

## АНОТАЦІЯ

*Дивнич В.М.* Удосконалення лазерного доплерівського вимірювача швидкості аеро та гідродинамічних потоків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового доктора філософії з галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» - Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі розглянуті питання удосконалення лазерного доплерівського вимірювача швидкості (ЛДВШ) аеро та гідродинамічних потоків.

ЛДВШ є наукоємними оптико-електронними приладами які використовуються для вимірювання швидкості дозвукових та надзвукових аеродинамічних потоків, при розробці нових типів літальних апаратів та елементів їхньої конструкції, при дослідженнях характеристик газових турбін, ударних хвиль, характеру течії рідини у пристінній області та використовуються в інших сферах науки та техніки.

Основною перевагою таких приладів є локальність зони проведення вимірювання та відсутність їх впливу на структуру потоку (безконтактність).

Не зважаючи на те, що багатьма авторами було досліджені різні аспекти лазерної доплерівської анемометрії, задача вимірювання швидкості аеро або гідродинамічного потоку із заданою похибкою до кінця не вирішена.

Для зменшення методичної похибки вимірювання застосовують генератори мікрочастинок. Така похибка визивається відставанням мікрочастинок від потоку.

Але на виході фотоприймача можуть формуватись сигнали з низькою глибиною модуляцією та відношенням сигнал/шум. Вимірювання частоти таких сигналів збільшує похибку вимірювання швидкості потоку.

В дисертації проведені наукові дослідження, які направлені на зменшення похибки вимірювання.

Проведене оцінювання похибок вимірювання швидкості потоку. Вони поділяються на похибки оптичної частини приладу та похибки вимірювача частоти доплерівського сигналу.

Методична похибка виникає за рахунок відставання мікрочастинок від потоку. Інструментальна похибка виникає коли в зоні вимірювання одночасно знаходиться більше ніж одна мікрочастинка. Вона обумовлена різним часом входження мікрочастинок в зону вимірювання. Для зменшення впливу цих похибок на точність вимірювання потрібно одночасно з лазерним доплерівським вимірювачем швидкості використовувати генератор мікрочастинок.

Інструментальна похибка оптичного датчика визначається також впливом умов проведення вимірювання на розповсюдження лазерних променів.

Похибка вимірювання частоти доплерівського сигналу залежить від апаратури, що використовується.

Похибку вимірювання частоти доплерівського сигналу можна зменшити шляхом підвищення глибини модуляції та відношення сигнал/шум.

В дисертації розроблена математична модель формування сигналу у оптико-електронному тракті лазерного доплерівського вимірювача швидкості диференціального типу. Модель побудована на основі теорії розсіяння Мі. Модель сигналу створена для двох випадків:

- розсіяне випромінювання приймається в апертурі, в межах якої можна вважати, що його інтенсивність та стан поляризації не змінюються;
- розсіяне випромінювання приймається в межах певного апертурного кута.

Модель сигналу враховує вплив узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації. Окрім цих

параметрів розсіяного випромінювання на глибину модуляції та відношення сигнал/шум впливає ступінь узгодження «елементарних» доплерівських сигналів за фазою.

Глибина модуляції доплерівського сигналу визначається добутком коефіцієнтів амплітудного, поляризаційного та фазового узгодження. Ці коефіцієнти можуть змінюватись в межах від 0 до 1.

Дослідження, що проведені в роботі показали наступне. Під час розсіяння на сферичних мікрочастинках, фаза доплерівського сигналу, який утворюється під час прийому випромінювання у вигляді вузького кільця, може приймати тільки два значення 0 або  $180^{\circ}$ . Стрибок фази сигналу відбувається в тих кутових апертурах, де коефіцієнт фазового узгодження дорівнює 0. Зниження глибини модуляції за рахунок неузгодженості фаз «елементарних» сигналів відбувається за двох причин:

- за рахунок неузгодження фаз сигналів під час прийому випромінювання в межах апертури у вигляді вузького кільця;
- за рахунок того, що сигнали, які утворюються в межах кільцевих апертур можуть знаходитись у протифазі.

Зменшити ступінь неузгодженості сигналу за фазою можна за рахунок використання фільтру, який потрібно встановлювати замість апертурної діафрагми. Це дозволить підвищити глибину модуляції, відношення сигнал/шум та зменшити похибку вимірювання швидкості.

Розроблена конструкція та виготовлена оптична частина експериментального лазерного доплерівського вимірювача швидкості на основі потужного діоду з низькою ступеню когерентності випромінювання. Для перетворення модульованого за частотою випромінювання розроблений перетворювач. В перетворювачі використовується лавинний фотодіод та надчутливий широкосмуговий підсилювач фотоструму.

Проведено експериментальне дослідження впливу інтенсивності розсіяного випромінювання на глибину модуляції доплерівського сигналу. Експериментально підтверджений метод збільшення глибини модуляції

доплерівського сигналу за рахунок узгодження інтенсивності розсіяного випромінювання.

В дисертаційній роботі отримані наступні наукові результати:

- розроблений метод зменшення похибки лазерного доплерівського вимірювача швидкості шляхом просторової фільтрації розсіяного випромінювання, яке має низьку ступінь узгодження за інтенсивністю;

- розроблений метод зменшення похибки лазерного доплерівського вимірювача швидкості шляхом просторової фільтрації розсіяного випромінювання, яке має низький ступінь узгодження за поляризацією;

- розроблений метод зменшення похибки лазерного доплерівського вимірювача швидкості шляхом просторової фільтрації розсіяного випромінювання, прийом якого приводить до формування на виході фотоприймача сигналів, що знаходяться у протифазі;

- розроблена структура лазерного доплерівського вимірювача швидкості, в якому відбувається компенсація низькочастотної складової доплерівського сигналу.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в наступному.

- розроблений метод за допомогою якого можна визначити форму фільтра. Використання такого фільтра в лазерному доплерівському вимірювачі швидкості, в якому розсіяне випромінювання приймається вперед підвищує його узгодження за інтенсивністю, глибину модуляції, відношення сигнал/шум та зменшує похибку вимірювання;

- розроблений метод за допомогою якого можна визначити форму фільтра. Використання такого фільтра в лазерному доплерівському вимірювачі швидкості, в якому розсіяне випромінювання приймається назад підвищує його узгодження за поляризацією, глибину модуляції, відношення сигнал/шум та зменшує похибку вимірювання;

- розроблений метод за допомогою якого можна визначити форму фільтра. Використання такого фільтра дозволяє підвищити ступінь

узгодження «елементарних» доплерівських сигналів за фазою. Глибину модуляції, відношення сигнал/шум та зменшити похибку вимірювання швидкості потоку;

- розроблені структури лазерних доплерівських вимірювачів призначених для вимірювання двох та трьох компонент вектора швидкості відповідно до специфіки проведення вимірювань;

- розроблена структура лазерного вимірювача, який призначений для застосування в таких технологічних процесах де одночасно потрібно вимірювати швидкість та довжину, наприклад при виготовленні електричного кабелю, під час прокату металу та в інших технологічних процесах;

- розроблена структура лазерного лічильника аерозолів, який призначений для визначення розподілу аерозолів за розміром під час контролю якості повітря у виробничих приміщеннях електронної та фармацевтичної промисловості;

- розроблена структура лазерного доплерівського вимірювача двох компонент вектора швидкості вібрації призначеного для застосування під час стендових досліджень авіадвигунів, енергетичного обладнання та іншої техніки;

- розроблена структура лазерного вимірювача двох компонент вектора істинної повітряної швидкості безпілотного літального апарату.

**Ключові слова:** вимірювання, швидкість, аеро та гідродинамічний, потік, лазер, доплерівський, похибка, глибина модуляції, сигнал/шум, інтенсивність, поляризація, фаза, розсіяння.

## ABSTRACT

*Dyvnych V. M.* “Improvement of Laser Doppler Velocimeter for Aero/Hydrodynamic Flows”. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a PhD degree in specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies". – National Aviation University, MES, Kyiv, 2021.

The dissertation deals with the improvement of the laser Doppler velocimeter (LDV) for Aero/Hydrodynamic Flows. LDV are high-tech optoelectronic devices. They are used to measure the speed of subsonic and supersonic flows.

These measurements are carried out in the development of new types of aircraft, in studies of the characteristics of gas turbines, shock waves, and in other fields of science and technology.

The main advantages of such devices are the small size of the measurement zone and the lack of influence on the flow. Many scientists have studied various issues of laser Doppler velocimetry.

However, the task of measuring the flow velocity of a gas or liquid with a given accuracy is not completely solved. microparticle generators are used to reduce the measurement error.

This error is caused by the lag of the microparticles from the flow. However, at the output of the LDV photodetector, Doppler signals with a low modulation depth and SNR can be formed.

Frequency deviation of such signals increases the error in measured flow rate.

In the dissertation, scientific research was conducted that aimed at reducing the measurement error.

The error in measuring the flow velocity was estimated. Errors are divided between optical part of the device and Doppler frequency meter.

Error arises due to the lag of microparticles from the flow. Instrumental error occurs when several particles enter the measuring volume.

This error is caused by difference in timing of particle entrance to measuring volume. To reduce the effect of these errors, it is necessary to use a microparticle generator simultaneously with the LDV. The instrumental error of the optical sensor also arises due to the influence of the measurement conditions on the propagation of laser beams.

The error in measuring the frequency of the Doppler signal depends on the equipment that is used. To decrease frequency measurement error is necessary to increase the depth of modulation and SNR.

A mathematical model of LDV signal in the optoelectronic path has been developed. The model is based on the theory of Mie scattering.

The model is designed for two cases: scattered radiation is received in the aperture, within which it can be assumed that its intensity and polarization state does not change; scattered radiation is received within a certain aperture.

The signal model takes into account the effect of matching the scattered radiation on the intensity and state of polarization.

In addition to these parameters of scattered radiation, the degree of phase matching of the "elementary" Doppler signals is also affects the modulation depth and the signal-to-noise ratio.

The depth of modulation of the Doppler signal is determined by the product of the coefficients of the amplitude, polarization and phase matching. These coefficients can vary from 0 to 1.

The studies that were carried out in the work showed the following.

When scattering on spherical microparticles in the phase of the Doppler signal, when receiving radiation in the aperture in the form of narrow rings, it can take only two values of  $0^\circ$  or  $180^\circ$ .

The signal phase jump occurs on those angular apertures, where the phase matching coefficient is zero.

The decrease in the signal visibility due to the influence of the inconsistency of the "elementary" Doppler signals phases occurs for two reasons:

- due to the inconsistency of the signal phases when scattered radiation is received within the aperture in the form of a narrow ring;
- due to the fact that signals that are received within ring apertures may be in antiphase.

Reduction of the degree of signals phase inconsistency can be achieved by using a filter that must be installed instead of the receiving diaphragm. This will improve visibility, signal-to-noise ratio and accuracy of flow rate measurement.

The optical parts of the experimental LDA were developed and manufactured using a high-power laser diode with a low degree of radiation coherence.

An optoelectronic converter has been developed to convert low-intensity frequency modulated radiation. It uses an avalanche photodiode and a sensitive broadband photocurrent amplifier.

The effect of scattered radiation intensity on the modulation depth of the Doppler signal was experimentally investigated.

The method for increasing modulation depth of the Doppler signal by matching the intensity of the scattered radiation is experimentally confirmed.

In the thesis the following new scientific results are obtained:

- it is first proposed to increase the modulation depth of the Doppler signal, SNR and the accuracy of the laser Doppler velocimeter (LDV) by filtering scattered radiation, which has a low degree of intensity matching;
- it is first proposed to increase the modulation depth of the Doppler signal, SNR and the accuracy of the LDV by filtering scattered radiation, which has a low degree of polarization matching;
- for the first time, it is proposed to increase the modulation depth of the Doppler signal, SNR and the accuracy of the LDV by filtering scattered radiation, which results in the output of the photodetector signals in counter-phase;

The practical significance of the thesis results are:



- a technique has been developed to determine the shape of the filter. The use of such a filter in LDV with the reception of forward scattered radiation increases the intensity coordination degree of radiation, the modulation depth of the Doppler signal, SNR and measurement accuracy of the flow velocity;

- a technique has been developed to determine the shape of a filter. Using such a filter in the LDV with back scattering radiation increases the degree of polarization of the radiation, the modulation depth of the Doppler signal, the signal-to-noise ratio, and the accuracy of the flow velocity measurement;

- a technique was developed to determine the shape of the filter. The use of such a filter in increasing the degree of harmonization of "elementary" Doppler signals by phase, the modulation depth of the Doppler signal, the signal-to-noise ratio and the accuracy of flow velocity measurement;

- two and three component laser Doppler velocity meters, the structures of which have been developed in the work, are intended to measure the flow velocity according to the specifics of the measurement;

- laser Doppler velocity and length meter, the structure of which is designed in the work, is intended for use in those technological processes where it is necessary to measure the speed of solid surfaces and their length. For example, wire during its wiring, electrical cables, rolling in metallurgical production and other production processes;

- laser Doppler aerosol counter, the structure of which is designed in the work, is intended for use in those technological processes where it is necessary to determine the quantitative distribution of aerosols by size. For example, to control the state of the air in industrial premises of the electronics and pharmaceutical industries;

- laser Doppler meter of two components of vibration velocity, the structure of which is developed in the work is intended for the study of the nature of vibration during bench tests of aircraft engines, as well as during the study of vibration of power equipment units, automobile engines and other equipment;

- laser Doppler meter of two components true airspeed of unmanned aerial vehicle the structures was developed.

**Keywords:** measurement, velocity, aero/hydrodynamic flow, laser, Doppler, error, modulation depth, signal/noise ratio, intensity, polarization, phase, scattering.

### Список публікацій здобувача.

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Дивнич В.М. Підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра узгодженням розсіяних хвиль за інтенсивністю/В.М. Дивнич // Вісник НТТУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017. – Вип. 54(2). – С.40–44. *Index Copernicus*.

2. Azarskov V., Dyvnych V. Modeling of a signal generated by microparticles moving in the aerodynamic flow/V. Azarskov, V. Dyvnych//Mathematical modeling and computing. - 2019. - v.6.- № 2 - PP. 173 – 178. *Scopus*. DOI: 10.23939/mmc2019.02.173.

Статті у фахових виданнях:

3. Азарсков В.М., Дивнич В.М. Лазерний вимірювач двох компонент вектора швидкості аерогідродинамічних потоків/В.М. Азарсков, В.М. Дивнич// Вісник інженерної академії наук України. - 2018. - №3. – С. 15-18.

4. Азарсков В.М., Дивнич В.М. Зменшення впливу поляризації розсіяного випромінювання на сигнал лазерного анемометра/В.М. Азарсков, В.М. Дивнич//Вісник інженерної академії наук України. - 2018. - №4. – С. 153-157.

5. Дивнич М.П., Дивнич В.М. Експериментальне дослідження лазерного доплерівського вимірювача швидкості./М.П. Дивнич, В.М. Дивнич //Вісник інженерної академії наук України. - 2020. -№1. – С.55-59.

Патенти України на винахід:

6. Пат. на винахід 119049 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36. Лазерний доплерівський анемометр з компенсацією постійної складової сигналу/В.М. Дивнич. № а 2016 06275; заявл. 09.06.2016; опубл. 25.04.2019, Бюл.№8.

Патенти України на корисну модель:

7. Пат. на корисну модель 59113 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36 Лазерний двокомпонентний доплерівський анемометр/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич. № у 2010 9796; заявл. 06.08.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл.№9.

8. Пат. на корисну модель 70873 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36 Лазерний трикомпонентний доплерівський вимірювач швидкості/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич. № у 2011 15156; заявл. 21.12.2011; опубл. 25.06.2012; Бюл.№12.

9. Пат. на корисну модель 71995 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36 Лазерний двокомпонентний доплерівський вимірювач швидкості/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич. № у 2011 11753; заявл. 05.10.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл.№15

10. Пат. на корисну модель 78043 Україна, МПК G01P (2006/1) 3/36 Лазерний трикомпонентний доплерівський анемометр/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич. № у 2012 08786; заявл. 17.07.2012; опубл. 11.03.2013; Бюл.№5.

11. Пат. на корисну модель 81090 Україна, МПК G01P (2006/1) 3/36 Лазерний доплерівський вимірювач двох компонент вектора швидкості /В.М. Дивнич. № у 2012 13310; заявл. 22.11.2012; опубл., 25.06.2013; Бюл.№12

12. Пат. на корисну модель 94183 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36 Лазерний двокомпонентний доплерівський швидкості/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич, О.М. Тимченко. № у 2013 09057; заявл. 19.07.2013, опубл. 10.11.2014, Бюл.№21.

13. Пат. на корисну модель 99702 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36 Лазерний доплерівський вимірювач швидкості та довжини/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич № у 2014 04083; заявл. 16.04.2014; опубл., 25.06.2015 Бюл.№12.

14. Пат. на корисну модель 109900 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36  
Лазерний доплерівський лічильник аерозолей/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич.  
№ у 2016 03672; заявл. 06.04.2016; опубл., 12.09.2016, Бюл. №17

15. Пат. на корисну модель 134473 Україна, МПК G01 (2006/1) H 9/00  
Лазерний двокомпонентний віброметр/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич. № у 2018  
10275; заявл. 16.10.2018; опубл., 27.05.2019, Бюл. №10.2019.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

16. Azarskov V., Dyvnych V. Unmanned Aerial Vehicles Velocimeter/  
V.Azarskov, V. Dyvnych//2019 IEEE 5th International Conference Actual  
Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). - October 22-  
24 2019. – Kyiv. – Ukraine. - PP. 186 – 189. *Scopus*.

DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943827.

17. Дивнич В.М. Розробка цифрового вимірювача частоти сигналу  
лазерного анемометра на основі програмованої логічної інтегральної  
мікросхеми/В.М. Дивнич//XIII Міжнародна науково-практична конференція  
молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки». – НАУ, Київ,  
2013. - С.226.

18. Дивнич В.М. Двокомпонентний лазерний доплерівський  
анемометр/В.М. Дивнич//XIII Міжнародна науково-практична конференція  
молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки». – НАУ, Київ,  
2013. - С.227.

19. Дивнич В.М. Розробка цифрового вимірювача частоти сигналу  
лазерного анемометра/В.М. Дивнич//Всеукраїнська науково-практична  
конференція «Проблеми навігації і управління рухом» – НАУ, Київ, 2013. -  
С.128.

20. Чудесов О.П., Дивнич В.М. Лазерні доплерівські вимірювачі  
компонент вектора швидкості/О.П. Чудесов, В.М. Дивнич//XIII Міжнародна  
науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». -  
НТУУ «КПІ», Київ, 2014. - С. 67-68.

21. Дивнич В.М. Підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра/ В.М. Дивнич//ХІУ Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». - НТУУ «КПІ», Київ, 2015. - С. 54-55.

22. Дивнич В.М. Компенсація постійної складової сигналу лазерного доплерівського анемометра / В.М. Дивнич//ХУІ Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». - НТУУ «КПІ», Київ, 2017. - С. 50-51.

23. Дивнич В.М. Зменшення впливу неузгодженості розсіяного випромінювання за станом поляризації на сигнал лазерного доплерівського анемометра / В.М. Дивнич//ХУІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». - НТУУ «КПІ», Київ, 2018. - С. 39-40.