

УДК 621.317

Г.Б. Параска, д-р техн. наук, О.М. Шинкарук, д-р техн. наук, В.Р. Любчик, канд. техн. наук

Теоретичні основи фазових вимірювань відстаней до декількох об'єктів

В статье приведены предпосылки создания основ теории фазовых измерений расстояний до нескольких объектов. Приведена разработка идеализированной физической модели прохождения сигналов при проведении измерений. Показаны математические соотношения основ теории.

The article presents the background to lay the foundations of the theory of phase measurements of distances to multiple objects. Shows the development of an idealized physical model of signal transmission during the measurements. The basic foundations of the theory and mathematical relationships are presented.

Вступ

При фазових вимірюваннях відстаней за наявності декількох об'єктів виникає явище фазової неоднозначності [1]. Це явище не дозволяє розділити об'єкти при фазових вимірюваннях та знайти відстані до кожного об'єкта. На відміну від часових вимірювань, коли сигнали, що відбиваються від кожного об'єкта, розділяються за часом. При фазових вимірюваннях усі гармонійні сигнали, які використовують при фазових вимірюваннях, відбиті від усіх об'єктів, діють одночасно і, тому як кабельні лінії зв'язку є лінійними системами, алгебраїчно додаються у кожній точці лінії. Такий результуючий сигнал є гармонійним сигналом, який несе у собі інформацію про кожен з об'єктів. Тому, повстає задача встановити основні математичні співвідношення, що дозволили б розробити теорію фазових вимірювань відстаней до декількох об'єктів. Розробка даної теорії надасть можливість проводити вимірювання відстаней та характеристик об'єктів з підвищеною точністю та розрізнявальною спроможністю.

Основна частина

В загальному випадку сигнал відбитий від усіх об'єктів вимірювання є функцією від відстаней до кожного об'єкту та коефіцієнтів відбиття кожного об'єкту:

$$S_2(t) = f(l_1, \dots, l_n, k_1, \dots, k_n). \quad (1)$$

Проте на будь-який сигнал впливає ряд факторів обумовлений проходженням сигналів по довгій лінії, якою є кабельна лінія зв'язку. Таки-

ми факторами є вплив згасання у довгій лінії α , дисперсія сигналів при проходженні сигналів по довгій лінії D , часткове проходження сигналів через об'єкт (вплив коефіцієнтів проходження $k_{np.i}$), часткове поглинання сигналів на об'єктах (коефіцієнт поглинання $k_{пел.i}$). При врахуванні усіх наведених факторів, сигнал буде мати вигляд:

$$S_2(t) = f(l_1, \dots, l_n, k_1, \dots, k_n, \alpha, D, k_{np1}, \dots, k_{npn}, k_{пел1}, \dots, k_{пелn}). \quad (2)$$

Велика кількість параметрів, що впливають на результат проходження сигналів по кабельній лінії із дефектами, не дозволяють встановити основні закономірності та співвідношення. Тому для розробки основ теорії фазочастотних вимірювань відстаней пропонується скористатись загальноприйнятим підходом – від простого до складного. Для виявлення основних закономірностей та співвідношень фазочастотної теорії пропонується розробити ряд спрощених фізичних моделей довгої лінії із декількома навантаженнями розташованими на різних відстанях протягом лінії. Найпростіша модель повинна враховувати лише фактори, які впливають на проходження сигналів. Кожна наступна модель повинна враховувати більшу кількість факторів. На основі запропонованих фізичних моделей необхідно розробити математичні моделі проходження сигналів по довгій лінії із декількома навантаженнями.

Для спрощеного розгляду проходження сигналів по довгій лінії можна запропонувати наступну фізичну модель. Ця фізична модель базується на наступних принципах:

- усі сигнали проходять по довгій лінії без згасання;
- при досягненні сигналом, при розповсюдженні його в прямому напрямку, місця розташування кожного навантаження, сигнал відбивається відповідно до коефіцієнту відбиття цього навантаження;
- при розповсюдженні сигналів у прямому і зворотному напрямках, сигнали на навантаженнях не поглинаються і проходять без спотворень.

Даний принцип вступає у протиріччя до попереднього пункту, але він є тією долею ідеалі-

зації для виділення загальних закономірностей проходження сигналів по довгій лінії із декількома навантаженнями.

Відповідно до запропонованих принципів побудови фізичної моделі ідеалізованої довгої лінії із декількома навантаженнями, розглянемо проходження гармонійних сигналів.

Основним обмеженням коректності застосування запропонованої фізичної моделі є дотримання нерівності:

$$\lambda_{z1} \geq 2L_{\max} \quad (3)$$

Дана нерівність є необхідною для проведення фазових вимірювань відстаней. При її недотриманні буде виникати явище фазової неоднозначності, що є неприпустимим.

У самому простому випадку можлива наявність двох об'єктів вимірювання, якими можуть бути часткові поглинання або дефекти кабельної лінії зв'язку. Нехай у таку лінію, на кінці якої узгоджене навантаження, подаємо гармонійний електричний сигнал відповідно до умови (3). Графічно це представлено на рис. 1.

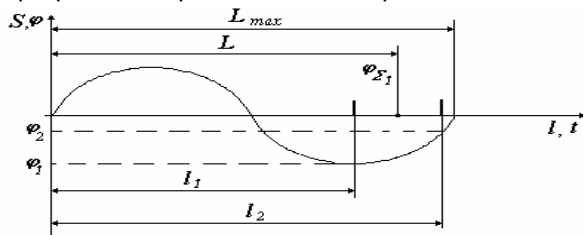


Рис. 1. Відстані до об'єктів спостереження

Об'єкти вимірювання розташовано на відстанях l_1 і l_2 . Відповідно від першого об'єкту сигнал буде відбиватись із фазовим зсувом ϕ_1 , який можна розрахувати за формулою:

$$\phi_1 = \frac{2\pi l_1}{L_{\max}} \quad (4)$$

Для другого об'єкту фазовий зсув ϕ_2 буде становити:

$$\phi_2 = \frac{2\pi l_2}{L_{\max}} \quad (5)$$

і повертаються на початок лінії. При поверненні сигналів на початок лінії фазові зсуви збільшуються в 2 рази, отже:

$$\phi_{21} = 2\phi_1 \text{ та } \phi_{22} = 2\phi_2 \quad (6)$$

Амплітуди сигналів відбитих від кожного об'єкту залежать від коефіцієнтів відбиття k_1 і k_2 . Отже:

$$a_1 = k_1 a \text{ та } a_2 = k_2 a \quad (7)$$

Тому як лінія зв'язку є системою лінійною, то для неї діє принцип суперпозиції, і обидва сигнали, які повернулись, необхідно алгебраїчно

додати. При застосування гармонійних сигналів отримуємо наступний вираз:

$$a_{\Sigma} \cos(\omega t - \phi_{\Sigma}) = a_1 \cos(\omega t - \phi_1) + a_2 \cos(\omega t - \phi_2) \quad (8)$$

Амплітуду сумарного сигналу a_{Σ} можна знайти за виразом:

$$a_{\Sigma} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)}, \quad (9)$$

фазовий зсув сумарного сигналу ϕ_{Σ} розраховується за формулою:

$$\operatorname{tg} \phi_{\Sigma} = \frac{a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2}{a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2} \quad (10)$$

Отже, при зондуванні двох об'єктів гармонійним сигналом, сумарний відбитий сигнал представляє собою гармонійний сигнал тієї ж частоти, амплітуда та фазовий зсув якого представляє собою складні нелінійні залежності від амплітуди та фазових зсувів сигналів відбитих від кожного об'єкту. Використавши вирази (8) - (10) неможливо відновити значення a_1 , a_2 , ϕ_1 , ϕ_2 , якщо відомі a_{Σ} і ϕ_{Σ} .

У векторному вигляді проходження гармонійного сигналу за наявності двох об'єктів має вигляд представлений на рис. 2.

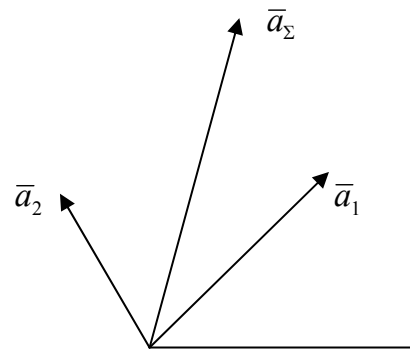


Рис. 2. Векторне представлення проходження гармонійного сигналу за наявності двох об'єктів

Використання теорії комплексних чисел дозволяє записати вираз (8) наступним чином:

$$a_{\Sigma} e^{j\omega t - j\phi_{\Sigma}} = a_1 e^{j\omega t - j\phi_1} + a_2 e^{j\omega t - j\phi_2} \quad (11)$$

Необхідно зауважити, що вирази (8), (11) встановлюють зв'язок між сумарним відбитим сигналом та сигналами відбитими, від кожного об'єкту в точці початку лінії. Зондуючий сигнал при цьому не враховується.

В цих залежностях відомими величинами є амплітуда сумарного відбитого сигналу та фазовий зсув цього сигналу відносно зондуючого гармонійного сигналу $s_1(t)$. Ці величини будемо вважати відомими тому що, при дослідженні реальної лінії їх можна виміряти за допомогою стандартних вимірювальних пристроїв: вольтметра та фазометра. Невідомими величинами є:

амплітуди a_1 і a_2 сигналів відбитих від кожного об'єкту та їх фазові зсуви ϕ_1 і ϕ_2 відносно гармонійного зонduючого сигналу $s_1(t)$. Невідомими вони є тому як не піддаються прямому вимірюванню. Саме ці чотири параметри a_1 , a_2 , ϕ_1 і ϕ_2 , дають повну характеристику про об'єкти вимірювання – відстані даних та коефіцієнти відбиття.

Відомо, що для того щоб віднайти значення чотирьох невідомих зв'язаних функціонально залежністю необхідна наявність мінімум чотирьох рівнянь. Отже, для розв'язання поставленої задачі розділення сигналів відбитих від двох об'єктів вимірювання залежностей (8), (11) недостатньо. Таким чином, необхідно записати ще як мінімум три рівняння. Для більш точного знаходження параметрів сигналів доцільно записати більше рівнянь.

Для отримання додаткової інформації для запису трьох або більше рівнянь пропонується зондувати лінію із декількома об'єктами вимірювання гармонійними сигналами із різними частотами. При зміні частоти в n раз рівняння (8) запишуться наступним чином:

$$\begin{aligned} a_{\Sigma n} \cos(n\omega t - \phi_{\Sigma n}) &= \\ &= a_1 \cos(n\omega t - \phi_{1n}) + a_2 \cos(n\omega t - \phi_{2n}). \end{aligned} \quad (12)$$

Тоді рівняння (11) при зміні частоти в n раз буде мати вигляд:

$$a_{\Sigma n} e^{n\omega t - j\phi_{\Sigma n}} = a_1 e^{n\omega t - j\phi_{1n}} + a_2 e^{n\omega t - j\phi_{2n}}. \quad (13)$$

За допомогою нескладних перетворень виразу (8) можна отримати синусну та косинусну складові:

$$\begin{cases} a_{\Sigma n} \cos \phi_{\Sigma n} = a_1 \cos \phi_{1n} + a_2 \cos \phi_{2n}, \\ a_{\Sigma n} \sin \phi_{\Sigma n} = a_1 \sin \phi_{1n} + a_2 \sin \phi_{2n}. \end{cases} \quad (14)$$

Розглядаючи рівняння (13) можна скоротити подібні члени $e^{n\omega t}$. Тоді отримаємо:

$$a_{\Sigma n} e^{-j\phi_{\Sigma n}} = a_1 e^{-j\phi_{1n}} + a_2 e^{-j\phi_{2n}}. \quad (15)$$

Застосування виразів (14) та (15) дозволяють скласти систему рівнянь, яка б мала однозначний розв'язок відносно усіх невідомих.

Якщо розглянути вирази (14) та (15), то неважко помітити, що з'явилися дві додаткові невідомі ϕ_{1n} і ϕ_{2n} . Таким чином, потрібно встановити взаємозв'язок між фазовими зсувами сигналів відбитих від об'єктів на частоті збільшеній в n разів. Для цього скористаємось поняттям повного фазового зсуву зв'язаний із кутовою частотою ω і фазовим зсувом ϕ наступною залежністю $\psi(t) = \omega t - \phi$. При збільшені частоти зростає і повний фазовий зсув: $n\psi(t) = n(\omega t - \phi)$, або

$n\psi(t) = n\omega t - n\phi$. Виходячи із цього виразу можна зробити висновок: що при лінійному зростанні частоти гармонійного зонduючого сигналу фазові зсуви сигналів відбитих від кожного об'єкту будуть також зростати лінійно. В такому разі вирази (14) і (15) можна записати наступним чином:

$$\begin{cases} a_{\Sigma n} \cos \phi_{\Sigma n} = a_1 \cos n\phi_1 + a_2 \cos n\phi_2, \\ a_{\Sigma n} \sin \phi_{\Sigma n} = a_1 \sin n\phi_1 + a_2 \sin n\phi_2. \end{cases}, \quad (16)$$

$$a_{\Sigma n} e^{-j\phi_{\Sigma n}} = a_1 e^{-jn\phi_1} + a_2 e^{-jn\phi_2}. \quad (17)$$

При дослідженні залежностей зміни амплітуди та фазового зсуву сумарного відбитого сигналу при зростанні частоти було зроблено ряд висновків. По-перше, періодично повторюються максимуми та мінімуми графіку зміни амплітуди сумарного сигналу. По-друге, знаходження максимумів та мінімумів залежить від співвідношення фазових зсувів сигналів відбитих від кожного об'єкту. По-третє, для функції фазового зсуву сумарного сигналу проміжки зростання та спадання, окрім співвідношень фазових зсувів сигналів відбитих від кожного об'єкту, також залежать від амплітуд цих сигналів. По-четверте, функція амплітуди сумарного сигналу при зростанні частоти від нуля - спадає. Лише по досягненні першого мінімуму, починає зростати. Функція фазового зсуву при зростанні частоти від нуля зростає починаючи зі значення 0. На цій кривій також наявні точки, які обмежують ділянки спадання та зростання. Амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики сумарного відбитого сигналу наведені на рис. 3.

В залежності від співвідношення відстаней, точки частотного діапазону, на яких спостерігаються мінімуми АЧХ, знаходяться на різних частотах. Найближче на частотній вісі спостерігаються мінімуми для АЧХ, співвідношення відстаней для якої найбільше. Відповідно при найменшому співвідношенні відстаней між мінімумами найбільша відстань на частотному діапазоні. Для дослідження причин такої поведінки характеристик розглянемо векторні діаграми відбитих сигналів на різних частотах (рис.4).

Як видно з наведених векторних діаграм на низьких частотах кут між векторами відбитих сигналів $\bar{a}_1$ і $\bar{a}_2$ невеликий. Відповідно модуль вектора сумарного сигналу $\bar{a}_{\Sigma 1}$, приблизно рівний і менший за суму модулів відбитих сигналів. При зростанні частоти, кут між векторами $\bar{a}_1$ і $\bar{a}_2$ збільшується. Тому як вектор сумарного сигналу знаходиться як векторна сума сигналів $\bar{a}_1$ і $\bar{a}_2$, то із зростанням частоти модуль сумарного сигналу спадає.

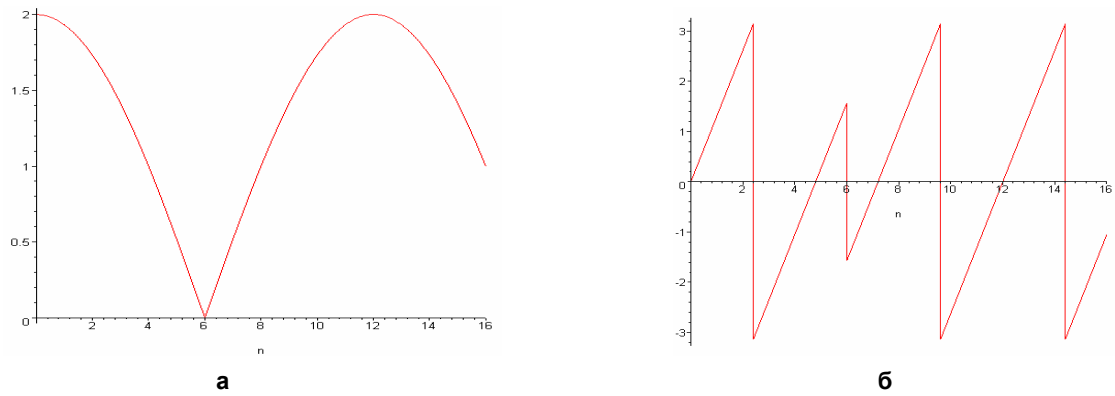


Рис. 3. Амплітудно-частотна а) та фазочастотна б) характеристика сумарного сигналу відбитого від двох об'єктів (при $I_2/I_1=1.5$)

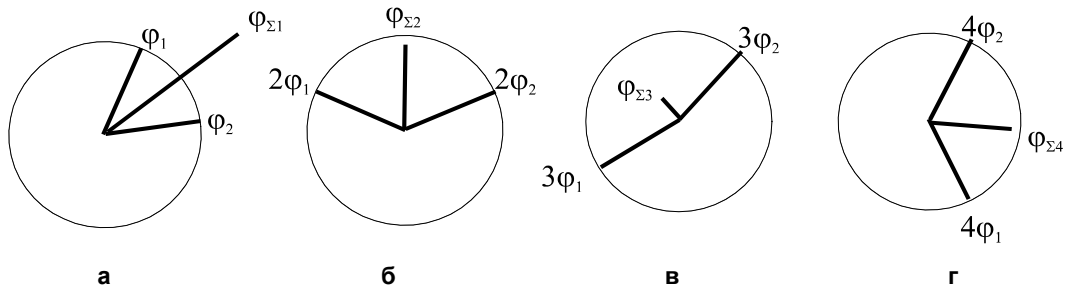


Рис. 4. Векторні діаграми фазових зсувів гармонік відбитого сигналу: а) I-ї гармоніки; б) II-ї гармоніки; в) III-ї гармоніки; г) IV-ї гармоніки

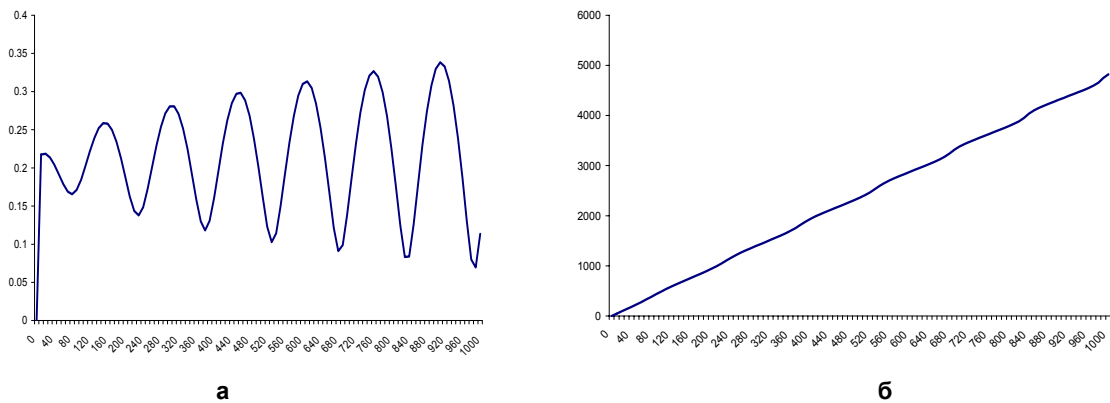


Рис. 5. Амплітудно-частотна а) та фазочастотна б) характеристика відбитого сигналу від об'єктів з ємнісним та активним характером

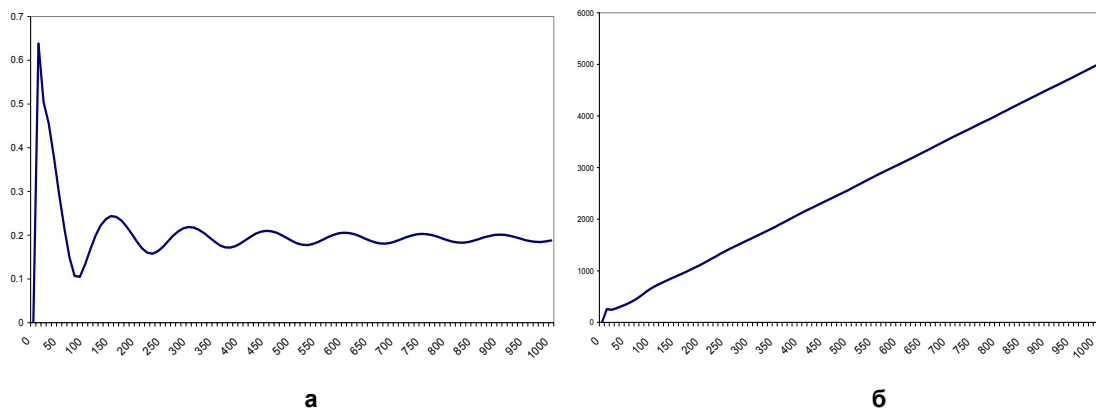


Рис. 6. Амплітудно-частотна а) та фазочастотна б) характеристика відбитого сигналу від об'єктів з індуктивним та активним характером

Отже:

$$|\overline{a_{\Sigma 2}}| < |\overline{a_{\Sigma 1}}|. \quad (18)$$

При подальшому зростанні частоти, кут між векторами сигналів $\overline{a_1}$ і $\overline{a_2}$ буде зростати, і на деякій частоті $f_n = nf_1$, буде дорівнювати π . Відповідно, вектор сумарного сигналу $\overline{a_{\Sigma n}}$ буде дорівнювати нулю. Подальше збільшення частоти призводить до того, що кут між векторами $\overline{a_1}$ і $\overline{a_2}$ починає зменшуватись і вектор сумарного сигналу буде зростати.

Провівши аналогічні дослідження неважко отримати співвідношення для випадку трьох і більше об'єктів. Для гармонійної форми запису сигналів:

$$\begin{cases} a_{\Sigma n} \cos \phi_{\Sigma n} = a_1 \cos n\phi_1 + a_2 \cos n\phi_2 + \dots + a_k \cos n\phi_k, \\ a_{\Sigma n} \sin \phi_{\Sigma n} = a_1 \sin n\phi_1 + a_2 \sin n\phi_2 + \dots + a_k \sin n\phi_k. \end{cases} \quad (19)$$

та комплексного запису сигналів:

$$a_{\Sigma n} e^{-j\phi_{\Sigma n}} = a_1 e^{-jn\phi_1} + a_2 e^{-jn\phi_2} + \dots + a_k e^{-jn\phi_k}. \quad (20)$$

Дослідження виразів (19) та (20) показує, що параметри сумарного сигналу його амплітуда та фазовий зсув також залежать від співвідношень фазових зсувів та амплітуд сигналів відбитих від кожного об'єкту. Усі висновки зроблені для випадку двох об'єктів, справедливі і для випадку для трьох і більше об'єктів.

Усі наведені вище дослідження притаманні випадку, коли усі об'єкти дослідження мають активний характер. Тобто немає залежності від частоти їх коефіцієнтів відбиття. При реактивному характері відбиття залежності зміняться. Для прикладу наведемо лише амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики сумарних сигналів для ємнісного та індуктивного характеру відбиттів.

Для забезпечення роботи моделі в реальних умовах необхідно врахувати ряд суттєвих факторів, що впливають на розповсюдження хвиль.

По-перше, запропонований метод використовується в рефлектометрії, тому, розглядаючи проходження вимірювальних сигналів, потрібно врахувати згасання (втрати енергії) при розповсюдженні сигналів в лінії, що відбувається за рахунок наявності струмів провідності. Останнє враховується, для довгих ліній, множителем $e^{-\alpha x}$, де α - коефіцієнт згасання.

Висновки

Наведені дослідження показують, що при зондування двох і більше об'єктів гармонійними сигналами в широкому діапазоні частот відбуваються зміни в амплітудно-частотній та фазочастотній характеристиках сумарного відбитого сигналу. Ці зміни проявляються як збільшення та зменшення амплітуд та фазових зсувів внаслідок різних співвідношень векторів сигналів відбитих від різних об'єктів на різних частотах. Застосування наведених основ теорії фазових вимірювань дозволили розробити ряд фазових методів вимірювання відстаней до двох, трьох та більше об'єктів. [2-4]

Література

1. *Маевский С.М.*, Баженов В.Г., Батуревич Е.К., Куц Ю.В. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний. – К.: Вища школа, Изд-во при Киев. ун-те, 1983, 84с.
2. *Любчик В.Р.* Розробка фазового методу вимірювання відстаней до двох об'єктів// Вісник ТУП, Ч.1., Том 3, №4, 2004, - С.108-114.
3. *Любчик В.Р.*, Гнатюк О.І. Вимірювання відстаней до трьох об'єктів. - Вісник ТУП, №№2, 2005.- С.183-188.
4. *Любчик В.Р.*, Сенчишина Ю.В., Параска Г.Б., Килимник О.М. Розробка аналітичного фазового методу вимірювання відстаней до трьох об'єктів// Вісник ХНУ, №2, 2009, - С.146-151.