

НЕДОЛІКИ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ПОШУКУ ВІДСТАНЕЙ ФАЗОВИМИ МЕТОДАМИ У ВИПАДКУ ДЕКІЛЬКОХ ОБ'ЄКТІВ

Для визначення об'єктів все більш широке застосування знаходять фазові методи. Відомо також, що для фазових методів основною проблемою є ідентифікація об'єктів, оскільки сигнал вимірювання та відбиття є сигналами однієї частоти. Показані існуючі методи виділення інформації про відстані до об'єктів, що знайшли своє теоретичне та практичне застосування.

Ключові слова: фазовий метод, відбиття, відстань.

K.L. HORIASCHENKO

Khmelnitsky national university, Ukraine

ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ПОШУКУ ВІДСТАНЕЙ ФАЗОВИМИ МЕТОДАМИ У ВИПАДКУ ДЕКІЛЬКОХ ОБ'ЄКТІВ ТА АНАЛІЗ ІХ ЗАСТОСОВУВАНІСТІ ДЛЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Phase methods are increasingly used to determine objects. It is also known that for phase methods, the main problem is the identification of objects, because the signal of measurement and reflection are signals of one frequency. There are modern studies in which the fundamental possibility of dividing the two objects using only phase measurements at several frequencies is shown and substantiated.

Existing methods of allocating distance information to objects that have found their theoretical application are shown. These methods include the iterative method and the method of successive approximation. It is established that such methods are based on principal assumptions about the finite number of reflections. The rebinding of signals between objects is not taken into account. It is essential to take the size of objects much smaller than the wavelength. Thus, the proposed existing methods will only find a solution for certain cases and can not be used for practical application for radio measuring devices.

Keywords: phase method, reflection, distance.

Існують сучасні дослідження, в яких показана та обґрунтована принципова можливість розділення двох об'єктів із використанням лише фазових вимірювань на кількох частотах.

Розглянемо сучасні дослідження у області вимірювань відстаней до кількох одночасних пошкоджень у лінії зв'язку за допомогою фазових методів. Важливим наслідком згідно робіт [1, 2, 3, 4, 5] є встановлена можливість вимірювати відстані до двох і більше пошкоджень у лініях зв'язку, що існують там одночасно, із застосуванням фазових вимірювань.

Для розв'язання цієї задачі розроблені та представлені такі методи. Реалізація цих методів відома з таких робіт як [6, 4]. Однак вони мають складності в практичній реалізації, вимагають проведення складних чисельних розрахунків. Проте, найголовнішою їх проблемою залишається невизначеність кількості пошкоджень.

Ітераційні фазочастотні методи вимірювання відстаней до пошкоджень в провідній лінії

Найпершими методами, що мали на меті розв'язання задачі вимірювання відстаней до пошкоджень в провідній лінії стали ітераційні методи.

Усі сигнали є гармонійними із однією частотою і різними фазовими зсувами. Отже:

$$s_{\text{відл}}(t) = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + a_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (1)$$

де a_i – амплітуди сигналів;

ω – кругова частота;

φ_i – кути зсуву фази для відбиття.

Вираз виду (1) показує формування сумарного сигналу. Зрозуміло, що розв'язання прямої задачі визначається цілком достатньо з цього виразу. Вирішення зворотної задачі – визначення кількості пошкоджень та відстаней до них потребує пошуку методів розв'язання рівнянь виду (1).

В загальному випадку рівняння (1) мають $2n$ пар невідомих, де n – кількість об'єктів вимірювання, також є невідомою в початковий момент. Причому одна невідома в цій парі – це амплітуда a_i відбиття, а друга – кут зсуву фази φ_i від цього ж відбиття. Тому для вирішення зворотної задачі необхідно записати декілька рівнянь, кількість яких повинна дорівнювати $n \times 2$ або більше них.

При проведенні вимірювань, якщо опиратися на рис. 1, рис. 2 для забезпечення вимірювання амплітудно-частотної та відповідної фазочастотної характеристики не можна охопити всі точки робочого частотного діапазону.

Обрахунок, представлений на Рис. 1 та Рис. 2 показує, як змінюються параметри лінії від частоти. При цьому для моделювання були використані частотонезмінні значення R , L , C та G .

Сучасні підходи ([3, 4]) до проведення вимірювань передбачають ступеневу зміну частоти шляхом перестройки генератора вимірювальної частоти. Тому при проведенні цих вимірювань будуть отримані значення амплітуди та фазового зсуву сумарного сигналу в певних точках робочого діапазону. А результат –

масив отриманих значень можна записати системи рівнянь в тригонометричній або експоненційній формах [3, 4]:

$$\begin{cases} U_{\Sigma_1} \sin \varphi_{\Sigma_1} = U_1 \sin \varphi_1 + U_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_n \sin \varphi_n, \\ U_{\Sigma_2} \sin \varphi_{\Sigma_2} = U_1 \sin 2\varphi_1 + U_2 \sin 2\varphi_2 + \dots + U_n \sin 2\varphi_n, \\ \dots \\ U_{\Sigma_n} \sin \varphi_{\Sigma_n} = U_1 \sin n\varphi_1 + U_2 \sin n\varphi_2 + \dots + U_n \sin n\varphi_n, \\ U_{\Sigma_1} \cos \varphi_{\Sigma_1} = U_1 \cos \varphi_1 + U_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n \cos \varphi_n, \\ U_{\Sigma_2} \cos \varphi_{\Sigma_2} = U_1 \cos 2\varphi_1 + U_2 \cos 2\varphi_2 + \dots + U_n \cos 2\varphi_n, \\ \dots \\ U_{\Sigma_n} \cos \varphi_{\Sigma_n} = U_1 \cos n\varphi_1 + U_2 \cos n\varphi_2 + \dots + U_n \cos n\varphi_n, \end{cases} \quad (2)$$

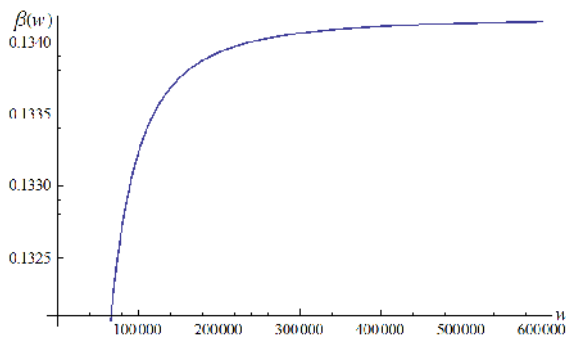


Рис. 1. Зміна коефіцієнту фазового зсуву $\beta[\omega]$

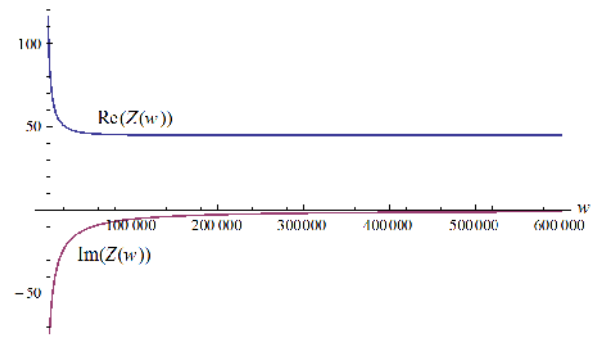


Рис. 2. Зміна дійсної та уявної складових частин хвильового опору лінії $\dot{Z}[\omega]$

Рівняння системи (2) є системою тригонометричних рівнянь, а отже вони є нелінійними. Методи розв'язання таких нелінійних систем рівнянь в кожному окремому випадку необхідно шукати відповідно до системи.

Як один з способів для розв'язання запропонованої системи рівнянь запропоновано використання чисельних методів [4]. В основу чисельного методу розв'язання систем нелінійних рівнянь покладено принцип зведення рівнянь до лінійних та пошуку розв'язків, що задовольняють певним умовам в заданому діапазоні значень.

Загальна кількість рівнянь n визначається виходячи з уявної кількості об'єктів. У випадку 2-х об'єктів, рівняння системи (2) зводяться до наступної системи двох рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^2 a_i \cos(\varphi_{1i}) = a_{\Sigma_1} \cos \varphi_{\Sigma_1}; \\ \sum_{i=1}^2 a_i \cos(\varphi_{2i}) = a_{\Sigma_2} \cos \varphi_{\Sigma_2} \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язок системи рівнянь (3) можливий з визначенням кутів зсувів фаз φ_{ni} із певною точністю при одночасному наближенні між собою значень лівої та правої частини кожного рівняння.

Одним із методів розв'язку цієї системи є ітераційний метод розв'язку системи рівнянь. Розв'язок системи (2) полягає у поступовому розв'язку із застосуванням представленого в роботах [2, 3, 4] математичного апарату розв'язку систем рівнянь виду:

$$\begin{cases} f_1(a_1, \varphi_1, \varphi_2) = a_1 \sin \varphi_1 + (a_{\Sigma_0} - a_1) \sin \varphi_2 - a_{\Sigma_1} \sin \varphi_{\Sigma_1} = 0; \\ f_2(a_1, \varphi_1, \varphi_2) = a_1 \sin 2\varphi_1 + (U_{\Sigma_0} - a_1) \sin 2\varphi_2 - a_{\Sigma_2} \sin \varphi_{\Sigma_2} = 0; \\ f_3(a_1, \varphi_1, \varphi_2) = a_1 \sin 3\varphi_1 + (U_{\Sigma_0} - a_1) \sin 3\varphi_2 - a_{\Sigma_3} \sin \varphi_{\Sigma_3} = 0. \end{cases}$$

Покажемо складність розв'язку для випадку двох пошкоджень. Для розв'язку такої системи складається матриця Якобі [2, 3, 4]:

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial a_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) & a_1 \cos \varphi_1 & (a_{\Sigma 0} - a_1) \cos \varphi_2 \\ (\sin 2\varphi_1 - \sin 2\varphi_2) & 2a_1 \cos 2\varphi_1 & 2(a_{\Sigma 0} - a_1) \cos 2\varphi_2 \\ (\sin 3\varphi_1 - \sin 3\varphi_2) & 3a_1 \cos 3\varphi_1 & 3(a_{\Sigma 0} - a_1) \cos 3\varphi_2 \end{bmatrix}.$$

Та шукається визначник Якобі для даної матриці:

$$\det W = \det \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] \neq 0.$$

Розв’язок відбувається шляхом послідовної зміни параметрів елементів системи як амплітуди так і кута зсуву фази. Якщо пошкоджень є три, система (2) стає складнішою. Необхідність визначення значень функцій та їх похідних вимагає наявності потужного програмного та апаратного забезпечення.

Враховуючи представлені та проаналізовані в попередньому розділі моделі пошкоджень слідує, що запропонований у роботах [2, 3, 4] ітераційний метод розв’язку задачі визначення відстаней до пошкоджень можна використати тільки для ідеалізованого варіанту пошкодження лінії – з точковими пошкодженнями та за умов відомої їх кількості.

В реальній лінії використання цього методу неможливе:

1) кількість наявних пошкоджень в кабельній лінії та їх тип (точкове або розподілене) є невідомими априорі, а тому для розв’язку задачі запропонованим у роботах [2, 3, 4] необхідно встановлювати кількість пошкоджень більше ніж це може бути в реальному випадку;

2) ускладнення виконання обрахунків через застосування математичного апарату, який використовує числові методи розв’язку систем зв’язку.

Метод послідовного наближення для фазового методу вимірювання дальності об’єктів

Іншим варіантом ітераційного методу є запропонований та представлений в роботах [2, 3, 4]

метод пошуку із використанням інформації щодо мінімумів та максимумів на амплітудо-фазовій діаграмі для суми відбитих сигналів, згідно процесів, що відображено на рис. 3, рис. 4, рис. 5. Тому в роботах [2, 3, 4] показано можливість також використати ітераційний підхід в розв’язку системи (2).

Рис. 3. Амплітудно-фазова діаграма в циліндричних координатах (АФЦ) сумарного відбитого сигналу для двох об’єктів [4]

а)

б)

Рис. 4. Амплітудно-фазова діаграма в циліндричних координатах сумарного відбитого сигналу: а) при $k=10/6$, б) при $k=14/6$ [4]

На рис. 5 зображено АФДЦ за умови, що кути зсувів фаз є кратні 2 до 1, а амплітуди не рівні. При цьому в характерних точках характеристики також спостерігається мінімум амплітуди сумарного відбитого сигналу ($A_{\Sigma_n} \rightarrow \min$) [4].

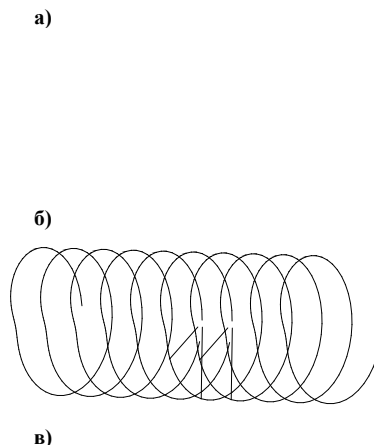


Рис. 5. Амплітудно-фазова діаграма в циліндричних координатах сумарного відбитого сигналу: а) при $\phi = 0.7$, б) при $\phi = 0.5$, в) при $\phi = 0.3$ [4]

Для випадку різних коефіцієнтів відношення фаз відбитих сигналів справедливі твердження, викладені вище.

Отже в роботі [4] проаналізовані амплітудно-фазові діаграми в циліндричних координатах для сумарного відбитого сигналу за умов різних співвідношень між амплітудами векторів відбиттів, за умов різних співвідношень між кутами зсуву фаз.

Проте висновки щодо природи та причин такої поведінки вектора кута зсуву фази в роботі [4] залишились не розкритими. Недостатнє розуміння природи цих явищ призвело до створення недосконалих методів визначення кількості об'єктів в цілому та визначення відстаней до них зокрема.

Так на рис. 6 ([2, 3, 4]) показано графік залежності амплітуди сум відбитих сигналів від частоти. Фактично, цей графік є не що інше як амплітудно-фазова діаграма, яка є результатом векторної суми векторів, що сформовано векторами від відбиттів, тільки представлена в декартовій площині. В представлених вище роботах ([2, 3, 4]) нажаль не знайшли подальшого розвитку аналіз причин формування отриманих графіків, що аналогічні до показаного на рис. 6.

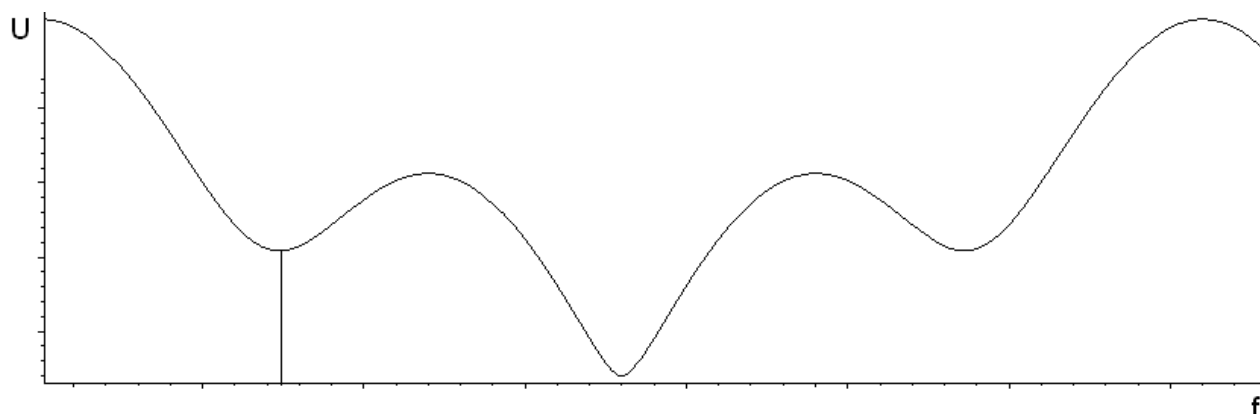


Рис. 6. Графік залежності амплітуди суми відбитих сигналів від частоти сигналу зондування лінії [2, 3, 4]

Математична модель процесу вимірювання за методом послідовного наближення має вигляд [3]:

$$a_k = \frac{a_{\Sigma}}{2^N} \sum_{i=1}^N 2^{N-i} k_i, \tag{4}$$

де N – число розрядів регістру послідовного наближення;

a_{Σ} – максимальна вимірювана амплітуда сумарного сигналу на частоті $f=0$;

k_i – значення на виході амплітудного компаратора на $-$ му кроці врівноваження, приймає значення "0" або "1".

В роботі [3] проведено аналіз математичної моделі методу послідовного наближення, та стверджується, що з кожним кроком вимірювання точність підвищується у два рази. Проте практична реалізація має проблеми в реалізації цього методу.

Отже, визначення відстаней згідно алгоритму методу послідовного наближення полягає у введенні додаткового вектору таким чином, щоб його вплив створював компенсацію впливу одного з векторів, що визначає сумарний сигнал.

Наприклад, для визначення складових сумарного сигналу, що складається з 3-х векторів, а це відповідає 3-м точковим пошкодженням, виконуються наступні дії:

1. Вводиться додатковий сигнал, з такими параметрами:

- 1.1) вектор кута зсуву фази встановлюється в протилежному значенні до кута зсуву фази одного з трьох векторів відбитого сигналу, тобто $\varphi_k = \varphi_3 - 180^\circ$.
- 1.2) амплітуда вектору встановлюється на рівні половини амплітуди сумарного вектору відбитих сигналів на частоті $f=0$, тобто $a_k = a_\Sigma / 2$.

2. Досліджується кривизна оновленої амплітудно-частотної характеристики сумарного відбитого сигналу з урахуванням компенсуючого вектора та визначаються характеристичні перепади. Наявність таких перепадів свідчить про те, що вектор третього відбитого сигналу некомпенсований. При введенні компенсуючого вектору можливі наступні випадки [3]:

- $\bar{a}_k = \bar{a}_3$ – повна компенсація вектору третього відбитого сигналу.
- $\bar{a}_k < \bar{a}_3$ – недокомпенсація вектору третього відбитого сигналу;
- $\bar{a}_k > \bar{a}_3$ – перекомпенсація вектору третього відбитого сигналу;

За наявності у сумарному сигналі 4-х та більше складових, механізм пошуку вектору компенсації потрібно застосувати для компенсації кожної зі складових. В цьому випадку похибка визначення однієї складової буде акумулюватись та додаватись приводячи до зростання похибок визначення компенсуючих векторів інших складових. Таким чином, в методі послідовного наближення відбувається як мінімум маніпулювання амплітудою сумарного сигналу без врахування фізичної суті процесу.

Застосування запропонованого методу на практиці має наступні проблеми в реалізації:

1. Амплітуда сумарного сигналу. У виразі (4) необхідно визначати амплітуду сумарного сигналу на частоті $f=0$. Однак враховуючи зміни параметрів лінії (див. Рис. 2) на низьких частотах коефіцієнти відбиттів від пошкоджень є залежними від частоти вхідного сигналу. Тому амплітуди відбиттів на дуже низьких частотах будуть відрізнятись від амплітуди відбиттів на більш високих частотах.

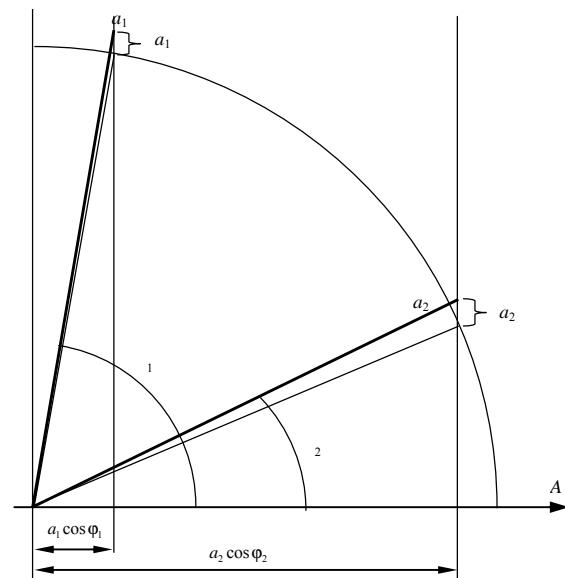


Рис. 7. Похибка амплітуди та фази

2. Вимірювання значення амплітуди. При застосуванні АЦП на 24 розряди, а це враховуючи те, що частоти вхідного сигналу знаходяться в межах до 1 МГц є досяжною величиною, відносна похибка вимірювання амплітуди можна оцінити в межах:

$$\delta U = \frac{100\%}{2^{24}} = 5,96 \times 10^{-6} (\%),$$

і це без врахування похибки встановлення амплітуди вхідного сигналу, похибки обумовленої наявністю вищих гармонік у сигналі опорного генератора.

3. Вимірювання значення кута зсуву фази. Як показано в роботі [7], для перспективного вимірювача кута зсуву фази відносна похибка вимірювання кута зсуву фази можна також оцінити в межах (для 1 кГц):

$$\delta \varphi = \frac{0,00001^\circ}{360^\circ} \times 100\% = 2,77 \times 10^{-6} (\%).$$

Для більшої частоти точність вимірювання кута зсуву фази буде зменшуватись. А враховуючи, що типовий вираз (1) працює з тригонометричним виразом $a_i \cos(\omega t + \varphi_i)$, то похибки вимірювання амплітуди або фази призведуть до похибок оцінювання значення вектора, що компенсує:

$$\delta a_i = a_i \cos(\omega t + \varphi_i) - [a_i + \Delta a_i] \cos(\omega t + [\varphi_i + \Delta \varphi_i]),$$

Наближення кута зсуву фази до 0 веде до зростання похибки оцінювання амплітуди вектору відбиття.

Висновки

Таким чином, практична імплементація та застосування приведених методів пошуку складових сумарного сигналу вимагає розв'язання складної системи рівнянь з багатьма невідомими. Це ускладнює вимірювання відстані до пошкоджень у лініях зв'язку. Вимагає великих обчислювальних потужностей та спеціалізованого програмного забезпечення. Обмежуючим фактором є також і кінцева кількість пошкоджень. Для розв'язку систем рівнянь потрібно знати кількість, або штучно обмежуватись їх кількістю. Також не знайшло виділення розміру об'єкту відбиття.

Враховуючи це, розглянуті методи мають обмежене застосування і не можуть бути рекомендовані до використання в сучасній радіовимірвальній техніці.

Література

1. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский и др.; Под ред. Г.В. Глебовича. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с., ил.
2. Любчик В.Р. Вимірювання відстаней в радіолокації до трьох об'єктів / В.Р. Любчик, О.І. Гнатюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – №4. – Ч.1. – Т.1. – С. 239-242.
3. Любчик В.Р. Вимірювання відстаней до трьох об'єктів / В.Р. Любчик, О.І. Гнатюк // – Вісник Технологічного університету Поділля. – №2. – 2005. – С.183-188
4. Любчик В.Р. Розробка фазового методу вимірювання відстаней до двох об'єктів // Вісник технологічного університету Поділля. – 2004. - № 2. – С. 108-114.
5. Маевский С.М. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний / С.М. Маевский, В.Г. Баженов, Е.К. Батуревич, Ю.В. Куц. – К.: Вища школа. Изд-во при Киев. ун-те, 1983. – 84 с.
6. Горященко К.Л. Импульсно-фазові вимірювання для лінії із двома неоднорідностями / К.Л. Горященко // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2003. – № 1. – С. 80-82.
7. Гула І.В. Властивості методу коінцидентії для вимірювання фазових зсувів сигналів / І.В. Гула // Дванадцята міжнародна науково-технічна конференція "Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВОТТП_12_2013), 3-8 червня 2013р.: тези доповідей. – Одеса. – С. 63-64.

References

1. Issledovanie ob#ektov s pomoshh'ju pikosekundnyh impul'sov / G.V. Glebovich, A.V. Andriyanov, Ju.V. Vvedenskij i dr.; Pod red. G.V. Glebovicha. – M.: Radio i svjaz', 1984. – 256 s., il.
2. Ljubchik V.R. Vimirjuvannja vidstanej v radiolokacii do tr'oh ob'ektiv / V.R. Ljubchik, O.I. Gnatjuk // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2005. – №4. – Ch.1. – T.1. – S. 239-242.
3. Ljubchik V.R. Vimirjuvannja vidstanej do tr'oh ob'ektiv / V.R. Ljubchik, O.I. Gnatjuk // – Visnik Tehnologichnogo universitetu Podillja. – №2. – 2005. – S.183-188
4. Ljubchik V.R. Rozrobka fazovogo metodu vimirjuvannja vidstanej do dvoh ob'ektiv // Visnik tehnologichnogo universitetu Podillja. – 2004. - № 2. – S. 108-114.
5. Maevskij S.M. Primenenie metodov fazometrii dlja precizionnogo izmerenija rasstojanij / S.M. Maevskij, V.G. Bazhenov, E.K. Baturevich, Ju.V. Kuc. – K.: Vishha shkola. Izd-vo pri Kiev. un-te, 1983. 84 s.
6. Gorjashhenko K.L. Impul'sno-fazovi vimirjuvannja dlja liniij iz dvoma neodnorodnostjami / K.L. Gorjashhenko // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – Hmel'nic'kij. – 2003. – № 1. – S. 80-82.
7. Gula I.V. Vlastivosti metodu koincidencii dlja vimirjuvannja fazovih zsvuv signaliv / I.V. Gula // Dvanadcjata mizhnarodna naukovo-tehnicna konferencija "Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah" (VOTTP_12_2013), 3-8 chervnja 2013r.: tezi dopovidej. – Odesa. – S. 63-64.

Рецензія/Peer review : 27.04.2018 р.

Надрукована/Printed : 16.05.2018 р.

Стаття рецензована редакційною колегією