

## СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ВІДПОВІДНО ДО МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА ПРИНЦИПІВ ЇХ ВИКОНАННЯ

Дуднік А.С.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичне явище або ефект, покладене в основу вимірювань називається принципом вимірювань. Наприклад, застосування ефекту Джозефсона для вимірювання електричної напруги або ефекту Доплера для вимірювання швидкості. Для проведення вимірювань вибирають певний метод вимірювань – прийом або сукупність прийомів порівняння вимірюваної фізичної величини з її одиницею відповідно до реалізованого принципу вимірювань. В даній статті досліджено прилади та методи вимірювання механічних величин у безпроводних сенсорних мережах та цифрових вимірювальних приладах, що під'єднані до вузлів сенсорних мереж і разом являють собою інформаційну вимірювальну систему. Досліджується задача вимірювання відстані та часу проходження сигналу між прийомопередавачами. Розрахунок відстані здійснюється за допомогою часу поширення сигналу.

**Ключові слова:** прийомопередавач, сенсор, радіоімпульс, час, відстань, похибка вимірювання, перешкоди, частотомір, квантування.

**Постановка проблеми.** Зараз існують різні технологічні рішення для визначення положення об'єктів в просторі або на поверхні землі. Це пов'язано з тим, що неможливо реалізувати один універсальний спосіб, що підходить для всіх можливих випадків. Точніше кажучи, неможливо зробити пристрій, технічні характеристики якого відповідали б вимогам всіх поставлених задач. Тому, в даних умовах, задача вибору методів та приладів вимірювання механічних величин, зокрема відстані і часу надходження сигналу, носить актуальний характер.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існують технології позиціонування, такі як GPS, про які йдеться у роботі Sichertiu M. [1], Galileo, якому присвячена робота Федерації американських науковців [2; 3], Глонасс, про яку йдеться у спільній роботі іспанських вчених про моніторинг навколишнього середовища [4], застосовують Wi-Fi [5–8] або ультракороткі імпульси, про що йдеться у відповідному стандарті Інститут інженерів електротехніки та електроніки, або технології позиціонування стільникових телефонів GSM, якому присвячена робота He T. [9–11] і т.д. У всіх цих технологій існують свої плюси і мінуси. Galileo, ГЛОНАСС, GPS наприклад, до-

зволяють орієнтуватися на поверхні землі, маючи при собі компактний пристрій з набором карт місцевості. Це дуже корисні технології для переміщення на відкритій місцевості. Точність положення таких пристроїв зараз досягає одиниць метрів. Однак вона може погіршитися в великих містах, в умовах складного рельєфу місцевості, або просто в закритому приміщенні. В останньому випадку застосування супутникового позиціонування неприйнятно. Єдиним виходом з цієї ситуації є розробка більш точних методів аналізу похибки вимірювань, з метою врахування її при розрахунках показників.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Під час усієї історії розвитку засобів вимірювальної техніки, прилади та методи вимірювання механічних величин з однієї сторони, а також безпроводні сенсорні мережі з іншої сторони, розглядалися, як 2 окремі системи, що відносились до різних галузей технічних наук, але в той же час вони досить часто вирішували однакові задачі. Тому, застосування різноманітних методів їх поєднання, у складі комп'ютеризованих засобів вимірювання механічних величин, мало б значно ефективніший характер як в практичній так і науковій сфері.

**Мета та задачі дослідження.** Мета дослідження – систематизація приладів та методів вимірювання механічних величин для побудови математичної моделі визначення часу прийняття сигналу, з метою визначення відстані між сенсорними прийомопередавачами.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Провести аналіз методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання;
2. Описати прилади вимірювання механічних величин відносно того чи іншого методу вимірювання та побудувати математичну модель вимірювання відстані для кожного з приладів.

**Виклад основного матеріалу.** Метод вимірювань, звичайно, обумовлений будовою ЗВТ (засобу вимірювальної техніки) [12].

Якщо значення величини визначають безпосередньо за показуючим засобом вимірювань, то такий метод називають *методом безпосередньої оцінки*.

Якщо вимірювану величину порівнюють із величиною, відтвореною мірою – це *метод порівняння*. Наприклад, принцип дії мікропроцесорного фазометра (рис. 1) ґрунтується на перетворенні різниці фаз радіо та ультразвукового сигналу, з часом прибуття  $t_1$  і  $t_2$ , що мають напругу  $u_1$  і  $u_2$  у часовий інтервал  $t_x$  з його наступним квантуванням імпульсами зразкової частоти  $f_0$ .

Основними елементами фазометра є блоки узгодження сигналів  $u_1$  і  $u_2$ , мікроконтролер MCU, кварцовий резонатор частотою  $f_0$  і пристрій індикації.

Перед початком вимірювань встановлюють час вимірювань  $t_B$  і коефіцієнт подільника частоти  $K=1$ .

У момент переходу напруги  $u_1$  через рівень нуля запускають таймер на рахування імпульсів  $f_0/K$ . Рахування проходить до переднього фронту імпульсу напруги  $u_2$ . При цьому робота таймера зупиняється, і підраховують кількість імпульсів  $N_x$ . Кількість імпульсів усереднюється в проміжку часу  $t_B = n \cdot f_x$ .

При виникненні переповнення таймера збільшують коефіцієнт подільника частоти  $K = K + \Delta K$  і повертаються на початок вимірювань. Фазовий зсув обчислюють за формулою

$$\phi_x = \frac{2\pi N_x}{n}$$

**Нульовий метод** – метод порівняння з мірою, при якому результируючий ефект впливу вимірюваної величини і міри на прилад порівняння доводять до нуля. Наприклад, мікропроцесорний вимірювач потужності.

Прикладом перетворювача потужності є AD7750 – мікросхема перетворювача добутку напруг в частоту слідування імпульсів (Product to Frequency Converter) із похибкою менше 0.3%, розроблена фірмою Analog Devices. На рис. 2 наведено структурну схему мікросхеми AD7750.

Входи каналів струму та напруги є диференціальними. Кожен вхід призначений для напруги не більше 1 В.

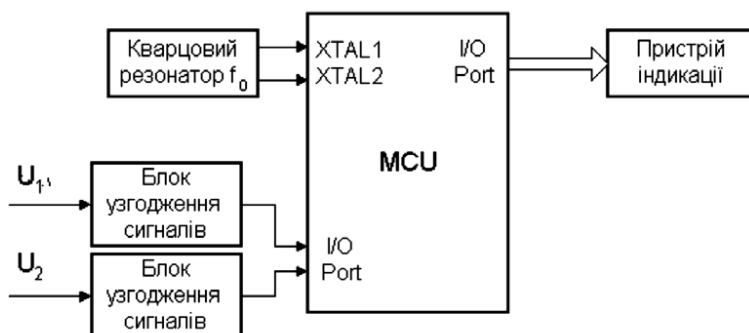


Рис. 1. Мікропроцесорний фазометр

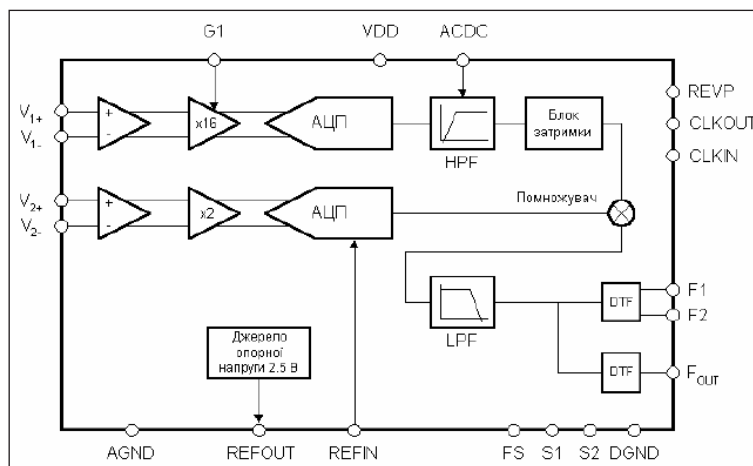


Рис. 2. Мікропроцесорний вимірювач потужності

Поточний канал, до якого надається отримана потужність –  $P_r(d)$ ,

$$P_r(d) = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \right) \left( \frac{d_0}{d} \right)^2,$$

має підсилювач з перемінним підсиленням  $G_r$  (1 або 16), що імітує прийомну антену, йому протиставлений (відповідно до нульового методу) канал напруги, до якого подається передана потужність, –  $P_t$ , містить підсилювач з коефіцієнтом посилення  $G_t=2$ , що імітує передавальну антену. Після підсилення обидва сигнали перетворюють АЦП в числовий код і множать. Високочастотні компоненти фільтруються за допомогою цифрового фільтра низьких частот LPF, потім код живлення надходить у перетворювач частоти (Digital to Frequency Converter, DTF).

Щоб зменшити похибку вимірювання потужності внаслідок присутності постійного компонента струму в нейтральному дроті, ви можете включити поточний режим фільтрації з фільтром високих частот HPF.

**Метод заміщення** – метод порівняння з мірою, при якому вимірювану величину заміщають мірою з відомим значенням величини. Прикладом застосування методу заміщення може бути Цифровий частотомір, у якому частота  $f$  періодичного сигналу (між  $t_1$  і  $t_2$ ) – це фізична величина, значення якої визначають кількістю коливань в одиницю часу.

Принцип дії цифрового частотоміра середніх значень засновано на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий ча-

совий інтервал  $t_0$ , який формується зразковою мірою часу. Структурну схему цифрового частотоміра середніх значень наведено на рис. 3.

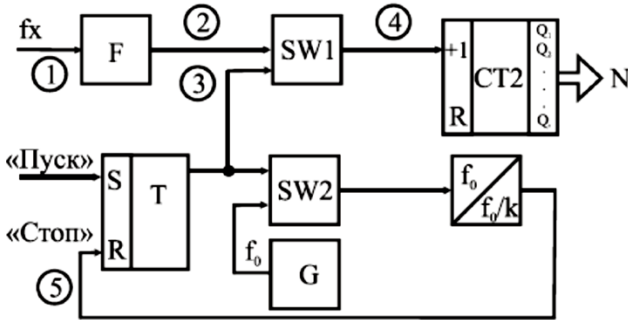


Рис. 3. Цифровий частотомір: Т – RS – тригер, SW2 – схема збігу, G – генератор зразкової частоти, ПЧ – подільник частоти, що формує зразковий часовий інтервал  $t_0$ .

**Диференціальний метод** – метод вимірювань, при якому вимірювана величина порівнюється з однорідною величиною, що має відоме значення, яке незначно відрізняється від значення вимірюваної величини, і при якому вимірюється різниця між цими двома величинами. Диференціальний метод сполучає в собі частину ознак методу безпосередньої оцінки і частину ознак нульового методу. Він може дати досить точний результат вимірювання, якщо тільки вимірювана величина і міра мало відрізняються одна від одної. Наприклад, якщо різниця цих двох величин дорівнює 1% і вимірюється з похибкою до 1%, то похибка вимірювання шуканої величини зменшується до 0,01%. Прикладом може служити метод вимірювання відстані на основі часу прибуття сигналу  $t_2$ , у якому відомою величиною є час відправлення  $t_1$ .

Вимірювання здійснюється за принципом визначення координат на основі часу прибуття сигналу. В цьому випадку, відстань між двома вузлами безпосередньо пропорційна часу, коли сигнал поширюється від одного пункту до іншого. Інформаційна складова відісланого сигналу містить час відправки. Ця відстань, вимірюється на основі часу відправки сигналу  $t_1$  і часу досягнен-

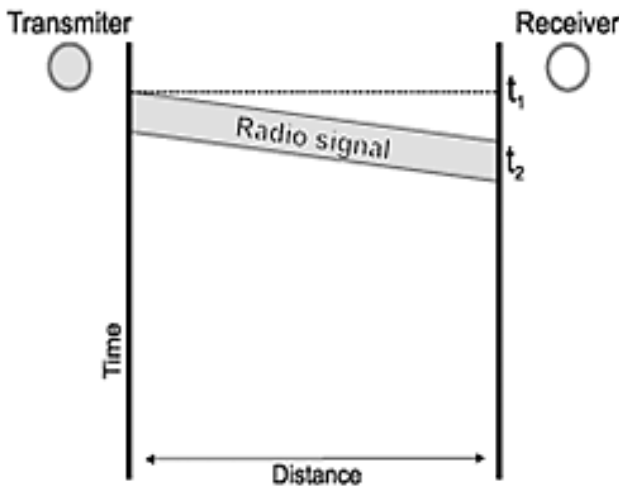


Рис. 4. Визначення відстані за допомогою часу прибуття сигналу

ня ним вузла приймача  $t_2$ , відстань між відправником і приймачем визначається за формулою:

$$d = s_r(t_2 - t_1)$$

де  $s_r$  – швидкість поширення радіо – сигналу (швидкість світла), і  $t_1$  і  $t_2$  – часи, коли сигнал відіслано і отримано (рис. 4).

**Метод збігів** – метод, при якому різницю між вимірюваною величиною і величиною, відтвореною мірою, вимірюють, використовуючи збіг оцінок шкал або періодичних сигналів. Наприклад, метод TDoA заснований на відмінності часів коли єдиний сигнал від одного вузла прибуває в три або більше вузли або різниці часу, коли кілька сигналів від одного вузла надходять в інший вузол.

Перший випадок, більш поширений в стільникових зв'язках, вимагає точно синхронізованих вузлів приймача (в цьому випадку, базові станції).

У другому випадку, більш поширеному і підходящому для БСМ, вузли повинні бути обладнані додатковими апаратними засобами, здатними до відправлення двох типів сигналів одночасно. У цих сигналів повинні бути різні швидкості поширення, як радіо/ультразвук або радіо/акустичний. Зазвичай, перший сигнал – пакет безпосередньо, який із швидкістю світла ( $\sim 300,000 \text{ km/c}$ ), і другий сигнал – деякий звук, через його повільніше поширення ( $\approx 340 \text{ м/с}$ ). На рис. 5 наведений приклад методу TDOA який використовується для обчислення координат БСМ, де ультразвуковий імпульс передається одночасно з радіосигналом.

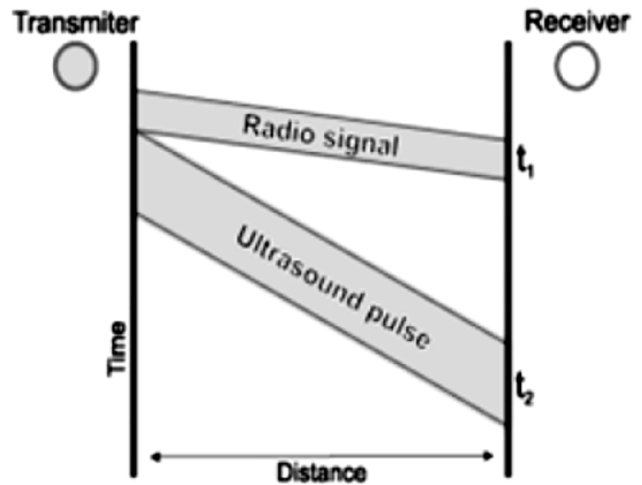


Рис. 5. Визначення відстаней за допомогою методу TDOA (Time Difference of Arrival)

В цьому випадку, вузли вираховують різницю часу прибуття двох сигналів. Відстань може тепер бути обчислена наступною формулою:

$$d = (s_r - s_s)(t_2 - t_1),$$

де  $s_r$  і  $s_s$  – швидкість поширення радіо та ультразвукового сигналу, і  $t_1$  і  $t_2$  – час прибуття радіо та ультразвукових сигналів, відповідно.

Оцінка похибки на відстані, отримані TDOA, вимірюються в сантиметрах. Експерименти з ультразвуком, показують похибки приблизно два або три сантиметри, що є меншим самого вузла. Незважаючи на більш низькі похибки, у цих методах є певні недоліки. Перший – потреба у додаткових апаратних засобах, щоб надсилати другий сигнал, який збільшує вартість вузла. Другий – діапазон

другого сигналу, який зазвичай менший ніж 3 м і 10 м з більш потужними передавачами.

Встановлена сукупність операцій і правил при вимірюванні, виконання яких забезпечує одержання результатів вимірювань з гарантованою точністю відповідно до прийнятого методу, називається методикою виконання вимірювань МВВ. Звичайно, методика вимірювань регламентується нормативно-технічним документом.

Загальні вимоги по розробці, оформленню, атестації, стандартизації МВВ і метрологічному нагляду за ними регламентуються ДСТ. Дані нормативні документи стосуються і переважної більшості проведених вимірювань. Виключення становлять МВВ, при використанні яких похибки вимірювань визначаються в процесі або після їхнього застосування. Такого роду вимірювання досить нечисленні і здійснюються, головним чином, у наукових дослідженнях, а також при проведенні експериментів. Порядок розробки, застосування і вимоги до таких МВВ визначають організації, що використовують МВВ [13].

Розробку МВВ виконують на основі вихідних даних, що включають:

- призначення, де вказують область застосування, найменування вимірюваної величини і її характеристик, а також характеристики об'єкту вимірювань, якщо вони можуть впливати на похибки вимірювань;
- вимоги до похибки вимірювань;
- умови вимірювань, задані у вигляді номінальних значень і (або) меж діапазонів можливих значень величин, що впливають;
- вид індикації і форми подання результатів вимірювань;
- вимоги до автоматизації вимірювальних процедур;
- вимоги до забезпечення безпеки виконуваних робіт;
- інші вимоги до МВВ, якщо в них є необхідність.

Розробка МВВ, як правило, включає наступні етапи:

- написання, узгодження і затвердження технічного завдання на розробку МВВ;
- формування вихідних даних для розробки;
- вибір (або розробка) методу і засобів вимірювань, здійснюваних на основі нормативних документів. Вибір ЗВТ – складне, багатоваріантне завдання, рішення якого доцільно проводити на основі того або іншого техніко-економічного критерію. У цьому випадку одержуване рішення відповідає оптимальному виконанню таких вимог до вимірювання, як мінімальні витрати, забезпечення необхідної точності і достовірності;

– встановлення послідовності і змісту операцій при підготовці і виконанні вимірювань, обробка проміжних результатів і обчислення остаточних результатів вимірювань;

– встановлення приписаних характеристик похибок вимірювань – характеристик похибок будь-якого результату сукупності вимірювань, отриманого при дотриманні вимог і правил даної методики. Способи вираження приписаних характеристик повинні відповідати заданим у вихідних даних;

– розробка нормативів і процедур контролю точності одержуваних результатів вимірювань;

– розробка документу або розділу складового документу на МВВ (вимоги до їхнього змісту наведені нижче);

– метрологічна експертиза проекту документів на МВВ – аналіз і оцінка вибору методів і засобів вимірювань, операцій і правил проведення вимірювань і обробки їхніх результатів з метою встановлення відповідності МВВ пред'явленим метрологічним вимогам;

– атестація МВВ, що представляє собою процедуру встановлення і підтвердження відповідності МВВ пред'явленим до неї метрологічним вимогам. Обов'язковій атестації підлягають МВВ, використовувані в сфері поширення державного контролю і нагляду. Поза сферою контролю і нагляду МВВ атестують у порядку, встановленому в даній організації.

Атестацію здійснюють шляхом метрологічної експертизи документації, теоретичних або експериментальних досліджень МВВ. Атестовані МВВ підлягають метрологічному нагляду і контролю; стандартизація МВВ, виконувана відповідно до положень державної системи стандартизації.

В документах (або розділах складового документу) на МВВ вказують:

- призначення МВВ;
- умови вимірювань;
- вимоги до похибок вимірювань і (або) приписані їй характеристики;
- методи вимірювань;
- вимоги до ЗВТ, допоміжних пристроїв, матеріалів. Допускається вказувати типи ЗВТ, їхні характеристики і позначення документів, де наведені вимоги до ЗВТ;
- операції по підготовці до виконання вимірювань;
- операції при виконанні вимірювань;
- операції обробки і обчислення результатів вимірювань;
- нормативи, процедуру і періодичність контролю похибки результатів виконуваних вимірювань;
- вимоги до оформлення результатів вимірювань;
- вимоги до кваліфікації операторів;
- вимоги до забезпечення безпеки виконуваних робіт;
- вимоги до забезпечення екологічної безпеки.

З визначення МВВ виходить, що вона являє собою технологічний процес вимірювання. У зв'язку із цим не слід змішувати МВВ і документ на МВВ. Не всі методики описані відповідним документом. Для вимірювань, проведених за допомогою простих показуючих приладів, не потрібні документовані МВВ. У цих випадках досить у нормативній документації вказати тип і основні МХ засобів вимірювань.

Необхідність документування МВВ встановлює розробник документації при можливій істотній методичній або суб'єктивній складовій похибки вимірювань.

**Висновки.** Проведено систематизацію приладів та методів вимірювання механічних величин для побудови математичної моделі визначення часу прийняття сигналу, з метою визначення відстані між сенсорними прийомопередавачами.

Проведено аналіз методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання;

Описано прилади вимірювання механічних величин відносно того чи іншого методу вимірювання та побудувати математичну модель вимірювання відстані для кожного з приладів.

**Список літератури:**

1. Sichitiu M., Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon // In Proceedings of the 6st IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2014), FL, October 2014. – P. 174-183.
2. Sound Surveillance System (SOSUS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fas.org/irp/program/collect/sosus.htm>. Federation of American Scientists. – Назва з титул. екрану.
3. SISVIA (Sistema de Seguimiento y Vigilancia Ambiental) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dimap.es/news.html>. Technology and environment. – Назва з титул. екрану.
4. Institute of Electrical and Electronics Engineers / Inc., IEEE Std. 802.15.4- 2015, IEEE Standard for Information Technology – telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. – 2015. – P. 250.
5. He T., Huang C., Blum B. Range-free localization schemes for large scale sensor networks // In MobiCom '09: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, 2016, ACM Press, New York. – P. 81-95.
6. Derivation of Friis Transmission Formula [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>. The Friis Equation. – Назва з титул. екрану.
7. Savvides A., Han C., Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors // In 14th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2017. – P. 166-179.
8. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 15th edition // Springer-Verlag, Berlin. – 2014.
9. Elson J. Time synchronization in wireless sensor networks // Department Computer Sciences, University of California, Ph.D. dissertation, Los Angeles. – 2014.
10. Whitehouse K. The design of calamari: An ad hoc localization system for sensor networks // M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2015.
11. Priyantha N., Balakrishnan H., Teller S. The cricket compass for context aware mobile applications // In 17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, July 2016. – P. 325.
12. Коломієць Л.В. Метрологія, стандартизація, сертифікація та управління якістю в системах зв'язку / Л.В. Коломієць, П.П. Воробієнко, М.Т. Козаченко, М.Б. Налісний, В.Л. Серебрін, Л.О. Козаченко, О.В. Грабовський, Л.О. Лебединська. – Одеса: ТОВ «ВМВ», 2009. – 376 с.
13. Хромой Б.П., Кандинов А.В., Синявский А.Л. и др. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи. – М.: Радио и связь, 1986.

**Дудник А.С.**

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

## **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СОГЛАСНО МЕТОДУ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПРИНЦИПОВ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ**

### **Аннотация**

Физическое явление или эффект, положенное в основу измерений называется принципом измерений. Например, применение эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения или эффекта Доплера для измерения скорости. Для проведения измерений выбирают определенный метод измерений – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. В данной статье исследованы приборы и методы измерения механических величин в беспроводных сенсорных сетях и цифровых измерительных приборах, которые подключены к узлам сенсорных сетей и вместе представляют собой информационную измерительную систему. Исследуется задача измерения расстояния и времени прохождения сигнала между приемопередатчиками. Расчет расстояния осуществляется с помощью времени распространения сигнала.

**Ключевые слова:** приемопередатчик, сенсор, радиоимпульс, время, расстояние, погрешность измерения, препятствия, частотомер, квантования.

**Dudnik A.S.**

Kyiv National Taras Shevchenko University

## **SYSTEMATIZATION OF MEASUREMENT DEVICES ACCORDING TO METHOD OF MEASUREMENT OF MECHANICAL VALUES AND PRINCIPLES OF THEIR IMPLEMENTATION**

### **Summary**

A physical phenomenon or the effect underlying the measurement is called the measurement principle. For example, applying the Josephson effect to measure the electrical voltage or the Doppler effect for measuring speed. To perform measurements, select a certain measurement method – the reception or a set of methods for comparing the measured physical quantity with its unit in accordance with the realized measurement principle. In this paper, we investigate instruments and methods for measuring mechanical quantities in wireless sensor networks and digital measuring devices that are connected to nodes of sensor networks and together constitute an information measuring system. The problem of measuring the distance and transit time of a signal between transceivers is being investigated. The distance is calculated using the propagation time of the signal.

**Keywords:** transceiver, sensor, radio impulse, time, distance, measurement error, obstacles, frequency counter, quantization.