta_1/2;$$

$$f(\Delta) = 0 \text{ при } -\Delta_1/2 > \Delta > \Delta_1/2.$$

Графічне зображення густини імовірностей випадкових похибок при рівномірному законі розподілу наведено на рис. 3.3.

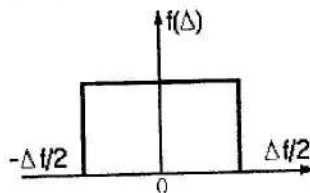


Рис. 3.3. Густина імовірностей випадкових похибок при рівномірному законі розподілу

Закон нормального розподілу характеризується математичним очікуванням та дисперсією. Визначити точно ці параметри практично

неможливо, бо для цього треба мати нескінченно велике число значень випадкової величини, тобто виконати n вимірювань при $n \rightarrow \infty$. У практиці вимірювань n завжди скінченне, тому обчислені в результаті експерименту значення називають оцінками математичного очікування та середньоквадратичного відхилення.

Розглянемо послідовність статистичного вимірювання деякої величини, істинне значення якої A_X . Виконують n вимірів, в результаті яких одержують ряд випадкових значень вимірюваної величини $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$. Для кожного X_i абсолютна похибка i -го вимірювання $\Delta_i = X_i - A_X$. Визначити значення цієї похибки неможливо, бо A_X невідоме.

За оцінку математичного очікування A_X приймають середнє арифметичне значення $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, яке називають дійсним значенням

A вимірюваної величини A_X . Дійсне значення вимірюваної величини визначається за формулою $A = \bar{X} - A_X$ при $n \rightarrow \infty$.

Абсолютне відхилення кожного результату вимірювання відносно середнього значення визначається як $v = X_1 - \bar{X}, \dots, v_j = X_j - \bar{X}, \dots, v_n = X_n - \bar{X}$. Очевидно, що $\Delta_j \neq v_j, v_j \rightarrow \Delta_j$ при $n \rightarrow \infty$. Оцінка $\tilde{\sigma}$ середньоквадратичного відхилення абсолютних похибок v кожного із n вимірів визначається за формулою

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}.$$

З цього виразу видно, що при багаторазових вимірюваннях точність результату підвищується. Точність результату вимірювань $\tilde{\sigma}_{\bar{X}}$ характеризується оцінкою середньоквадратичного відхилення середнього арифметичного (дійсного) значення:

$$\tilde{\sigma}_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n v_i^2}, \text{ тобто } \tilde{\sigma}_{\bar{X}} = \tilde{\sigma} / \sqrt{n}.$$

Зі збільшенням числа вимірювань n (при незалежних результатах) точність збільшується пропорційно. Однак практика показала, що збільшення числа вимірювань $n > 10$ приносить мало користі, бо сама вимірювана величина також може змінюватися за час вимірювання.

3.4. Довірчий інтервал та довірча імовірність

У результаті n вимірювань (спостережень) величини A_x одержують оцінку її дійсного значення A , що дорівнює середньому арифметичному $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$. Оцінка ця є випадковою величиною.

Необхідно визначити, в яких межах може змінюватися дійсне значення A при статистичних вимірюваннях величини A_x в одних і тих же умовах, тобто треба знайти інтервал значень, який з заданою імовірністю "накриває" істинне значення вимірюваної величини. Такий інтервал називають довірчим, а задану імовірність – довірчою. Довірчий інтервал та довірча імовірність характеризують невизначеність результату вимірювання. Аналітично це можна записати таким чином:

$$P[\bar{X} - \Delta < A_x < \bar{X} + \Delta] = \alpha,$$

тобто істинне значення вимірюваної величини лежить у межах довірчого інтервалу від $\bar{X} - \Delta$ до $\bar{X} + \Delta$ з довірчою імовірністю α .

Аналогічно для випадкової похибки Δ

$$P[\Delta_1 < \Delta < \Delta_2] = \alpha.$$

Випадкова похибка вимірювання лежить у межах довірчого інтервалу від Δ_1 до Δ_2 з довірчою імовірністю α . Залежно від мети вимірювання довірчу імовірність установлюють рівною 0,9...0,99; довірчі інтервали у виразах симетричні. Половину довірчого інтервалу називають граничною (максимальною, допустимою) похибкою при довірчій імовірності. Інколи довірчий інтервал несиметричний і має вигляд $[\bar{X} - \Delta_1, \bar{X} + \Delta_2]$.

Граничну похибку та довірчий інтервал виражають через середньоквадратичне відхилення. Для нормального закону розподілу довірчий інтервал за заданою довірчою імовірністю визначають за допомогою інтеграла імовірності.

Задаються довірчою імовірністю $P\{|\bar{X} - A_x| \leq z \sigma_{\bar{X}}\} = \alpha$, наприклад 0,95. Із табл. 3.1 знаходять $\Phi(z) = 0,95$ та значення $z = 2$. Оскільки $z = \Delta / \tilde{\sigma}_{\bar{X}}$, то $\Delta = 2 \tilde{\sigma}_{\bar{X}}$ та довірчий інтервал $\pm \Delta = \pm 2 \tilde{\sigma}_{\bar{X}}$.

Довірчий інтервал та довірча імовірність зв'язані з числом вимірювань (спостережень) n , бо $\tilde{\sigma}_{\bar{X}} = \tilde{\sigma} \sqrt{n}$. Чим більше n , тим вузьчий довірчий інтервал. Для числа вимірювань $2 < n < 20$ довірчий інтервал визначають не через z , а через коефіцієнт $t_{n\alpha}$, який залежить від числа

вимірювань n та довірчої імовірності α . Закон зміни $t_{n\alpha}$ визначається розподілом Стюдента нормованої випадкової величини $t = \bar{X} - A_X / \bar{\sigma}_X$, обчисленого для X_i з нормальним розподілом. Коефіцієнт визначають за допомогою формули

$$P[-t_{n\alpha} < t < t_{n\alpha}] = 2 \int_0^{t_{n\alpha}} S(t, n) dt = \alpha,$$

де α — довірна імовірність; $S(t, n)$ — густина імовірності розподілу Стюдента при $n = 2$.

Інтеграл $2 \int_0^{t_{n\alpha}} S(t, n) dt$ розраховують за допомогою табл. 3.2. При $n \rightarrow \infty$ розподіл Стюдента прямує до нормального. Довірчий інтервал знаходять за заданою імовірністю та числом вимірювань (спостережень). Наприклад: $\alpha = 0,95$; $n = 6$. В табл. 3.2 вибирають значення $t_{n\alpha} = 2,6$, отже, $\Delta = \pm 2,6 \bar{\sigma}_X$.

Таблиця 3.2

Коефіцієнт Стюдента $t_{n\alpha}$

+n	$t_{n\alpha}$								
	α								
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	
2	1,00	1,38	2,9	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	
17	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	
20	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,85	
26	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	

Грубі похибки. При статистичних вимірюваннях результати кожного вимірювання відрізняються один від одного. Трапляється, що одне або два значення відрізняються більше, ніж інші. Необхідно визначити, чи не є вони грубими похибками, які слід вилучити з обробки результатів вимірювань.

Простим способом виявлення грубої похибки при нормальному законі розподілу є порівняння абсолютної похибки "підозрілого" спостереження $v_j = X_j - \bar{X}$ з максимальною похибкою $\Delta_{\text{макс}} = 3\tilde{\sigma}$.

Якщо $v_j > 3\tilde{\sigma}$, цей результат слід відкинути і знов обчислити значення \bar{X} та $\tilde{\sigma}$. Цей спосіб оснований на тому, що імовірність появи значення, яке відхиляється від середнього арифметичного більш ніж на $3\tilde{\sigma}$, дорівнює 0,003. Однак при числі вимірювань $n < 10$ можливо, що виключений результат вимірювань – не груба похибка, а статистичне відхилення даної величини. Тому у відповідальних випадках визначення грубої похибки проводять на основі теорії імовірності. Визначають, при якому числі вимірів n з заданою імовірністю α можна вилучити результат вимірювання, який перевищує задане число або задані межі.

3.5. Підсумовування похибок

Випадкова похибка $\overset{\circ}{\Delta}_{\Sigma}$ вимірювального пристрою, що складається з n блоків з незалежними випадковими похибками $\overset{\circ}{\Delta}_i$ кожного блока, знаходиться шляхом геометричного підсумовування:

$$\overset{\circ}{\Delta}_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \overset{\circ}{\Delta}_i^2}.$$

Аналогічно визначаються відносна та гранична похибки, середньоквадратичне відхилення.

Якщо на кінцевий результат вимірювання похибки окремих блоків впливають по-різному, то вагові коефіцієнти k_j та відносна похибка визначаються за формулою

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^m (k_i \delta_i)^2}.$$

Систематичні похибки підсумовуються алгебрично з урахуванням знаків; сумарна похибка є модулем одержаного результату:

$$\Delta_{c\Sigma} = \left| \sum_{i=1}^m \Delta_{ci} \right|.$$

За наявності випадкових та систематичних похибок загальна похибка вимірювання $\Delta_{\text{заг}}$ приймається рівною їх геометричній сумі:

$$\Delta_{\text{заг}} = \sqrt{\Delta_C^2 + \Delta^2}.$$

За наявності кореляційного зв'язку між випадковими похибками сумарна похибка знаходиться на основі положення про те, що дисперсія суми двох корельованих випадкових величин σ_Σ^2 , які характеризуються дисперсіями σ_1^2 і σ_2^2 та коефіцієнтом кореляції $r_{1,2}$, визначається виразом $\sigma_\Sigma^2 = \sigma_1^2 + 2r_{1,2}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2$. Середньоквадратичне відхилення суми двох випадкових величин знаходиться за формулою

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + 2r_{1,2}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}.$$

3.6. Похибки побічних вимірювань

При побічних вимірюваннях вимірювана величина A функціонально зв'язана з іншими величинами x, y, \dots, t , які піддаються прямим вимірюванням $A = (x, y, \dots, t)$. Абсолютна похибка вимірюваної величини Δ_A є функцією похибок прямих вимірювань: $A = (x, y, \dots, t)$. Абсолютна похибка вимірюваної величини Δ_A є функцією похибок прямих вимірювань: $\Delta_A = (\Delta_x, \Delta_y, \dots, \Delta_t)$.

Абсолютна та відносна похибки побічних вимірювань визначаються за формулами

$$\Delta_A = \pm \frac{df(x)}{dx} \Delta_x, \quad \delta_A = \frac{\Delta_A}{A} = \pm \frac{df(x)}{dx} \frac{\Delta_x}{A}.$$

Якщо $A = (x, y, \dots, t)$, то абсолютна похибка результату побічних вимірювань знаходиться так само, як і сума випадкових похибок:

$$\Delta_A = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2 \Delta_y^2 + \dots + \left(\frac{df}{dt}\right)^2 \Delta_t^2},$$

де доданки є квадратами окремих похибок прямих вимірювань. Аналогічно розраховується відносна похибка:

$$\delta_A = \frac{\Delta_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 \left(\frac{\Delta_x}{A}\right)^2 + \dots + \left(\frac{df}{dt}\right)^2 \left(\frac{\Delta_t}{A}\right)^2}.$$

Прямі вимірювання величин x, y, \dots, t можуть виконуватися статистичним методом — шляхом багаторазових вимірювань і

визначення їхніх дійсних значень $\bar{x}, \bar{y}, \dots, \bar{z}$ та середньоквадратичних відхилень $\tilde{\sigma}_{\bar{x}}, \tilde{\sigma}_{\bar{y}}, \dots, \tilde{\sigma}_{\bar{t}}$. Тоді оцінка середньоквадратичного відхилення результату побічних вимірювань визначиться як

$$\tilde{\sigma}_A = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)_{x=\bar{x}}^2 \tilde{\sigma}_{\bar{x}}^2 + \dots + \left(\frac{df}{dt}\right)_{t=\bar{t}}^2 \tilde{\sigma}_{\bar{t}}^2}.$$

Наведені формули стосуються випадкових похибок. У практиці вимірювань зустрічаються окремі похибки прямих вимірювань, які містять випадкові та систематичні складові:

$$\Delta_x = \Delta_{cx} + \overset{\circ}{\Delta}_x + \dots + \Delta_{ct} + \overset{\circ}{\Delta}_t.$$

Похибку побічного вимірювання в цьому випадку точно обчислити неможливо. Тому застосовують метод, оснований на поданні систематичної похибки, еквівалентної випадковій величині, яка імовірно знаходиться в даному інтервалі $\pm \Delta_c$, тобто є розподіленою за рівномірним законом.

Середньоквадратичне відхилення загальної похибки побічного вимірювання величини A можна подати у вигляді формули

$$\tilde{\sigma}_A = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 \left(\tilde{\sigma}_{\bar{x}}^2 + \frac{\Delta_x^2}{3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{df}{dt}\right)^2 \left(\tilde{\sigma}_{\bar{t}}^2 + \frac{\Delta_t^2}{3}\right)^2}.$$

Формули для обчислення абсолютних та відносних похибок побічних вимірювань функцій, які зустрічаються найчастіше, наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Визначення абсолютних та відносних похибок при побічних вимірюваннях для різних функціональних залежностей вимірюваних величин

Функція	Похибка	
	абсолютна	відносна
$x+y+z$	$\pm(\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2)^{1/2}$	$\pm \frac{(\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2)^{1/2}}{x+y+z}$

Функція	Похибка	
	абсолютна	відносна
$x-y$	$\pm(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)^{1/2}$	$\pm \frac{(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)^{1/2}}{x-y}$
xy	$\pm(x^2 \Delta_y^2 + y^2 \Delta_x^2)^{1/2}$	$\pm \left[\left(\frac{\Delta_x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y} \right)^2 \right]^{1/2}$
x^n	$\pm nx^{n-1} \Delta_x$	$\pm n \frac{\Delta_x}{x}$
$\sqrt[n]{x}$	$\pm \frac{1}{n} x^{n-1} \Delta_x$	$\pm \frac{1}{n} \frac{\Delta_x}{x}$
x/y	$\pm \left[\frac{x^2 \Delta_y^2 + y^2 \Delta_x^2}{y^4} \right]^{1/2}$	$\pm \left[\left(\frac{\Delta_x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y} \right)^2 \right]^{1/2}$
$\ln x/y$	$\pm \left[\left(\frac{\Delta_x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y} \right)^2 \right]^{1/2}$	$\pm \frac{1}{\ln x} \left[\left(\frac{\Delta_x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y} \right)^2 \right]^{1/2}$
$\sin x$	$\pm \cos x \Delta_x$	$\pm \operatorname{ctg} x \Delta_x$
$\cos x$	$\pm \sin x \Delta_x$	$\pm \operatorname{tg} x \Delta_x$
$\operatorname{tg} x$	$\pm \frac{\Delta_x}{\cos^2 x}$	$\pm \frac{2\Delta_x}{\sin 2x}$
$\operatorname{arctg} x$	$\pm \frac{\Delta_x}{1+x^2}$	$\pm \frac{\Delta_x}{(1+x^2) \operatorname{arctg} x}$

3.7. Обробка результатів вимірювань

Контроль технічного стану об'єктів та комплексів озброєння і військової техніки (ОВТ) в процесі експлуатації пов'язаний з вимірюванням великої кількості параметрів. Проведення профілактичних робіт на об'єктах та комплексах ОВТ регламентується нормативно-технічною документацією, яка визначає методи і порядок проведення вимірювань. Як правило, ці вимірювання є прямими та

однократними, а їх похибки визначаються в основному точнісними характеристиками застосовуваних засобів вимірювань.

Для підвищення точності вимірювань інколи виникає необхідність проведення ряду спостережень одного і того ж параметра, який контролюється. У цьому випадку знаходження значення вимірюваної величини та її похибки потребує спеціальної обробки одержаних результатів спостережень.

Під спостереженням розуміють експериментальну операцію, що виконується в процесі вимірювань, в результаті якої одержують одне значення з групи значень величини, що підлягають спільній обробці для одержання результату вимірювання.

При обробці ряду результатів спостережень для визначення шуканого значення величини необхідно:

- обчислити результат вимірювання;
- визначити випадкову складову похибки результату вимірювання;
- знайти оцінку невилученої остачі систематичної похибки;
- обчислити загальну похибку результату вимірювання.

Порядок обробки результатів прямих вимірювань розглянемо на такому прикладі.

Приклад. При 20 вимірюваннях опору котушки (магазину опорів) одержано результати спостережень r_i в омах, які наведено в табл. 3.4. Вимірювання проводилися в нормальних умовах на мості постійного струму класу точності 0,05. Треба визначити значення опору котушки та похибку вимірювання з довірчою імовірністю $\alpha = 0,99$.

Таблиця 3.4

Результати обчислення відхилення

r_i^*	v_i^{**}	v_i^2	r_i^*	v_i^{**}	v_i^2
1001,39	+ 0,83	0,6889	1000,51	- 0,05	0,0025
1001,12	+ 0,56	0,3136	1000,16	- 0,40	0,16
1000,92	+ 0,36	0,1296	1000,58	+ 0,02	0,0004
1000,56	0	0	1000,39	- 0,17	0,0289
1000,80	+ 0,24	0,0576	1000,59	+ 0,03	0,0009
1000,55	- 0,01	0,0001	1000,61	+ 0,05	0,0025
1000,54	- 0,02	0,0004	999,75	- 0,81	0,6561
1000,04	- 0,52	0,2704	1000,48	- 0,08	0,0064
1000,65	+ 0,09	0,0081	1000,71	+ 0,15	0,0225
1000,57	+ 0,01	0,0001	1000,28	- 0,28	0,0784
			$\sum_{i=1}^n r_i/n = 1000,56$	$\sum_{i=1}^n v_i = +2,34 - 2,34 = 0$	$\sum_{i=1}^n v_i^2 = 2,43$

Розв'язання. 1. Визначимо значення опору котушки:

$$r = \bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} = \frac{1001,39 + 1001,12 + 1001,92 + \dots + 1000,28}{20} = 1000,56 \text{ Ом.}$$

2. Визначимо випадкову складову похибки результату вимірювань. У загальному випадку для цього необхідно знати закон її розподілу, який може бути знайдений шляхом побудови гістограм. Принцип побудови таких гістограм широко відомий в теорії вимірювань. У більшості випадків, як показує практика, випадкова складова похибки результату вимірювань має нормальний закон розподілу.

Для визначення середньоквадратичного значення випадкових похибок σ спочатку розрахуємо випадкові відхилення результатів спостережень $v_i = r - r_i$, їхні квадрати v_i^2 та суму квадратів $\sum_{i=1}^n v_i^2$ (результати обчислень занесемо в табл. 3.4).

Визначимо середньоквадратичне значення випадкової похибки спостережень за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{(n-1)}} = \sqrt{2,43/(20-1)} = 0,36 \text{ Ом.}$$

Випадкову складову похибки результату вимірювання знаходимо за формулою

$$\overset{\circ}{\Delta} = \pm t_{n\alpha} S.$$

Тут середньоквадратичне відхилення випадкової складової похибки результату вимірювання $S = \sigma/\sqrt{20} = 0,36/\sqrt{20} = 0,08 \text{ Ом}$, а значення $t_{n\alpha}$ для довірчої імовірності $\alpha = 0,99$ знаходимо з табл. 3.2: при $n = 20$ $t_{n\alpha} = 2,86$.

Таким чином, випадкова складову похибки результату вимірювань

$$\overset{\circ}{\Delta}_c = \pm 2,86 \cdot 0,08 = \pm 0,23 \text{ Ом.}$$

3. Визначимо невилучену остачу систематичної складової похибки результату вимірювання опору r .

Клас точності мостів постійного струму характеризує межу допустимої систематичної похибки, вираженої у відсотках від значення вимірюваної величини. Таким чином, вимірювання опору $r = 1000,56 \text{ Ом}$ на мості постійного струму класу 0,05 супроводжується невилученою остачею систематичної похибки:

$$\Delta_c = \frac{100,56 \cdot 0,05}{100} = \pm 0,5 \text{ Ом.}$$

Вважаючи, що остачі систематичних похибок у цих межах розподілені рівномірно, їх середньоквадратичне значення знайдемо за формулою

$$S_{\Delta c} = \frac{\Delta_c}{\sqrt{3}} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,3 \text{ Ом.}$$

4. Визначимо загальну похибку результату вимірювання. У деяких випадках складові загальної похибки можуть відрізнитися одна від одної настільки, що однією з них можна знехтувати: якщо $S_{\Delta c}/S \leq 0,8$, нехтують систематичною складовою похибки, а якщо $S_{\Delta c}/S \geq 8$, - нехтують випадковою.

У даному прикладі відношення $S_{\Delta c}/S = 0,3/0,08 = 3,7$ лежить у межах від 0,8 до 8, отже, знехтувати жодною складовою загальної похибки вимірювання не можна. Тому загальну похибку вимірювання будемо визначати за формулою

$$\Delta_{\Sigma} = \pm t'_p S_{\Delta}.$$

Для цього розрахуємо середньоквадратичне значення загальної похибки

$$S_{\Delta} = \sqrt{0,08^2 + 0,3^2} = 0,31 \text{ Ом}$$

та значення t'_p :

$$t'_p = \frac{\Delta_c + \Delta_r}{S_{\Delta c} + S} = \frac{0,5 + 0,23}{0,3 + 0,08} = 2.$$

Тоді загальна похибка вимірювання

$$\Delta_{\Sigma} = \pm t'_p S_{\Delta} = \pm 2 \cdot 0,31 = \pm 0,62 \text{ Ом.}$$

Отже, результат вимірювання опору на мості постійного струму класу 0,05 можна подати виразом

$$r = [1000,5 \pm 0,6(0,99)] \text{ Ом.}$$

У дужках вказують довірчу імовірність, з якою визначався опір катушки.

Знання метрологічних характеристик засобів вимірювань, вміння правильно оцінити похибку вимірювання дозволяють технічному персоналу якісно виконувати аналіз та вибір засобів вимірювань, необхідних для контролю параметрів об'єктів та комплексів озброєння і військової техніки.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии: Учеб. пособие. – М., 1972.

Вайсбанд М.Д., Проненко В.И. Техника выполнения метрологических работ. – К., 1986.

Винник В.И., Артемьев Б.Г. Метрологический надзор. – М., 1980.

Гельман М.М. Аналого-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем. – М., 1989.

Метрологическое обеспечение производства / О.Г. Глушкова, Н.Я. Медовикова, Н.Н. Рейх и др.: Консп. лекций. – М., 1982.

Наказ міністра оборони України № 265 “Про затвердження нормативних документів з метрології та метрологічної діяльності у Збройних силах України”. – К., 1999.

Наставлення з технічного забезпечення авіації Збройних сил України: В 4 кн. – К., 1999. Кн. 1. Метрологічне забезпечення.

Тюрин Н.И. Введение в метрологию. – М., 1976.

Яношин Л. Теория и практика обработки результатов измерений / Пер. с англ. Н.П. Клепикова. – М., 1968.

Зміст

ВСТУП.....	3
1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ТА ВИМОГИ ДО НИХ.....	3
1.1. Основні визначення метрології	3
1.2. Класифікація засобів вимірювань	4
1.3. Міри та еталони електричних величин	5
2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ.....	8
2.1. Вимірювальні перетворювачі	8
2.2. Вимірювальні прилади	10
2.3. Вимірювальні установки та системи	11
2.4. Основні властивості засобів вимірювань	12
2.5. Електричний сигнал і його параметри	15
2.6. Метрологічні характеристики засобів вимірювань	18
3. ПОХИБКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ.....	19
3.1. Загальні положення.....	19
3.2. Систематичні похибки	20
3.3. Випадкові похибки	21
3.4. Довірчий інтервал та довірна імовірність	26
3.5. Підсумовування похибок	28
3.6. Похибки побічних вимірювань	29
3.7. Обробка результатів вимірювань	31
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	35

Козирев Юрій Сергійович
Скульський Костянтин Володимирович
Лазненко Віктор Іванович
Гошкін Євген Володимирович

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

Редактор Т.О. Іващенко

Зв. план, 2002

Підписано до друку 26.03.2002

Формат 60x84 1/16. Папір офс. №2. Офс. друк.

Умовн. друк. арк. 2,1. Облік.-вид. арк. 2,31. Т. 50 прим.

Замовлення 155. Ціна вільна

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр "ХАІ"

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu