

DOI [10.28925/2663-4023.2020.8.2233](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.8.2233)

УДК 534 +531.7+53.082.5+539.3

**Гулак Геннадій Миколайович**

к.т.н., доцент, завідувач лабораторії науково-дослідний відділ №235

Інститут проблем математичних машин і систем, Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-9131-9233

[h.hulak@ukr.net](mailto:h.hulak@ukr.net)**Отто Георгій Костянтинович**

аспірант

Інститут проблем математичних машин і систем, Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-2149-3516

[ottogk@gmail.com](mailto:ottogk@gmail.com)

## МЕТОДИ І МОДЕЛІ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ НАНОВІБРАЦІЙ

**Анотація.** Досліджуються методи і моделі систем дистанційного вимірювання і реєстрації вібрацій амплітудою менше за 10 нанометрів на основі когерентних джерел випромінювання. Аналізується математична модель ефекту Доплера. Визначаються базові характеристики перспективних систем вимірювання. Виявляються сучасні тенденції розвитку напрямку лазерних Допплерівських віброметрів та сфери їх застосування, а також обґрунтовується доцільність подальших досліджень.

Спостереження за вібраціями різноманітних об'єктів, їх реєстрація та аналіз в природничих та прикладних науках є одними з основних методів, на яких базується дослідження природних об'єктів та явищ, діагностика в медицині та техніці, розв'язання спеціальних завдань у військовій справі та правоохоронній діяльності, забезпечення інформаційної безпеки на об'єктах інформаційної діяльності, тощо. В багатьох випадках, внаслідок специфіки досліджуваних об'єктів безпосередній доступ до них неможливий або наближення до об'єкту вимірювання небезпечно для дослідника. Викладене обумовлює актуальність дослідження проблем та принципів побудови надійних інформаційних технологій дистанційного вимірювання вібрацій, забезпечення їх високої гарантоздатності, включаючи інформаційну безпеку, роздільну здатність та перешкодозахищеність. Особливий інтерес для практичного застосування становлять технології, які здатні розрізняти вібрації амплітудою менше за 10 нанометрів (далі - нановібрації).

Тож, для обрання суттєвих параметрів проектування вітчизняного виробу (лазерного віброметра) та пошук можливостей для збільшення чутливості таких виробів, статтю опрацьована та сформована сукупність якісних та технічних характеристик існуючих приладів дистанційного вимірювання нановібрацій та надані коментарі щодо вирішення проблеми чутливості до відбитого сигналу.

**Ключові слова:** лазерний віброметр; нановібрація; ефект Доплера; лазерні діоди зі зворотнім зв'язком.

### 1. ВСТУП

Спостереження за вібраціями різноманітних об'єктів, їх реєстрація та аналіз (інакше – вимірювання) в природничих та прикладних науках є одними з основних методів, на яких базується дослідження природних об'єктів та явищ, діагностика в медицині та техніці, розв'язання спеціальних завдань у військовій справі та правоохоронній діяльності, забезпечення інформаційної безпеки на об'єктах інформаційної діяльності, тощо.



**Постановка проблеми.** В багатьох випадках, внаслідок специфіки досліджуваних об'єктів, або безпосередній доступ до них неможливий, або наближення до об'єкту вимірювання небезпечно для дослідника. Зокрема, застосування засобів дистанційного вимірювання вібрацій може бути єдиним способом вивчення важкодоступних природних об'єктів, що спричинено геофізичними, атмосферними або іншими природничими чинниками. Наприклад, як це відбувається у випадку зондування атмосфери.

Прикладами важкодоступних об'єктів в техніці є великі будівельні споруди, такі як мости, висотні будівлі, опори електромереж, антени тощо, або об'єкти що перебувають на території радіоактивного ураження або знаходяться в полі дії екстремальних (високих або низьких) температур.

Дистанційне вимірювання вібрацій в біології може бути корисним у випадку вивчення частот дихання або серцебиття тварин, які швидко, далеко або високо рухаються.

Викладене обумовлює актуальність дослідження проблем та принципів побудови надійних інформаційних технологій дистанційного вимірювання вібрацій, забезпечення їх високої гарантоздатності [1], включаючи інформаційну безпеку, роздільну здатність та перешкодозахищеність.

Особливий інтерес для практичного застосування становлять технології, які здатні розрізняти вібрації амплітудою менше за 10 нанометрів (далі для кратності – нановібрації). Одним з найбільш ефективних напрямів побудови інформаційних технологій дистанційного вимірювання нановібрацій є застосування когерентних джерел випромінювання, які забезпечують достатньо високі характеристики у певних практичних застосуваннях [2], [3], [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значний внесок у дослідження проблем побудови систем і комплексів дистанційного вимірювання вібрацій, лазерної локації та зондування внесли вчені Устинов М.Д., Матвєєв Н.Д., Протопопов В.В., Хорощко В.О., Дж. Фиокко, І. Ренхорн, О. Штайнвал, Д. Леталік та інші.

У той же час, враховуючі потреби вітчизняного секторів реальної економіки, національної безпеки і оборони уявляється доцільним проведення подальших досліджень і розробок інформаційних технологій, систем і комплексів дистанційного вимірювання нановібрацій які забезпечують високий рівень гарантоздатності в умовах перешкод природного та техногенного характеру.

Зауважимо, що переважна більшість сучасних засобів дистанційного вимірювання вібрацій, зокрема, засобів дистанційної реєстрації мовних сигналів [4], побудована на відомому у фізиці ефекті Доплера – зміні частоти та, відповідно, довжини хвиль випромінювання, що сприймається приймачем, внаслідок їх взаємного руху [5].

В схемі таких приладів використовується когерентне джерело випромінювання (лазер), який у випадку реєстрації дифузних відбитих об'єктом вимірювання сигналів конструктивно поєднаний з приймачем відбитого сигналу.

В роботі [6] зроблено висновок, що прилади, які забезпечують реєстрацію дифузного відбитого проміння, що несуть інформацію про зміну довжини хвилі внаслідок інтерференції вібрацій досліджуваного об'єкта та лазерного випромінювання, мають ефективність на дистанції, яка не перевищує декількох десятків метрів. Далі буде показано, що сучасні засоби дистанційного вимірювання вібрацій, побудовані на ефекті Доплера, мають чутливість не гірше ніж 10 нанометрів на відстані більше ніж 100 метрів.

**Мета статті.** Формування сукупності характеристик існуючих приладів дистанційного вимірювання нановібрацій для обрання суттєвих параметрів проектування вітчизняного виробу. Пошук можливостей для збільшення чутливості до відбитого сигналу та доплерівської модуляції.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зупинимось на ефекті Доплера дещо докладніше, математична модель ефекту виглядає наступним чином. Позначимо через  $L(t)$  еквівалентну довжину шляху вздовж траєкторії  $l$ , в загальному випадку, коли змінюється в часі та просторі показник заломлення та координати початкової та кінцевої точок вказаної траєкторії, тоді згідно [5] маємо:

$$L(t) = \int_{l_1(t)}^{l_2(t)} n(l, t) dl, \quad (1)$$

де  $l_1(t), l_2(t)$  – відповідно координати 3-вимірного Евклідового простору точок випромінювання та влучення плями світла на поверхню об'єкту зондування;

$n(l, t)$  - показник заломлення на траєкторії  $l$  у момент часу  $t$ .

У виразі (1) вважається, що при зміні взаємного розташування джерела та приймача зондувальний промінь залишається на тій самій точці наведення.

Виходячи з (1) можливо стверджувати, що ефект Доплера полягає в нерівності частот хвиль випромінювання та прийому внаслідок зміни еквівалентну довжину шляху у процесі прийому.

У випадку, коли джерело та приймач випромінювання знаходяться в одній системі координат, а зондувальний об'єкт – в іншій, має місце двократний ефект Доплеру:

$$\omega'(t) = \omega \cdot \left( \left( 1 - \frac{v(t)}{c} \right) / \left( 1 + \frac{v(t)}{c} \right) \right) \quad (2)$$

Де  $\omega, \omega'(t)$  – відповідно частоти випромінюваного та відбитого світла;

$v(t), c$  – відповідно радіальна складова швидкості зондувального об'єкту відносно швидкості джерела випромінювання та швидкість світла.

Розкладемо знаменник (2) у ряд за ступенями  $v(t)$ :

$$\omega'(t) = \omega \cdot \left( 1 - \frac{v(t)}{c} \right) \cdot \left( 1 - \frac{v(t)}{c} + \frac{v^2(t)}{c^2} - \frac{v^3(t)}{c^3} + \dots \right) \quad (3)$$

Нехтуючи релятивістським ефектом, бо  $\left( \frac{v(t)}{c} \ll 1 \right)$ , отримаємо Доплерівську зміну частоти відбитого світла:

$$\omega'(t) - \omega = \omega_d(t) = 2 \cdot \omega \cdot v(t) / c \quad (4)$$

Диференціюємо (1) по  $dt$  та застосуємо формулу Ньютона – Лейбніца, після чого отримуємо:

$$v(t) = \frac{d(L(t))}{dt} = n(l_2(t), t) \cdot \frac{d(l_2(t))}{dt} - n(l_1(t), t) \cdot \frac{d(l_1(t))}{dt} \quad (5)$$

Вираз (5) відповідає ситуації, коли система координат спостерігача є зовнішня по відношенню до точки випромінювання  $l_1$  та об'єкту спостереження  $l_2$ . Це найбільш загальний випадок, який відповідає руху, як випромінювача так і об'єкту відносно зовнішнього середовища. При цьому похідні у (5) є не що інше, як швидкості  $v_1(t)$  та  $v_2(t)$ , відповідно випромінювача та об'єкту вимірювання.

Найбільш просунутими комплексами дистанційного вимірювання вібрацій в акустичному діапазоні, з чутливістю одиниць нанометрів (на частоті 1000 Гц) є лазерні

мікрофони, які працюють по гетеродинній схемі. Роль змішувача виконує інтерферометр.

У сучасних приладах лазерний промінь поділяється, основна потужність променю зондує об'єкт, невелика (гетеродинна) частина потужності зсувається на радіочастоту, це декілька десятків мегагерц, та передається на інтерферометр.

Зондувальний промінь фіксує рухи поверхні об'єкту щодо змін оптичної довжини шляху відбитого променя. Гетеродинний спосіб прийому [7] вимагає вкрай стабільного лазера і точної оптики. Найдрібніші зміни в дистанції, яку проходить промінь після того, як він відіб'ється від вібруючого об'єкта, фіксуються інтерференційно. Інтерферометр конвертує ці відхилення в зміни інтенсивності випромінювання, які в подальшому перетворюються в електричні сигнали і можуть фіксуватися, переважно в цифровій формі, на відповідних носіях.

### 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Далі зробимо порівняльний огляд найбільш просунутих зразків, які представлені на світовому ринку лідерами в виробництві комплексів лазерного дистанційного вимірювання вібрацій німецькою фірмою Polytec [8], британською QinetiQ [9], а також італійський прилад Optomet [10]. Типова схема лазерного доплерівського віброметра з напівпровідниковим джерелом наведена на рис. 1.

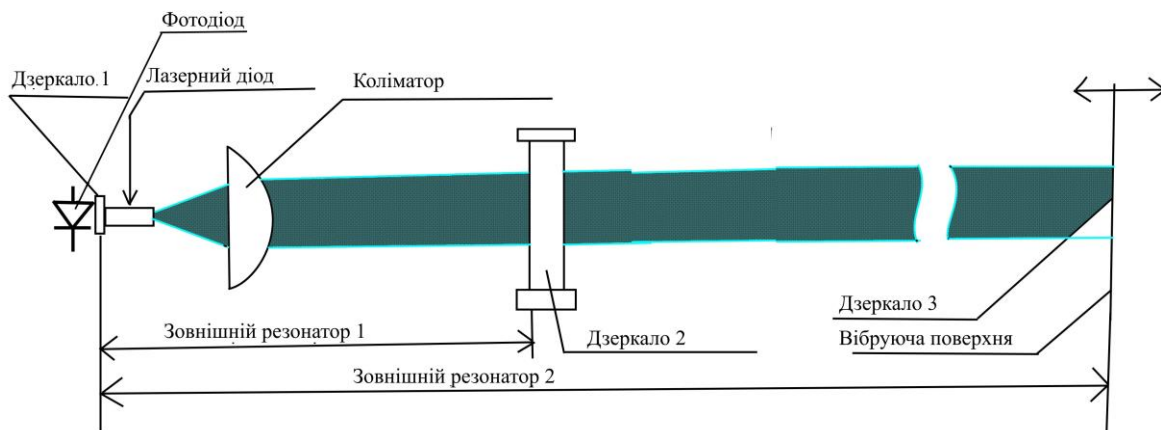


Рис. 1. Типова схема лазерного доплерівського віброметра з напівпровідниковим джерелом

Виріб фірми Polytec (рис. 2) спочатку був створений як лазерний мікрофон. Згодом на його базі був побудований комплекс дистанційного вимірювання нановібрацій.



Рис. 2. Виріб Polytec

Деякі характеристики вказаних приладів наведені у таблицях 1-3.

Таблиця 1

**Функціональні характеристики комплексів**

Параметр	Виріб		
	Polytec	QinetiQ	Optomet
Чутливість	0,2мкм/сек/ $\sqrt{\text{Гц}}$	Не відомо	1,7нм/сек/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Кількість вихідних каналів, шт	1	1	1
Кількість вхідних каналів, шт	1	2	1
Максимальна відстань роботи, м	300	150	300
Мінімальна відстань роботи, м	5	5	1

Як видно з таблиці 1 та судячи з практично однакових характеристик чутливості, лазерні пристрої, створені за даною оптичною схемою знаходяться недалеко від максимуму чутливості в одному окремо взятому лазерному каналі, отже, перспективним, для збільшення точності вимірювань даних сенсорів, бачиться збільшення каналів, що й почато реалізовуватись у виробках фірми QinetiQ (рис. 3).

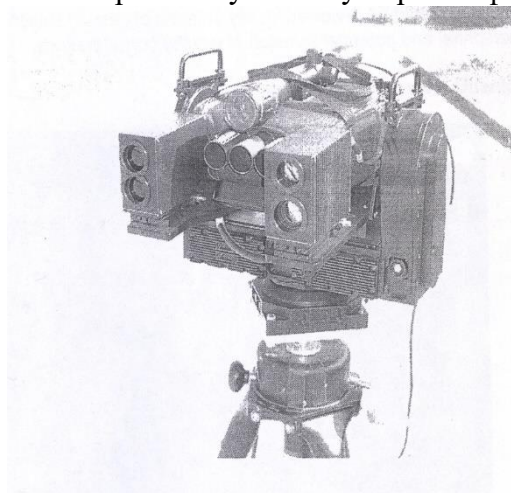


Рис. 3. Виріб QinetiQ

Параметри чутливості фірма QinetQ не приводить, отже за наявними даними, найбільш чутливим є віброметр фірми Optomet (рис. 4). Виробник останнього приладу зазначає, що така чутливість досягається при вимірюванні вібрацій дзеркальної поверхні на мінімальній відстані, що практично неможливо забезпечити при віддаленій роботі сенсорів. При використанні аналогічного способу вимірювання чутливості інші віброметри покажуть результати не гірші.

Виріб фірми QinetiQ має тільки один зондувальний канал, проте має два канали прийому вхідного сигналу. Це значно покращує його параметри та додає можливості боротьби з атмосферними перешкодами на трасі вимірювання.

При використанні двох зондувальних та двох прийомних каналів досягається можливість боротьби як із атмосферними перешкодами на трасі вимірювання, так і з власними шумами приладу.



Рис. 4. Виріб Optomet

Максимальною є заявлена відстань роботи у виробів Polytec та Optomet, проте робота на значній відстані потребує високу точність наведення на віброуючий об'єкт, що практично не можливо виконувати без комп'ютерного керування штативом, бо зона наведення може бути дуже невеликою. У той же час, ці фірми не згадують про використання моторизованого штативу та не наводять параметри точності наведення, що викликає сумнів в практичній досяжності наведених у таблиці максимальних відстаней.

У багатьох випадках практичного застосування суттєве значення мають енергетичні характеристики обладнання, оскільки це з одного боку впливає на тривалість його роботи від автономних джерел живлення, з іншого – на безпеку застосування, оскільки потужний лазерний промінь може нести небезпеку для оточуючих.

Таблиця 2

**Енергетичні характеристики**

Параметр	Виріб		
	Polytec	QinetiQ	Optomet
Живлення	100В...240В +/-10%, 50/60 Гц	100В...240В 47- 63Гц	100В...240В +/-10%, 50/60 Гц
Потужність, Вт	Макс 50	Макс 50	Макс 50
Живлення від зовнішнього акумулятора	можливо	можливо	можливо
Тип лазера	Ербієве волокно	Не відомо	Не відомо
Клас лазера	1	3В	1
Потужність лазера, мВт	<10	<100	<10

Як видно з таблиці 2, параметри живлення всіх виробів однакові. Також всі вони мають можливість живлення за допомогою акумулятора. Лазер класу 3В у виробі фірми QinetiQ є небезпечним для зору людини, що зумовлює додаткові заходи безпеки при його застосуванні, у виробках Optomet та Polytec використовується безпечний лазер класу 1.

Оскільки масогабаритні характеристики суттєво впливають на мобільність застосування приладів, то таблиці 3 наведені основна інформація про габарити та масу виробів.

Таблиця 3

**Масогабаритні характеристики**

Параметр	Виріб		
	Polytec	QinetiQ	Optomet
Розмір основного блока, мм	460/600x165x100	100x200x205	380x180x148
Маса, кг	7	9	8+ маса лінз
Розміри додаткових блоків	225x360x135x9 19 дюймів (блок фільтрації)	500x300x200x14	
Штатив із шаговими двигунами	Не відомо	Є	Немає

З таблиці.3 можна з'ясувати, що маса оптичних блоків не суттєво відрізняється в межах 7..10 кг.

Що стосується великої довжини віброметра Polytec зауважимо, що це зумовлено фокусною відстанню лінзи 300 мм, що дозволяє працювати на великій відстані.

Компактність виробу QinetiQ свідчить про можливе використання волоконного лазера. Виходячи з опису та розміру виробів Optomet та Polytec, їх оптичні схеми, скоріш за все, однакові.

Також слід зазначити, що загальна маса блоків віброметрів досить значна (близько 30 кілограм), що робить дані вироби не надто мобільними.

Дані, які наведені у таблиці.4 дозволяють дійти висновку, що умови застосування та зберігання усіх виробів майже однакові за винятком можливості зберігати виріб фірми Polytec при температурі -10..+65, що свідчить про високу захищеність та стабільність оптичної схеми віброметра.

Таблиця 4

**Кліматичні характеристики**

Параметр	Виріб		
	Polytec	QinetiQ	Optomet
Робоча температура, °C	+5...+40	+5...+35	+5...+40
Температура зберігання, °C	-10...+65	+5...+35	Не відомо

Із аналізу зовнішнього вигляду та непрямих відомостей про британський пристрій можна дійти висновку, що він має один зондувальний канал та два приймальних, що дещо покращує здатність протидіяти атмосферним перешкодам, але не сприяє можливості відокремлення вібрацій різних джерел походження.

**4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Отже, на підставі даних, що наведені у таблицях 1-4, можна зробити висновок про більш перспективні характеристики виробу QinetiQ порівняно з виробами Polytec і Optomet, а та можливість їх обрання за відправну точку для проектування вітчизняного виробу.

В наведені порівняльні таблиці не увійшли деякі якісні показники, а саме:

- швидкість  $v$  зменшення потужності прийнятого корисного сигналу від збільшення відстані між сенсором та об'єктом;
- здатність відокремлювати вібрації, які належать джерелам різного походження, але мають частково чи повністю накладений спектр частот;
- ступінь захищеності від впливу атмосферних перешкод;
- рівень захищеності приладу від сторонніх акустичних впливів та механічних вібрацій.

Вказані показники мають особливо велике значення коли досліджується тонка структура коливань, викликаних найбільш насиченими інформацією сигналами, такими як людська мова, серцевими, мозковими та іншими біологічними ритмами.

Дані щодо деяких з цих характеристик наведені у таблиці 5, як додаткові можливості.

Таблиця 5

**Порівняння додаткових можливостей**

Додаткова можливість	Виріб		
	Polytec	QinetiQ	Optomet
Здатність протидіяти атмосферним перешкодам	Не має	Є	Не має
Можливість відокремлення вібрацій різних джерел походження	Не має	Не має	Не має
Можливість нівелювання впливу власних шумів сенсора	Не має	Є	Не має
Швидкість зменшення потужності прийнятого корисного сигналу від збільшення відстані $l$ між сенсором та об'єктом	$1/l^2$	$1/l^2$	$1/l^2$





Аналізуючи наведені у таблиці 5, якісні показники, можливо підкреслити наступне.

Захист приладу від сторонніх впливів є здебільшого технічною проблемою. Звісно, що починаючи з деякого, достатньо високого рівня захищеності, проблема перестає бути лише технічною та потребує рішень наукового рівня.

Відносно «здатності відокремлювати вібрації різного походження з накладеним спектром» та можливості «захисту від атмосферних перешкод» є один головний напрямок поліпшення – це забезпечення зростання кількості інформації від об'єкту, як в окремому каналі, шляхом підвищення відношення «сигнал/шум», так і шляхом нарощування кількості каналів. Збільшення кількості незалежних каналів надходження інформації від об'єкту дозволяє застосовувати такий потужний засіб обробки сигналу, як адаптивна фільтрація, яка здатна докорінним чином позбавлятися перешкод, що навіть значно перевищують рівень корисного сигналу.

Щодо «швидкості зменшення потужності прийнятого сигналу від відстані ...». Відомо [11], що всі наявні технології радіо - та лазерної локації обмежені, що найменше, зворотно квадратичним законом залежності потужності сигналу, відбитого об'єктом локації, від відстані між об'єктом та сенсором.

Це є засаднича формула радіо - та лазерної локації. Оскільки лазерними доплерівськими локаторами є всі відомі на цей час лазерні віброметри, то згадані прилади відомих виробників не є виключенням і також підкорюються закону зворотного квадрату.

Математичні моделі, які на цей час використовуються в теорії інтерферометрії зворотного зв'язку - LFI (Laser Feedback Interferometry) стверджують, що і в цьому випадку працює закон зворотного квадрату. Саме цей показник визначає чутливість сенсору.

## 5. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отже бачимо, що головною проблемою лазерних доплерівських сенсорів є збільшення чутливості:

- чутливості до відбитого сигналу;
- чутливості доплерівської модуляції.

Збільшення чутливості до корисних сигналів обертається підвищеною чутливістю до різноманітних перешкод, що створює нову проблему – проблему боротьби з перешкодами.

Вирішують проблему чутливості до відбитого сигналу одночасно кількома шляхами:

- зменшуючи рівень власного шуму;
- збільшуючи потужність зондувального променя;
  - а. збільшуючи площу приймальної оптики.

Потужність зондувального променя вже на межі, її не можна збільшувати, бо це небезпечно для людини. Площу приймальної оптики теж не можна збільшувати, бо це призводить до появи в досліджуваному сигналі декількох спектрів, що при складанні в приймачі можуть опинитися в протифазі, як наслідок отримаємо завмирання вихідного сигналу. Рівень власного шуму приладу це традиційна для всіх приймальних пристроїв проблема, тому одразу ж доводиться до можливого мінімуму перш за все і в силу цього є вичерпаною.



Чутливість до доплерівської модуляції, коли вичерпані всі традиційні шляхи, теоретично можна підвищити, зменшуючи довжину хвилі зондувального променя. Але це теж має свою зворотну сторону. Для короткохвильової частини спектру атмосфера менш прозора та створює більші перешкоди. Тому в атмосфері ультрафіолетове випромінювання не використовують, як зондувальне на далеких відстанях.

У той же час, є підстави вважати, що залежність падіння потужності поверненого об'єктом сигналу від відстані фактично є набагато слабшою ніж квадратична. Цей факт викликає необхідність перегляду існуючої моделі LFI та її уточнення, а також розробки теорії та проведення додаткових експериментів. Саме в цьому полягає доцільність подальших досліджень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А.В. Федухин, Б.Г. Мудла, «Гарантоспособность компьютерных систем – мода или объективная необходимость», *Математичні машини і системи*, № 4, с.179-188, 2014
- [2] Н.Д. Устинов, В.В. Протопопов, *Инфракрасные лазерные локационные системы*, Ред. Москва, СССР: Воениздат, 1987, с. 175, ил.
- [3] В.В. Смелянов, Г.К. Отто, К.В. Отто, В.І. Розумнюк, Л.К. Яровой, «Лазерний вібрметр із зворотнім зв'язком в напівпровідниковому лазері», *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*, Випуск 1, с. 77-82, 2012
- [4] С.В. Ленков, Д.А. Перегудов, В.А. Хорошко, «Методы и средства защиты информации», *Методы и средства защиты информации*, том 1. Несанкционированное получение информации, Ред. Киев, Украина: Арий, 2008, с. 484
- [5] В.Н. Кологривов, *Эффект Доплера в классической физике: учебно-методическое пособие по курсу Общая физика*, Ред. Москва, Россия: МФТИ, 2012, с. 32
- [6] А.А. Хорев, «Средства акустической разведки: направленные микрофоны и лазерные акустические системы разведки», *Спецтехника и связь*, №3, с.34-43, 2008
- [7] В.В. Протопопов, Н.Д. Устинов, *Лазерное гетеродинамирование*, Ред. Москва, СССР: Наука, 1985, с. 286
- [8] Polytec. RSV-150 Remote Sensing Vibrometer. Remote Detection of Vibrations from Large and Distant Structures. Product Brochure. Доступно: [https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM\\_PB\\_RSV-150\\_E\\_42486.pdf](https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_PB_RSV-150_E_42486.pdf)
- [9] QinetiQ. QinetiQ commercial in confidence. Firestorm trials and demonstration plan. Product Brochure.
- [10] Optomet. Laser Vibrometry. Digital Laser Doppler Vibrometer. Nova-Series. Доступно: [https://www.optomet.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/Data\\_Sheet\\_Nova\\_Series\\_Vibrometer.pdf](https://www.optomet.com/fileadmin/user_upload/pdf/Data_Sheet_Nova_Series_Vibrometer.pdf)
- [11] *Справочник по радиолокации*. М. Сколник, Ред. Москва, СССР: Сов. радио , 1978, т 4, с. 295.

**Hennadii.M. Hulak**

Ph.D Technical Sciences, Head of Laboratory Research Department №235  
Institute of Mathematical Machines and Systems Problems, Kyiv, Ukraine  
ORCID: 0000-0001-9131-9233  
*h.hulak@ukr.net*

**George K. Otto**

Postgraduate  
Institute of Mathematical Machines and Systems Problems, Kyiv, Ukraine  
ORCID: 0000-0002-2149-3516  
*ottogk@gmail.com*

## METHODS AND MODELS OF CONSTRUCTION OF INFORMATION TECHNOLOGIES OF REMOTE MEASUREMENT OF NANOBRATION

**Abstract.** Methods and models of systems for remote measurement and recording of vibrations with amplitude less than 10 nanometers are investigated on the basis of coherent laser sources. The mathematical model of the Doppler effect is analyzed. The basic characteristics of perspective measurement systems are determined. The modern tendencies of development of the direction of laser Doppler vibrometers and the scope of their application are revealed, as well as the expediency of further researches is substantiated.

Observations of vibrations of various objects, their registration and analysis in the natural and applied sciences are one of the main methods on which the study of natural objects and phenomena, diagnostics in medicine and technology, the solution of special problems in military and law enforcement activities, ensuring information security at the objects of information activity, etc. In many cases, due to the specificity of the investigated objects, direct access to them is not possible or approaching the measurement object is unsafe for the researcher. The above determines the relevance of research into the problems and principles of building reliable information technologies for remote measurement of vibration, ensuring their high guaranteeability, including information security, resolution. Of particular interest in practical applications are technologies capable of distinguishing vibrations with an amplitude of less than 10 nanometers (hereinafter referred to as nanovibrations).

Therefore, to select the essential parameters of designing a domestic product (laser vibrometer) and look for opportunities to increase the sensitivity of such products, the article elaborated and formed a set of qualitative and technical characteristics of existing devices for remote measurement of nanovibrations and provided comments on the solution of the sensitivity problem.

**Keywords:** laser vibrometry; vibrometers; nanovibration; Doppler effect; self-mixing.

## REFERENCES

- [1] A.V. Fedukhin, B.G. Mudla, «Guaranteeability of computer systems – fashion or objective necessity», *Mathematical Machines and Systems*, № 4, p.179-188, 2014
- [2] N.D. Ustinov, V.V. Protopopov, *Infrared Laser Location Systems*, Ed. Moscow, USSR: Voenizdat, 1987, p. 175, il.
- [3] V.V. Yemelyanov, G.K. Otto, K.V. Otto, V.I. Rozumniuk, L.K. Yarovoy, «Laser Doppler saelf-mixing vibrometer», *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Physycs & Mathematics*, Issue 1, p. 77-82, 2012
- [4] S.V. Lenkov, D.A. Peregudov, V.A. Khoroshko, «Methods and Means of Protecting Information», *Methods and Means of Protecting Information*, Volume 1. Unauthorized Receipt of Information, Ed. Kyiv, Ukraine: Arius, 2008, p. 484
- [5] V.N. Kologrivov, *The Doppler Effect in Classical Physics: A Coursebook for General Physics*, Ed. Moscow, Russia: MIPT, 2012, p. 32
- [6] A.A. Horev, «Acoustic Intelligence Means: Directed Microphones and Laser Acoustic Intelligence Systems», *Special Equipment and Communication*, №3, p.34-43, 2008
- [7] V.V. Protopopov, N.D. Ustinov, *Laser Heterodynamization*, Ed. Moscow, USSR: Science, 1985, p. 286



- [8] Polytec. RSV-150 Remote Sensing Vibrometer. Remote Detection of Vibrations from Large and Distant Structures. Product Brochure. Available: [https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM\\_PB\\_RSV-150\\_E\\_42486.pdf](https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_PB_RSV-150_E_42486.pdf)
- [9] QinetiQ. QinetiQ commercial in confidence. Firestorm trials and demonstration plan. Product Brochure.
- [10] Optomet. Laser Vibrometry. Digital Laser Doppler Vibrometer. Nova-Series. Available: [https://www.optomet.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/Data\\_Sheet\\_Nova\\_Series\\_Vibrometer.pdf](https://www.optomet.com/fileadmin/user_upload/pdf/Data_Sheet_Nova_Series_Vibrometer.pdf)
- [11] *Handbook for radiolocation*. M. Skolnik, Ed. Moscow, USSR: Sov. Radio, 1978, vol. 4, p. 295

