



МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **119364** (13) **U**  
(51) МПК  
**G01B 15/06** (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

|                                                            |                             |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (21) Номер заявки:                                         | <b>u 2017 02827</b>         | (72) Винахідник(и): | <b>Полярус Олександр Васильович (UA),<br/>Поляков Євген Олександрович (UA),<br/>Бровко Яна Сергіївна (UA)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| (22) Дата подання заявки:                                  | <b>27.03.2017</b>           | (73) Власник(и):    | <b>ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ<br/>АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ<br/>УНІВЕРСИТЕТ,<br/>вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002<br/>(UA),<br/>Полярус Олександр Васильович,<br/>вул. Наталії Ужвій, 86, кв. 81, м. Харків,<br/>61195 (UA),<br/>Поляков Євген Олександрович,<br/>вул. Тракторобудівників, 102-а, кв. 57, м.<br/>Харків, 61118 (UA),<br/>Бровко Яна Сергіївна,<br/>вул. Маршала Батицького, 20, кв. 218, м.<br/>Харків, 61038 (UA)</b> |
| (24) Дата, з якої є чинними<br>права на корисну<br>модель: | <b>25.09.2017</b>           |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| (46) Публікація відомостей<br>про видачу патенту:          | <b>25.09.2017, Бюл.№ 18</b> |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

## (54) СПОСІБ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОСТІ І ФОРМИ ДЕФОРМОВАНОЇ ПОВЕРХНІ МОСТОВИХ СПОРУД АБО ІНШИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ

### (57) Реферат:

Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів полягає в тому, що поверхню мостової споруди або іншого об'єкта опромінюють електромагнітною хвилею і по відбитій хвилі визначають прогини зазначеної поверхні при статичному та динамічному навантаженнях і при діленні динамічного на статичний прогин визначають коефіцієнт динамічності мостової споруди або інших споруд, причому з метою виключення випадків недостовірного вимірювання коефіцієнта динамічності неоднорідних споруд та визначення форми поверхні деформованих споруд на поверхні споруди попередньо встановлюють вторинні випромінювачі на однакових відстанях один від одного вздовж лінії, які створюють антенну решітку, діаграму спрямованості якої вимірюють після деформації поверхні і складають функціонал, що дорівнює інтегралу від квадрату різниці виміряної діаграми спрямованості та теоретичної діаграми спрямованості, в яку входять невідомі прогини кожного з випромінювачів, які визначають після мінімізації функціоналу методами глобального випадкового пошуку і при цьому визначають також профіль деформованої поверхні, що створений випромінювачами після їхнього переміщення, і коефіцієнт динамічності споруди для точок поверхні з максимальним статичним та динамічним прогинами.

UA 119364 U



Корисна модель належить до дистанційних методів вимірювання і може застосовуватися при експлуатації мостових споруд, великогабаритних будівель, об'єктів машинобудування тощо для визначення їх прогинів, коливань, динамічних спотворень форми.

Геометрія поверхні багатьох мостових споруд, а також технічних і будівельних об'єктів змінюється в залежності від різних зовнішніх і внутрішніх факторів. Наприклад, нижня частина поверхні мостових споруд під впливом навантажень коливається, і характеристики коливань містять важливу діагностичну інформацію. Витяг цієї інформації може здійснюватися за допомогою датчиків контактного типу [1. Полярус О. В. Методика підвищення точності вимірювань вібропереміщень машини на основі комплексування вимірювачів / О. В. Полярус, В. В. Барчан, Є. О. Поляков. - Х.: Технологія приборостроєння, 2012. - № 1. - С. 25-29; 2. Fr. Bulnes, Isaias Martinez, Antonio Mendoza, Manuel Landa. Design and Development of an Electronic Sensor to Detect and Measure Curvature of Spaces Using Curvature Energy / Fr. Bulnes, Is. Martinez, A. Mendoza, M. Landa // Journal of Sensor Technology. - 2012. - № 2. - P. 116-126.], які є частиною інформаційно-вимірювальної системи. Установка і технічне обслуговування такої системи коштує дуже дорого. У деяких ситуаціях умови роботи контактних датчиків не дозволяють їх використовувати. Отже, існує необхідність визначення прогину поверхні та змінювання форми мостових споруд, що повільно або швидко змінюються з плином часу.

Найчастіше змінювання форми поверхні об'єктів вимірюється за допомогою контактних (механічних) і безконтактних методів. Контактні методи є привабливими, якщо існує практична можливість їхньої реалізації, а зокрема на високих мостових спорудах така можливість значно ускладнена. Існує багато наукових статей, в яких описані неконтактні методи визначення кривизни та форми поверхні. Серед них особливо виділяються оптичні методи [1. Rosakis A. J. Full field measurements of curvature using coherent gradient sensing: application to thin film characterization / A. J. Rosakis, R. P. Singh, Y. Tsuji, E. Kolawa, N. R. Moore // Elsevier. Thin Solid Films. - 1998. - Vol. 325. - P. 42-54; 2. Lukianowicz Cz. Optical system for measurement of surface form and roughness / Cz Lukianowicz., T. Karpinski // Measurement Science Review. - 2001. - Vol. 1. - № 1. - P. 151-154; 3. Pienkos T. Determination of surface waviness using radius of curvature measurement with laser scanning technique / T. Pienkos, L. Gladyszewski, A. Proszynski, D. Chocyk, Gr. Gladyszewski // Optica Applicata. - 2005. - Vol. 35. - № 3. - P. 503-507.]. В роботі [Rosakis A. J. Full field measurements of curvature using coherent gradient sensing: application to thin film characterization / A. J. Rosakis, R. P. Singh, Y. Tsuji, E. Kolawa, N.R.Moore // Elsevier. Thin Solid Films. - 1998. - Vol. 325. - P. 42-54] кривизна тонких плівок визначається з використанням когерентного зондування і оцінювання градієнта поля. В [Lukianowicz Cz. Optical system for measurement of surface form and roughness / Cz Lukianowicz., T. Karpinski// Measurement Science Review. - 2001. - Vol. 1. - № 1. - P. 151-154] вимірювання шорсткості поверхні проводиться за допомогою оптичної системи.

В роботі [Pienkos T. Determination of surface waviness using radius of curvature measurement with laser scanning technique / T. Pienkos, L. Gladyszewski, A. Proszynski, D. Chocyk, Gr. Gladyszewski // Optica Applicata. - 2005. - Vol. 35. - № 3. - P. 503-507.] метод лазерного сканування використовується для визначення хвилястості поверхні. Поперечні фільтри на поверхневих акустичних хвилях представлені в роботі [Adams P. M. Curvature measurements of stressed surface-acoustic-wave filters using Bragg angle contour mapping / P. M. Adams // International Centre for Diffraction Data. - Advances in X-ray Analysis, 2003. - Vol. 46. - P. 86-91.] для вимірювання кривизни. В роботі [Parra-Denis E. Three dimensional complex shapes analysis from 3D local curvature measurements. Application to intermetallic particles in aluminium alloy 5XXX / E. Parra-Denis, N. Moulin, D. Jeulin // Image Anal Stereol. - 2007. - Vol. 26. - P. 157-164.] методом рентгенівської томографії оцінюються тривимірні зображення матеріалів. Деякі методи вимірювання кривизни ґрунтуються на аналізі зображень поверхні [1. Dragut L. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. Elsevier. Geomorphology / L. Dragut, Th. Blaschke. - 2006. - Vol. 81. - P. 330-344; 2. Merigot Q. Voronoi-based Curvature and Feature Estimation from Point Clouds / Q. Merigot, M. Ovsjanikov, L. Guibas // IEEE Transactions on Visualisation and Computer Graphics. - 2010. - № 8. - P. 1-14.]. Усі перераховані вище методи включають вимірювання мікрокривизни і мікронерівностей поверхні і в них не розглядаються методи оцінювання форми великих об'єктів, до яких належать мостові споруди. Застосування оптичних методів на великих відстанях є ускладненим. Таким чином, існує необхідність в розробці методу дистанційного вимірювання прогинів і форми поверхонь для великих об'єктів.

Найбільш близьким за суттю до заявленого є спосіб, що приведений в статті [Полярус О. В. Радіотехнічна система оцінки коефіцієнта динамічності мостової конструкції/ О. В. Полярус, В. В. Барчан. - Х.: Прикладная радиоэлектроника, 2011. - Т. 10. - № 3. - С. 368-371].

Суть способу, який вибрано за найближчий аналог, зводиться до зондування нижньої частини поверхні мостової споруди електромагнітними хвилями з наступним вимірюванням динамічного прогину поверхні фазовим методом. Цей прогин виникає завдяки динамічному навантаженню, яке створюється автомобілями, що рухаються через встановлену на мості перешкоду. Відношення динамічного прогину до статичного, тобто прогину за рахунок ваги того ж автомобіля, називається коефіцієнтом динамічності мостової споруди. Він є надзвичайно важливим параметром, який використовується при визначенні якості і надійності споруди.

Недолік найближчого аналога обумовлений тим, що прогин нижньої частини поверхні мостової споруди вимірюється в одній точці, тобто під перешкодою, що встановлюється на верхній частині поверхні мостової споруди. При цьому вважається, що результат вимірювання описує найбільший прогин. Слід зауважити, що внаслідок особливостей конструкції мостової споруди і неоднорідності матеріалу, що використовується для побудови мосту, найбільший прогин може спостерігатись в різних точках споруди. Це означає, що точність вимірювання коефіцієнта динамічності мостової споруди може істотно знизитись. Звідси випливає необхідність вимірювання прогинів практично одночасно в різних точках поверхні, що можна здійснити, наприклад, радаром з фазованою антенною решіткою зі скануючою діаграмою спрямованості, але цей підхід є надзвичайно дорогим.

Задачею корисної моделі є підвищення точності вимірювання коефіцієнта динамічності мостової споруди, а також дистанційне визначення форми поверхні великогабаритних об'єктів, що змінюється (в тому числі мостових споруд), в реальному масштабі часу.

Суть корисної моделі. Поставлена задача вирішується тим, що на нижній поверхні мостової споруди встановлюють систему  $N$  ідентичних металевих елементів або відбивачів електромагнітних хвиль заданого діапазону. Цю систему опромінюють електромагнітною хвилею, яка наводить в цих елементах струми високої частоти. Внаслідок цього кожен елемент перетворюється у випромінювач і всі вони в сукупності створюють антенну решітку (антену) (фіг. 1).

При прогинах поверхні мосту випромінювачі зміщуються і діаграма спрямованості (ДС) антенної решітки спотворюється. Спотворену діаграму спрямованості антени вимірюють в дальній зоні (точка  $P$ ) відомими методами і далі проводять оцінку зміщення випромінювачів, тобто вимірювання форми поверхні об'єкта на основі використання інформації про спотворення ДС.

Якщо поверхня об'єкта виготовлена з непровідного матеріалу, такого як бетон, основний внесок в вторинне випромінювання масиву забезпечують відбивачі. У разі металевої поверхні необхідно вибрати напрямок, в якому відбиття електромагнітних хвиль від металу буде найменшим. Таким чином, отримують антенну решітку з вторинними джерелами випромінювання (випромінювачами). Для демонстрації роботи методу припускають, що ДС випромінювачів є ідентичними та ізотропними (для практики достатньо, щоб вони мали широку ДС). Тоді ДС системи випромінювачів (більш конкретно, множник антенної решітки) описують відомою формулою [10]

$$\dot{f}_{lin}(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{j[\varphi_i + k l_i \cos \theta]}, \quad (1)$$

де  $A_i$  і  $\varphi_i$  - розподіл амплітуди і фази високочастотних струмів відповідно в розкритті антенної решітки,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - хвильове число,  $l_i = \sum_{n=0}^i d_n$  - координата випромінювача з номером  $i$ ,  $d_n$  відстань між випромінювачами з номерами  $n-1$  та  $n$  відповідно,  $\theta$  - кут спостереження,  $\lambda$  - довжина електромагнітної хвилі. Припускають, що всі відстані  $d_n$  рівні, тобто  $d_n \approx d$ .

Припустимо, що під дією навантажень спотворюється форма поверхні об'єкта. Розглянемо два види спотворення поверхні: гладкі і нерегулярні (фіг. 2.). На викривленій поверхні об'єкта кожен випромінювач зміщується на  $s_i$  і ДС всієї антенної решітки виражають формулою:

$$\dot{f}_{dis}(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{j[\varphi_i + k l_i \cos \theta - k s_i \sin \theta]}, \quad (2)$$

Діаграма спрямованості системи випромінювачів (2) може бути виміряна з деякою точністю. В формулу (2) входять  $N$  невідомих величин  $s_i$ , які повинні бути визначені. Оцінимо відхилення поверхні об'єкта, на якому розміщені випромінювачі, шляхом мінімізації функціоналу

$$J(s_0, s_1, \dots, s_{N-1}) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\dot{f}_m(\theta) - \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{j[\varphi_i + k s_i \cos \theta - k s_i \sin \theta]})^2 d\theta, \quad (3)$$

де  $\dot{f}_m(\theta)$  виміряна ДС спотвореної антенної решітки.

Мінімізацію функціоналу (3) здійснюють з допомогою методів глобального випадкового пошуку, зокрема генетичного алгоритму для різних співвідношень  $\frac{d}{\lambda}$ . Результати порівняння

5 відновлених відхилень гладкої поверхні (пунктирна лінія) в процесі мінімізації функціоналу (3) з заданою в процесі моделювання деформованою поверхнею (суцільна лінія), показані на фіг. 3.

Аналогічні результати для нерегулярно вигнутої поверхні показані на фіг. 4.

Вирішення задачі відновлення вигнутого профілю поверхні шляхом мінімізації функціоналу (3) супроводжується похибками відновлення, які показані на фіг. 5.

10 Результати були отримані шляхом усереднення похибок з використанням 100 математичних експериментів для кожного з них. Рішення, які забезпечують мінімізацію (3), але з практичної точки зору є неправильними ("фантомні рішення"), тут не приймалися до уваги. Причиною таких рішень є невизначеність, яка обумовлена можливістю отримати однакові результати для системи випромінювачів при різних формах криволінійних поверхонь. Діаграми спрямованості

15 антеною решітки формуються шляхом підсумовування поля випромінювачів у відповідності з їх фазою, але, наприклад, фази електромагнітної хвилі в точці спостереження однакові, коли випромінювач розташований на відстані  $s_i$  і на відстані  $s_i + \lambda$  від положення на вигнутій поверхні об'єкта. Поява "фантомних рішень" може бути виключена при використанні апріорної інформації про відхилення поверхні об'єкта. Імовірність "фантомних рішень" при відсутності

20 апріорної інформації може бути високою, що показано на фіг. 6, але тільки при відношеннях  $\frac{d}{\lambda} \geq 0,5$ .

Похибки відновленого профілю поверхні (фіг. 5) осереднюються для всіх випромінювачів. На кожному випромінювачі ці похибки різні (фіг. 7).

25 Фонове розсіювання електромагнітних хвиль з поверхні об'єкта моделювалося просторовим білим шумом. Похибки відновлення криволінійного профілю поверхні в цьому випадку збільшуються (фіг. 8), і в залежності від відношення сигнал-шум  $q$  можуть коливатись в межах від декількох відсотків при  $q \geq 10$  до десятків відсотків при  $q \leq 2 \dots 3$ .

Точність відновлення профілю поверхні також залежить від точності вимірювання діаграми спрямованості антени для випромінювачів, які розташовані на криволінійній поверхні, що

30 впливає з формули (3). Подібні похибки спостерігаються при інших типах спотворень діаграми спрямованості антени, які обумовлені її неточними вимірюваннями.

Спосіб, як і найближчий аналог, дозволяє визначати коефіцієнт динамічності мостової споруди і для однорідних споруд не має переваг перед аналогом, оскільки максимальний динамічний прогин спостерігається в точці, в якій діє динамічне навантаження і здійснюється

35 вимірювання. Якщо ж споруда за конструкцією або внаслідок особливих умов експлуатації стає неоднорідною, то максимальний прогин поверхні може спостерігатись в різних точках поверхні і найближчий аналог здійснює вимірювання не найбільшого прогину, що приводить до неправильної оцінки коефіцієнта динамічності. Для запропонованого способу така проблема не існує. Для визначення коефіцієнта динамічності мостової споруди, як зазначалось, необхідно

40 здійснювати оцінку прогинів мосту під дією статичного і окремо динамічного навантаження. Ніякої різниці між визначенням статичного і динамічного прогинів мостової споруди при використанні способу не існує.

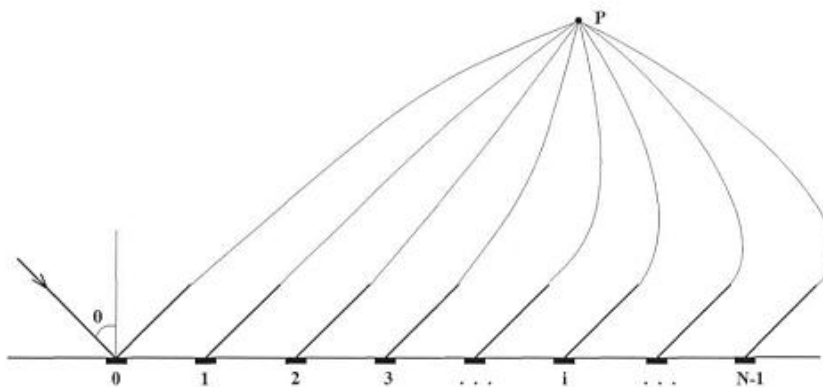
На відміну від найближчого аналога спосіб дає можливість відновити профіль спотвореної

45 поверхні мостової споруди або інших великогабаритних об'єктів при проведенні випробувань або контролю характеристик мостової споруди в процесі експлуатації. Це є особливо важливим, коли встановлення і експлуатація контактних датчиків на високих мостах є складною процедурою, що дорого коштує, а тривалість надійної роботи таких датчиків є невеликою. При визначенні коефіцієнта динамічності мостової споруди спосіб забезпечує отримання

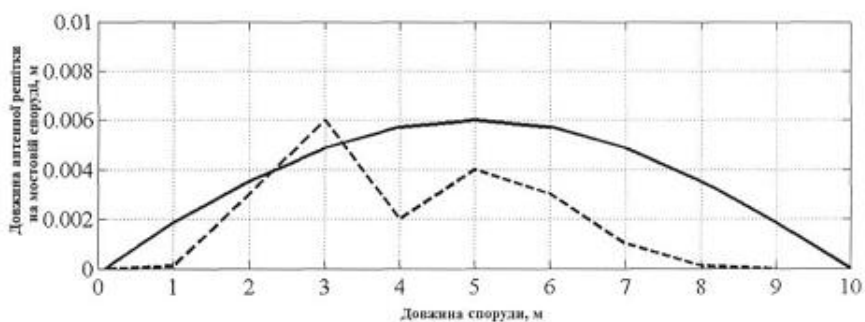
50 максимального прогину, який з великою ймовірністю з'явиться в місці розміщення створеної цілеспрямовано антенної решітки. Навіть, якщо результати запропонованого способу співпадають з результатами, які отримані найближчим аналогом, то визначення в майже реальному масштабі часу форми спотвореної поверхні мостової споруди останнім є взагалі неможливим. Спотворена форма служить діагностичною інформацією для визначення показників надійності мостової споруди.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів, який полягає в тому, що поверхню мостової споруди або іншого об'єкта опромінюють електромагнітною хвилею і по відбитій хвилі визначають прогини зазначеної поверхні при статичному та динамічному навантаженнях і при діленні динамічного на статичний прогин визначають коефіцієнт динамічності мостової споруди
- 10 або інших споруд, який **відрізняється** тим, що з метою виключення випадків недостовірного вимірювання коефіцієнта динамічності неоднорідних споруд та визначення форми поверхні деформованих споруд на поверхні споруди попередньо встановлюють вторинні випромінювачі на однакових відстанях один від одного вздовж лінії, які створюють антенну решітку, діаграму спрямованості якої вимірюють після деформації поверхні і складають функціонал, що дорівнює інтегралу від квадрату різниці виміряної діаграми спрямованості та теоретичної діаграми
- 15 спрямованості, в яку входять невідомі прогини кожного з випромінювачів, які визначають після мінімізації функціоналу методами глобального випадкового пошуку і при цьому визначають також профіль деформованої поверхні, що створений випромінювачами після їхнього переміщення, і коефіцієнт динамічності споруди для точок поверхні з максимальним статичним та динамічним прогинами.
- 20



Фиг. 1



Фиг. 2

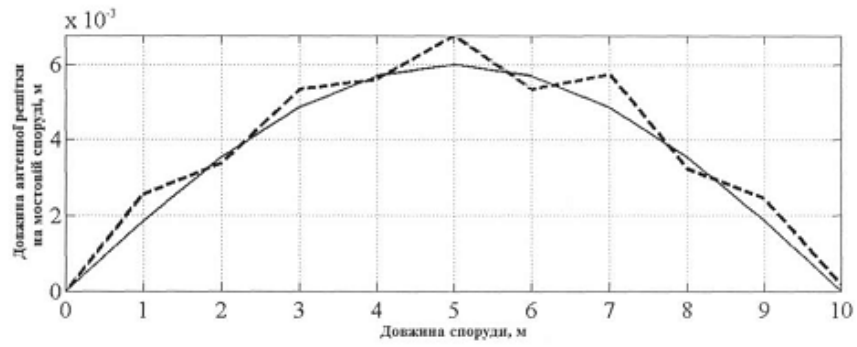


Fig. 3

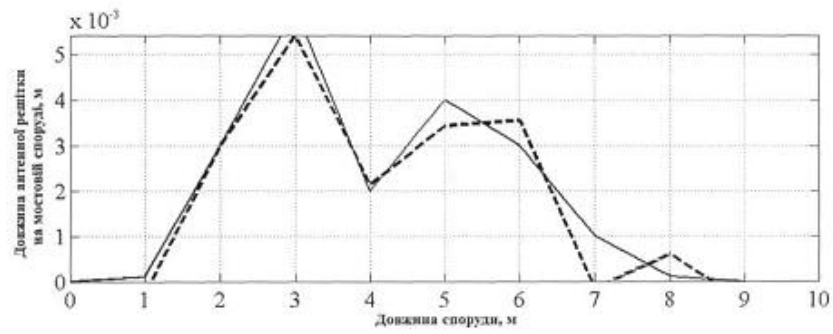


Fig. 4

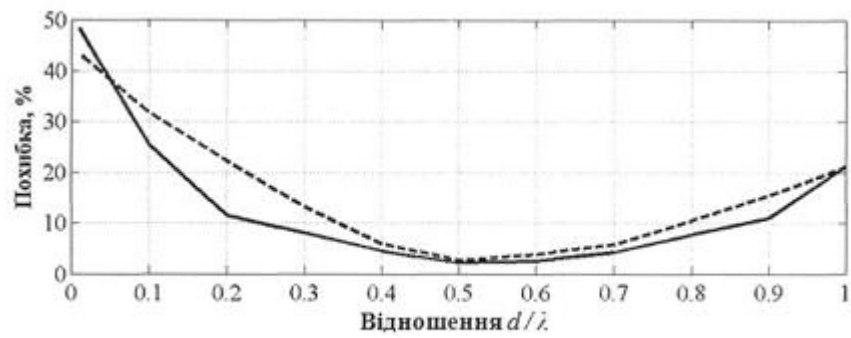


Fig. 5

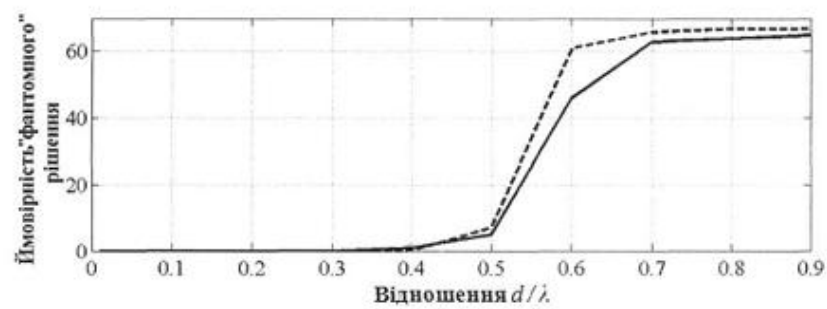


Fig. 6

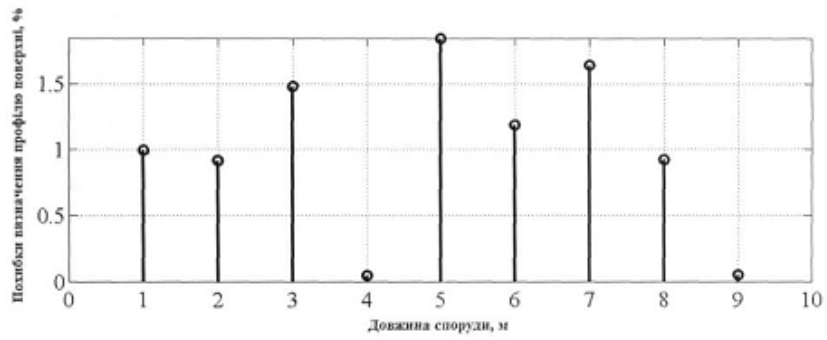


Fig. 7

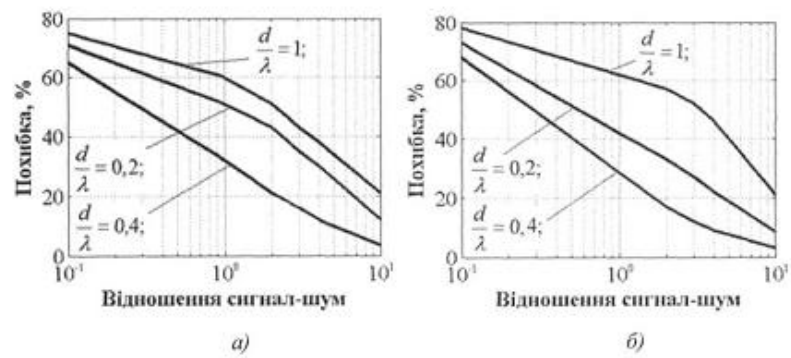


Fig. 8

Комп'ютерна верстка О. Гергіль

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601