

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Костеров Олександр Олексійович

УДК 534.621.5

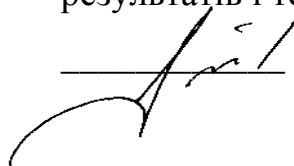
ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕРЖАВНОГО
ПЕРВИННОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ЗВУКОВОГО ТИСКУ В
ПОВІТРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

15 – «Автоматизація та приладобудування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Костеров О.О.

Науковий керівник: Паракуда Василь Васильович, к.т.н., доцент

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Костеров О.О. Удосконалення та дослідження державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, м. Львів, – Інститут комп'ютерних наук, автоматики та метрології, м. Львів, 2021.

Дисертацію присвячено розв'язуванню актуальної науково-технічної проблеми – поліпшенню метрологічних характеристик державного первинного еталону України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі через удосконалення еталона, комплексне аналізування складових непевності під час калібрування мікрофонів, виявляння та дослідженню найбільш впливових складових непевності для вдосконалення методів і засобів вимірювання, які дають змогу зменшувати непевність відтворення та передавання одиниці звукового тиску.

Наукова новизна отриманих результатів:

За результатами проведених досліджень, направлених на розроблення та вдосконалення еталона одиниці звукового тиску у повітряному середовищі, отримано наступні результати:

1. *Вперше*, за результатами аналізу та дослідження математичної моделі процесу калібрування мікрофонів, встановлено, що основними чинниками, які визначають метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі є оцінки електричного передавального імпедансу, параметрів довкілля, параметрів мікрофонів та розмірів камери малого об'єму;
2. *Вперше*, за результатами проведених досліджень математичної моделі процесу калібрування мікрофонів, запропоновано та впроваджено удосконалену структуру державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі, що дозволило:

- для мікрофонів типу LS1: зменшити непевність їх калібрування на 0.01 дБ – 0.04 дБ;
- для мікрофонів типу LS2: розширити частотний діапазон вимірювань з діапазону (31 Гц – 20 кГц) до діапазону (2 Гц – 25 кГц), крім того, зменшити непевність їх калібрування на 0.02 дБ – 0.05 дБ;

3. *Вперше* встановлено частотні залежності впливу шумів з нормальним розподілом у вимірювальних каналах на стандартний відхил результатів калібрування мікрофонів із використанням моделювання методом Монте-Карло та показано суттєве зростання їх впливу на інфранизких частотах;

4. *Вперше*, під час уведення поправки на теплопровідність, запропоновано метод для оцінення значення частоти спряження та запропоновано використання в частотній смузі нижче від цього значення - зазначену низькочастотну модель поправки, а у високочастотній області – широкосмугову модель, що забезпечує зменшення непевності у робочому діапазоні частот.

Практичне значення отриманих результатів:

виконано порівняльний аналіз наявних методів та засобів відтворювання одиниці звукового тиску в провідних акустичних лабораторіях світу та визначено теоретичні засади вдосконалення державного первинного еталону України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі;

визначено структуру побудови для вдосконалення державного первинного еталону України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі;

створено та введено в експлуатацію вдосконалену еталонну установку для калібрування за тиском лабораторних еталонних мікрофонів у діапазоні частот від 2 Гц до 25 кГц на державному первинному еталоні України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі;

розроблено та впроваджено наступні методики калібрування: «Державний первинний еталон одиниці звукового тиску в повітряному середовищі ДЕТУ 10-01-11. Методика калібрування еталонної установки УЕ-2ПУ» ДШВК 407539.001 МК (ДП НДІ «Система», м. Львів); «Методика калібрування за тиском вимірювальних мікрофонів на державному первинному еталоні ДЕТУ

10-01-11 в діапазоні частот від 2 Гц до 25 кГц» ДШВК 407629.001 МК (ДП НДІ «Система», м. Львів);

виконано міжнародні ключові звірення COOMET.AUV.A-K5, за результатами яких оновлено 15 рядків вимірювальних і калібрувальних можливостей (СМС) України в царині акустики в Базі даних ключових звірень Міжнародного бюро мір і ваг (КСДВ ВІРМ).

Перший розділ дисертації присвячено порівняльному аналізу наявних методів та засобів відтворення одиниці звукового тиску. Розглянуто первинний метод калібрування мікрофонів за тиском. Зазначено, що реалізація одиниці звукового тиску в повітряному середовищі відбувається через калібрування лабораторних еталонних мікрофонів, які завдяки своїм характеристикам є прецизійними перетворювачами.

Зазначено, що натеper калібрування мікрофонів методом взаємності є фактично єдиним первинним методом калібрування мікрофонів, який використовують всі провідні акустичні лабораторії світу для відтворення одиниці звукового тиску, а калібрування мікрофонів за тиском дає змогу досягати найвищого рівня точності.

Розглянуто історію виникнення та сучасний стан вимірювань за використання первинного методу калібрування (методу взаємності) та зазначено, що реалізацію цього методу постійно вдосконалюють через урахування впливу тих чинників, що їх раніше нехтували.

Проаналізовано значення непевностей вимірів під час калібрування еталонних мікрофонів у провідних акустичних лабораторіях світу та зазначено, що ці лабораторії постійно слідкують за змінами в реалізації методу калібрування та відповідно вдосконалюють свої акустичні еталони.

Проаналізовано метрологічні характеристики державного еталона ДЕТУ 10-01-00 та зазначено, що вони вже не відповідають сучасному стану вимірювань. За результатами аналізування визначено теоретичні засади вдосконалення еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі, а саме: зменшення непевності визначення електричного передавального

імпедансу; зменшення непевності визначення параметрів довкілля, параметрів мікрофонів і геометричних розмірів мікрофонів та акустичних камер малого об'єму, а також зменшення стандартної непевності вимірів за типом А (середнього квадратичного відхилення вимірів).

Другий розділ дисертації присвячено визначанню та оцінюванню впливу джерел непевностей вимірів під час калібрування еталонних мікрофонів. Зокрема, представлено детальну математичну модель процесу калібрування мікрофонів методом взаємності. Подано математичну модель та еквівалентну схему мікрофона; еквівалентну схему вимірювання під час визначання чутливості мікрофонів за тиском, а також формулу обчислювання чутливості мікрофона за тиском у разі використання трьох пар мікрофонів, акустично з'єднаних між собою за допомогою камер малого об'єму.

Розглянуто акустичний передавальний імпеданс системи «мікрофони—камера малого об'єму», коли довжина акустичної хвилі значно більше за розміри цієї камери, тобто, коли газ в камері поводить себе просто як гнучкість. На високих частотах, коли розміри камери малого об'єму є сумірними з довжиною хвилі, цю систему розглядають як однорідну передавальну лінію за умови, що камера малого об'єму має циліндричну форму та діаметр, який дорівнює діаметру діафрагми мікрофона, а також за умови плоскохвильового поширювання сигналу й адіабатичного стискання та розширювання газу.

Подано дві моделі врахування втрат на теплопровідність, описані в міжнародному стандарті ІЕС 61094-2:2009, так звані низькочастотну та широкосмугову моделі.

Зазначено, що на чутливість мікрофонів також впливають величини, які описують властивості газу, що перебуває в камері малого об'єму під час вимірювання (зазвичай це — повітря). Ці величини залежать від умов довкілля, тобто температури, статичного тиску та відносної вологості під час вимірювання.

Розглянуто схему вимірювання під час калібрування еталонних мікрофонів і зазначено, що для цієї схеми вимірювання головними джерелами непевності є: шуми вимірювальних каналів; часова нестабільність вимірювальних каналів; нелінійність вимірювальних каналів; мала розрядність аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) у вимірювальних каналах; велика відстань між мікрофоном-передавачем та еталонним імпедансом, що призводить до появи паразитного імпедансу; перехресні завади між каналами.

Оцінено вплив шумів вимірювальних каналів на непевність результатів калібрування мікрофонів. Оскільки рівень сигналів у вимірювальних каналах суттєво залежить від частоти та типу мікрофонів, що їх калібрують, то для оцінювання впливу шумів на точність визначання електричного передавального імпедансу пари мікрофонів було застосовано аналітичні методи моделювання (метод Монте-Карло).

Оцінено вплив часової нестабільності, нелінійності, розрядності АЦП, паразитного імпедансу та перехресних завод у вимірювальних каналах і розроблено рекомендації щодо структури побудови вдосконаленого державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі.

Проаналізовано вплив параметрів довкілля на акустичний передавальний імпеданс системи «мікрофони—камера малого об'єму» і зазначено, що найбільший вплив на непевність результатів калібрування мікрофонів має непевність визначання температури повітря в камері малого об'єму.

Проаналізовано вплив непевності визначання геометричних розмірів (глибини та діаметру фронтальної порожнини мікрофонів і довжини та діаметру камери малого об'єму), і параметрів мікрофонів (еквівалентного і фронтального об'ємів, резонансної частоти та коефіцієнта втрат) на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу пари мікрофонів та зазначено, що їхній вплив суттєво зростає зі зростанням частоти.

Зазначено, що на непевність вимірів під час калібрування мікрофонів також впливають: непевність встановлення напруги поляризації мікрофонів,

непевність визначання параметрів повітря, поява радіально-хвильового руху на високих частотах та схеми включення заземлення мікрофонів під час вимірювання.

У третьому розділі дисертації проаналізовано та оцінено вплив непевності визначання поправки на теплопровідність на результати калібрування. Зазначено, що дві моделі розрахунку цієї поправки (низькочастотна та широкопasmова) дають результати, які значною мірою різняться між собою. Головними, але не єдиними, чинниками, що визначають різницю між запропонованими моделями теплопровідності в діапазоні низьких частот, є: спрощений варіант обчислення обох моделей; некоректне обчислення втрат на торцевих поверхнях камери малого об'єму (діафрагмах мікрофонів) в широкопasmовому рішенні, що призводить до порушення принципу збереження енергії; некоректне врахування впливу нарізи у фронтальній порожнині мікрофона (на низьких частотах розміри нарізи є меншими за розміри ізотермального граничного шару повітря).

Розглянуто альтернативну модель обчислення поправки на теплопровідність, яка також ґрунтується на моделі теплопровідності в закритій циліндричній порожнині (моделі Гербера), але за збуджувача з нульовим імпедансом.

Зроблено висновки стосовно методики обчислення чутливості мікрофонів за тиском на державному первинному еталоні.

У четвертому розділі дисертації подано структурну схему вдосконаленої еталонної установки для калібрування мікрофонів за тиском, яку розроблено на основі аналізу чинників, що впливають на непевність виміру під час калібрування мікрофонів.

Подано результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик удосконаленої еталонної установки для калібрування мікрофонів за тиском, зокрема, оцінено вплив непевності визначання електричного передавального імпедансу, параметрів довкілля, параметрів мікрофонів, геометричних розмірів мікрофонів і камер малого об'єму та деяких інших

величин на стандартну непевність калібрування мікрофонів. Складено бюджет непевності вимірів під час калібрування мікрофонів за тиском.

Подано аналіз результатів двосторонніх ключових регіональних звірень із національним метрологічним інститутом Польщі (Główny Urząd Miar, GUM), який брав участь у звіреннях SSAUV.A-K5, і який виконав функцію лабораторії, яка дала змогу приєднати отримані результати до опорного значення ключового звірення (KCRV) та оцінити ступінь еквівалентності результатів, які отримано на вдосконаленій еталонній установці для калібрування мікрофонів за тиском (результати ДП НДІ «Система»), відносно інших учасників звірень SSAUV.A-K5. Відповідно до технічного протоколу звірень кожен із учасників прокалібрував один мікрофон типу LS1P методом взаємності згідно з міжнародним стандартом IEC 61094-2:2009 та визначив рівень і фазу його чутливості за тиском щодо третинооктавного ряду частот у діапазоні від 2 Гц до 10 кГц. Пілотною лабораторією в цих звіреннях виступила акустична лабораторія GUM.

За результатами, що їх подали учасники звірень, було обчислено односторонні ступені еквівалентності, визначені як різниця між перетвореними результатами ДП НДІ «Система» та KCRV, на кожній частоті як щодо модуля чутливості мікрофона, так і щодо її фази, а також відповідну розширену непевність результатів. Зазначено, що абсолютне значення DoE результатів ДП НДІ «Система» відносно KCRV на всіх частотах є меншою за розширену непевність цих DoE, що свідчить про те, що результати ДП НДІ «Система» є еквівалентними відносно KCRV, отриманих в SSAUV.A-K5, в усьому діапазоні частот.

За отриманими результатами було заявлено оновлені СМС України в царині акустики (15 СМС-рядків), які було опубліковано в KCDB VIPM. Крім того, результати проведених звірень дали змогу порівняти заявлені непевності калібрування лабораторних мікрофонів типу LS1 в ДП НДІ «Система» з іншими учасниками звірень SSAUV.A-K5.

Ключові слова: лабораторний еталонний мікрофон, метод взаємності, непевність, ключове звірення, одиниця звукового тиску в повітряному середовищі, первинний метод калібрування за тиском, чутливість мікрофона.

ABSTRACT

Kosterov O.O. Improvement and investigation of the national primary measurement standard for the unit of sound pressure in air. Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for the decree of Doctor of Philosophy in the specialty 152 «Metrology and information-measuring technology» – Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, 2021.

The thesis is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem – the refining of metrological characteristics of the State primary standard of Ukraine of the unit of sound pressure in the air by improvement of the standard, to the complex analysis of sources of uncertainty during microphone calibration, to the identification and exploration of the most influential components of uncertainty in order to improve the methods and the measuring instruments that will reduce the uncertainty of reproduction and transference of the unit of sound pressure.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

According to the results of research aimed at developing and improving the standard unit of sound pressure in the air, the following results were obtained:

1. For the first time, according to the results of analysis and research of mathematical model of microphone calibration process, it is established that the main factors determining metrological characteristics of the state primary standard of sound pressure unit in the air are: estimates of electrical transmission impedance, environmental parameters, microphone parameters and small volume camera size;

2. For the first time, based on the results of research of the mathematical model of the microphone calibration process, an improved structure of the state primary standard of the sound pressure unit in the air was proposed and implemented, which allowed:

- for LS1 type microphones: reduce the uncertainty of their calibration by 0.01 dB - 0.04 dB;

- for LS2 type microphones: expand the frequency range of measurements from the range (31 Hz - 20 kHz) to the range (2 Hz - 25 kHz), in addition, reduce the uncertainty of their calibration by 0.02 dB - 0.05 dB;

3. For the first time, the frequency dependences of noise influence with normal distribution in measuring channels on the standard deviation of microphone calibration results using Monte Carlo simulation were established and a significant increase in their influence at infra-low frequencies was shown;

4. For the first time, when introducing the thermal conductivity correction, a method for estimating the coupling frequency value is proposed and the use in the frequency band below this value is proposed - the specified low-frequency correction model, and in the high-frequency region - the broadband model to reduce uncertainty in the operating frequency range.

The practical significance of the obtained results is as follows:

the comparative analysis of the existing methods and means of reproduction of the unit of sound pressure in the air in the world's leading acoustic laboratories has been performed and the theoretical basis of improvement of the standard has been defined;

the structural scheme of the improved national standard of the unit of sound pressure in the air has been defined;

an improved standard unit for pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range from 2 Hz to 25 kHz of the State primary standard of the sound pressure unit in the air has been created and put into operation;

the following calibration procedures have been developed and implemented: "Calibration procedure of the standard unit UE-2PU of the State primary standard DETU 10-01-11", "Procedure for pressure calibration of the measuring microphones against the State primary standard DETU 10-01-11 in the frequency range from 2 Hz to 25 kHz";

international key comparison COOMET.AUV.A-K5 has been conducted and, as a result, 15 lines of measuring and calibration capabilities in the field of acoustics of Ukraine were updated in KCDB BIPM.

The first chapter of the thesis is devoted to a comparative analysis of existing methods and means of reproducing the unit of sound pressure (USP). The primary method of the calibration of microphones is reviewed. It is noted that the realization of the USP in the air is carried out by the calibration of laboratory standard microphones, which, due to their characteristics, are precision transducers.

It is noted that, as for today, calibration of microphones by reciprocity is in fact the only primary method of microphone calibration, which is used by all world's leading acoustic laboratories for reproducing the USP, and the pressure microphone calibration allows achieving the highest level of accuracy.

The history and the current state of measurements which are using the primary method of reciprocity are considered and it is noted that the implementation of this method is constantly improved by taking into account the influence of those factors that were previously neglected.

The values of measurement uncertainty of the calibration of reference microphones in the world's leading acoustic laboratories are analyzed and it is noted that these laboratories are constantly monitoring changes in the implementation of the calibration method and improve their acoustic standards accordingly.

The metrological characteristics of the State standard DETU 10-01-00 are analyzed and it is noted that they no longer correspond to the current state of measurements. According to the results of the analysis, the theoretical principles of improving the standard of the USP in the air are determined, namely: reducing the uncertainty of determining the electrical transfer impedance; reducing uncertainty of determining environmental parameters; parameters of microphones and geometric dimensions of microphones and small volume acoustic couplers; as well as - reducing of the type A standard uncertainty of measurements.

The second chapter of the thesis is devoted to determining and evaluating the influence of measurement uncertainty sources during calibration of standard

microphones. In particular, a detailed mathematical model of the process of microphone calibration by the reciprocity method is presented. Also, presented are: mathematical model and equivalent microphone scheme; an equivalent scheme of measurement for determining the pressure sensitivity of microphones and a formula for calculating the pressure sensitivity by using three pairs of microphones that are acoustically connected to each other by means of coupler.

The acoustic transfer impedance of a system “microphones-acoustical coupler” has been considered when the acoustic wavelength is much larger than the size of this coupler, i.e. when the gas in the coupler behaves as a simple compliance. At high frequencies, when the dimensions of the coupler is proportional to the wavelength, this system can be considered as a homogeneous transmission line, provided that the coupler has a cylindrical shape and its diameter equals to that of the microphone diaphragm, and assumptions about the plane-wave signal propagation and adiabatic gas compression and expansion are valid.

Two models of heat conduction losses presented by the international standard IEC 61094-2:2009 are reviewed – the so-called low-frequency and broadband solutions.

It is noted that the sensitivity of microphones is also affected by values that describe the properties of the gas in the coupler during the measurements (usually it is air). These values depend on the environmental conditions, i.e. temperature, static pressure and relative humidity during the measurements.

The scheme of measurements during calibration of standard microphones is considered and it is noted that for a such scheme of measurements the main sources of uncertainty are: noise, time instability and nonlinearity of measuring channels; low resolution of analog-to-digital converters in measuring channels; large distance between the transmitter microphone and the reference impedance, that leads to the appearance of a parasitic impedance; cross-talk interference between channels.

The influence of noise of measuring channels on uncertainty of results of microphone calibration has been estimated. Since the signal level in the measuring channels significantly depends on the frequency and type of the calibrated

microphones, analytical simulation methods (Monte Carlo method) were used to assess the effect of noise on the accuracy of determining the electrical transfer impedance of a pair of microphones.

Further on, the influence of time instability, nonlinearity, ADC resolution, parasitic impedance and cross-talk in the measuring channels was evaluated and recommendations about the structure of the improved national standard of the USP in the air had been developed.

In addition, the influence of environmental parameters on the acoustic transfer impedance of the system “microphones-coupler” was analyzed, and it was noted that the greatest influence on the uncertainty of the results of microphone calibration has the uncertainty of determining the air temperature in the coupler.

The influence of uncertainty of determining the geometric dimensions (depth and diameter of the microphone front cavity and length and diameter of the coupler) and of microphone parameters (equivalent and frontal volumes, resonant frequency and loss factor) on the uncertainty of estimating of the acoustic transfer impedance of each pair of microphones was considered and it was noted that their effect increases significantly with increase of frequency.

In the third chapter of the thesis the effect of the uncertainty of determining the thermal conduction correction on the calibration results has been analysed and evaluated. It is noted that the two calculation models of this correction (low-frequency and broadband) give results that differ significantly from each other. The main, but not the only, factors that determine the difference between the proposed models of thermal conduction in the low frequency range are: a simplified version of the calculation of both models; incorrect calculation of losses on the end surfaces of the coupler (microphone diaphragms) in the broadband solution, that leads to a violation of the principle of energy conservation; incorrect accounting of the influence of the notch in the front cavity of the microphone (at low frequencies, the size of the thread is smaller than the size of the isothermal boundary layer of air).

An alternative model of calculating the correction for thermal conduction is considered, which is also based on the model of thermal conduction in a closed cylindrical cavity (Gerber model), but for the driving source with zero impedance.

Conclusions are made regarding the method of calculating the pressure sensitivity of microphones on the state primary standard.

The fourth chapter of the thesis presents a block diagram of an improved standard unit for pressure calibration of microphones which is developed on the basis of the analysis of factors influencing the uncertainty of measurements during the calibration of microphones.

The results of experimental researches of metrological characteristics of the improved standard unit for pressure calibration of microphones are presented, in particular, the influence of assessing the uncertainties is estimated: of electric transfer impedance; of environmental parameters; of microphone parameters; of geometric dimensions of microphones and coupler and of some other values for standard microphone calibration uncertainty. A budget for measurement uncertainty during pressure microphone calibration has been prepared.

An analysis of the results of bilateral key regional comparison with the National Metrological Institute of Poland (GUM), which participated in the CCAUV.A-K5 comparison and, therefore, could serve as a laboratory that will link the obtained results to the KCRV and assess the degree of equivalence of the results obtained on the improved standard unit for pressure calibration of microphones (results of DP NDI "Systema") to other participants of CCAUV.A-K5 comparisons is presented. According to the technical protocol of comparison, each participant had to calibrate one microphone type LS1p by the primary method of reciprocity according to the international standard IEC 61094-2: 2009 and determine the level and phase of its pressure sensitivity for third-octave frequency range from 2 Hz to 10 kHz. The acoustic laboratory GUM acted as a pilot laboratory in this comparison.

Based on the results presented by the participants, unilateral equivalence degrees (DoE) were calculated, which were defined as the difference between the converted results of DP NDI "Systema" and KCRV at each frequency, both for the microphone

sensitivity module and for its phase, and the corresponding expanded uncertainty of measurement was calculated. It is noted that the absolute value of DoE of the results of DP NDI “Systema” in relation to KCRV at all frequencies is less than the expanded uncertainty of these DoE, which indicates that the results of DP NDI “Systema” are equivalent to values of KCRV of CCAUV. A-K5 in the entire frequency range.

The obtained results allowed DP NDI “Systema” to present in CCAUV the updated SMS capabilities of Ukraine in the field of acoustic measurements (15 SMS lines), which were published in KCDB BIPM. In addition, the results of the comparison made it possible to compare the stated uncertainties of calibration of laboratory microphones of the LS1 type in the DP NDI “Systema” with other participants in the CCAUV.A-K5 comparison.

Key words: key comparison, laboratory standard microphone, microphone sensitivity, primary method for pressure calibration, reciprocity technique, unit of sound pressure in the air, uncertainty.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Estimating the uncertainty of a primary acoustic standard by numerical methods / V. P. Chalyi, V. V. Parakuda, A. A. Kosterov, N. V. Gaiduk, A. M. Faida // Measurement Techniques. 2005. Vol. 48, iss. 5. P. 438–444
2. Гайдук Н.В., Костеров А.А., Файда А.М., Чалый В.П. Два численных метода оценки неопределенности измерений // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ’ 2005). – Том VII. Международная конференция «Метрология и измерительная техника» (МК МИТ’ 2005). – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2005. – С.68-71
3. Чалый В.П., Костеров О.О., Файда А.М. Сучасні методи розрахунку невизначеності у вимірюваннях // III Міжнародний науково-практичний семінар “Проблеми якості та стандартизації в автоматизованих

- технологіях”. – Збірник доповідей. – Східниця: ЛФІХФ ДП “УкрНДНЦ”. – 2005. – С.50-62
4. Чалий В. П., Паракуда В. В., Гайдук М. В., Костеров О. О., Файда А. М. Оцінювання характеристик точності первинного акустичного еталона методом Монте-Карло / Збірник праць IV Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія-2004). – Харків: ННЦ “Інститут метрології”. – 2004. – Том 2 С.133-135
 5. Ключові звірення державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі / В. Паракуда, В. Чалий, Е. Пасько, О. Костеров, В. Борис // Метрологія та прилади. 2007. №1. С.20–25
 6. Чалый В.П., Костеров А.А. Оценивание неопределенности в измерениях методом Монте-Карло и методом численного дифференцирования // Сборник доклады XVII-ти Национален научен симпозиум с международно участие “Метрология и метрологично осигуряване”. – Созопол. – Технический университет София. – Изд. “СОФТТРЕЙД”. – България. – 2007. – С.36-41. (10-14 септември 2007 г.)
 7. В.П.Чалий, О.О.Костеров. Метод Монте-Карло та метод числового диференціювання для оцінювання характеристик точності результатів вимірювання // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація. Матеріали науково-технічної конференції, 30-31 жовтня 2008 р., Львів, ДП НДІ «Система» 2008. – С. 139-148
 8. Е.В.Пасько, В.П.Чалий, О.О.Костеров, І.Г.Кізілівський, С.В.Кузнецов. Результати пілотного звірення національних акустичних еталонів України та Росії в інфразвуковому діапазоні частот // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація. Матеріали науково-технічної конференції, 30-31 жовтня 2008 р., Львів, ДП НДІ «Система» 2008. – С. 194-198
 9. Ключові звірення державного первинного акустичного еталона в інфразвуковому діапазоні частот / В. Чалий, Е. Пасько, О. Костеров, І. Кізілівський. // Метрологія та прилади. 2012. №1. С. 17–22

10. Ильницкая Т. М., Чалый В. П., Костеров А. А. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности ультразвукового эталона // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 1 (99). – С. 108–112
11. D.Dobrowolska, A.Kosterov / Report on key comparison COOMET.AUV.A-K5: Pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz / Metrologia, Volume 53, Technical Supplement, 2016. pp. 22. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/09003>
12. Костеров О.О., Паракуда В.В. / Особливості звірень державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі з національними еталонами інших держав та міжнародними еталонами / III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2017», 24-27 січня 2017 року: тези доповідей / Відп. за вип. Володарський Є.Т. – Київ: Академія метрології України, 2017. – С. 87-88. ISBN 978-617-397-133-0
13. Костеров О.О., Кізлівський І.Г., Шпак О.В. / Стан еталонної бази України в галузі акустичних та ультразвукових вимірювань / Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку технічного регулювання у сферах виробництва, послуг і торгівлі згідно з вимогами ЄС», 6-8 вересня 2017 року: матеріали конференції – Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2017. С. 109-112
14. Nikolaenko A., Pozdeeva V., Kosterov O. Final Report "The comparison of national standards of the sound pressure unit in air through calibration of working standard microphones" // Metrologia. 2018. Vol. 55, iss. 1 A. P. 09001-1–09001-21. 0
15. Костеров О. О. Визначення напрямків вдосконалення Державного первинного еталону одиниці звукового тиску для підвищення точності калібрування мікрофонів у вільному полі // Technical Using of Measurement-2018 : тези доповідей IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології (Славське, 13–18 лютого 2018 р.). – 2018. – С. 137–138

16. Костеров О. О. Розвиток еталона одиниці звукового тиску у повітряному середовищі // Метрологія та вимірювальна техніка : тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 9–11 жовтня 2018 р.). – 2018. – С. 24–25
17. Костеров О. О. Стратегія 2017-2027 ССАУВ ВІРМ та вдосконалення національного акустичного еталону України ДЕТУ 10-01-11 // Системи-2018 : тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 22–23 листопада 2018 р.). – 2018. – С. 29–30
18. Бугайцова П. В., Яцук В. А., Костеров А. А. Анормальность закона распределения при оценивании неопределенности эталона звукового давления в воздушной среде, при определенных неопределенностях температуры // Системи обробки інформації. 2008. Вип. 4(71). С. 63-65
19. Костеров О. О., Паракуда В. В., Шпак О. В. Удосконалення державного первинного еталона України ДЕТУ 10-01-11 для калібрування мікрофонів у вільному полі // Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019 (XXIII міжнародний семінар метрологів МСМ'2019) : тези доповідей, до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій (Львів, 10–12 вересня 2019 р.). – 2019. – С. 124–125
20. Костеров О. О., Паракуда В. В., Бубела І. В. Оцінення впливу теплопровідності на непевність вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів // Technical using of measurement-2020 : тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4–7 лютого 2020 р., Славське. – 2020. – С. 73–76

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ	21
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. ПЕРВИННИЙ МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ЕТАЛОННИХ МІКРОФОНІВ ЗА ТИСКОМ (МЕТОД ВЗАЄМНОСТІ)	29
1.1 Загальний опис методу взаємності.....	33
1.2. Аналіз стану вимірювань чутливості еталонних мікрофонів у провідних метрологічних лабораторіях світу	35
1.3 Опис та метрологічні характеристики Державного первинного еталону ОЗТ у повітряному середовищі ДЕТУ 10-01-00	38
1.4 Вибір напрямків удосконалення та дослідження Державного первинного еталону ОЗТ у повітряному середовищі	42
1.5 Висновки до розділу	45
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СКЛАДОВИХ НЕПЕВНОСТІ ПІД ЧАС ВІДТВОРЕННЯ ОЗТ У ПОВІТРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	47
2.1 Математична модель відтворення ОЗТ.....	47
2.2 Вплив непевності вимірювань електричного передавального імпедансу	62
2.3 Вплив непевності визначання умов довкілля.....	69
2.4 Вплив непевності визначання параметрів мікрофона.....	77
2.5 Вплив інших чинників	86
2.6 Висновки до розділу	88
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕПЕВНОСТІ ОЦІНКИ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЕТАЛОННИХ МІКРОФОНІВ ⁸⁹	
3.1 Неоднозначність існуючих моделей визначання поправки на теплопровідність	89

	20
3.2 Альтернативні моделі розрахунку поправки на теплопровідність.....	91
3.3 Визначання методу розрахунку поправки на теплопровідність під час калібрування мікрофонів.....	99
3.4 Висновки до розділу	99
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	101
4.1 Опис удосконаленого ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі.....	101
4.2 Аналіз непевності калібрування еталонних мікрофонів на ДПЕУ ОЗТ .	103
4.3 Проведення міжнародних ключових звірень COOMET.AUV.A-K5	142
4.4 Напрямки подальшого удосконалення Національного державного первинного еталона ОЗТ	154
4.5 Висновки до розділу	156
УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	159

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ

ДПЕУ – державний первинний еталон України

КМО – камера малого об'єму

ОЗТ – одиниця звукового тиску

СМС – вимірювальні і калібрувальні можливості

КСДВ ВІРМ – база даних ключових звірень Міжнародного бюро з мір та ваг

СКВ – середній квадратичний відхил

LS1 – однодюймовий лабораторний еталонний мікрофон, який відповідає вимогам міжнародного стандарту ДСТУ EN 6094-1:2018

LS2 – півдюймовий лабораторний еталонний мікрофон, який відповідає вимогам міжнародного стандарту ДСТУ EN 6094-1:2018

KCRV – опорне значення ключових звірень

DoE – ступінь еквівалентності отриманих результатів до значення KCRV

$\underline{Z}_{e,ij}$ – електричний передавальний імпеданс ij - пари мікрофонів

$\underline{Z}_{a,ij}$ – акустичний передавальний імпеданс ij - пари мікрофонів

\underline{M}_{pi} – чутливість i -мікрофона за тиском

ВСТУП

Актуальність теми

Акустичні вимірювання виконують у всіх галузях промисловості, вони широко застосовуються в охороні довкілля, охороні праці та охороні здоров'я людини. У медицині це, зокрема:

- Обладнання для обстежування порогів слуху та спроможності розрізняти інтенсивність звуку, для обстежування стану середнього вуха, рухомості барабанної перетинки та кісточок середнього вуха (аудиометри, тимпанометри).
- Обладнання для аускультатії (метод досліджень, який засновано на прослуховуванні акустичних явищ, пов'язаних із діяльністю внутрішніх органів людини).
- Обладнання для фонокардіографії – реєстрування акустичних явищ, зумовлених роботою серця для досліджування та діагностування патологій.
- Вимірювання рівнів шуму. Воно охоплює кілька напрямків:
 - вимірювання рівнів шуму в житлових та громадських будівлях;
 - вимірювання рівнів шуму на робочих місцях (задля атестування цих робочих місць і розроблення заходів щодо зменшування рівнів шуму);
 - вимірювання рівнів шуму на території (селітебні або промислові зони, санітарно-захисні зони підприємств або автомагістралей, дитячі майданчики, санаторії - тобто скрізь там, де необхідно контролювати й моніторувати шумове забруднювання).
- Вимірювання звукоізоляції захисних конструкцій будівель та споруд. При цьому захист випробовують за такими параметрами:
 - характеристики та значини індексів звукоізоляції стін, перекриттів та інших захисних конструкцій,
 - характеристики та індекси приведених рівнів ударного шуму під плитами перекриття і в разі передавання шуму знизу вверх.
- Вимірювання акустичних параметрів приміщень залів, які дають змогу

оцінити якість акустичних характеристик залів за кількома параметрами:

- час реверберації (RT60), який є основним параметром для будь-якого залу,
 - індекси чіткості та прозорості музики та мовлення (C80 і C50),
 - параметри розбірливості та чіткості передавання мовлення (RASTI, STI та AICons), кожен із яких відбиває здатність залу передавати мовлення максимально точно та розбірливо.
- Вібраційне досліджування будівель, яке провадять у таких випадках:
 - для оцінювання рівнів вібрації в житлових та громадських будівлях, на робочих місцях задля санітарного нормування умов проживання та праці;
 - для забезпечення будівель та споруд за наявності джерел значної вібрації тощо.

Отже, для безпечного та ефективного використання результатів акустичних вимірювань необхідно, щоб вони були точними й достовірними та простежувались до міжнародно визнаних еталонів одиниць SI.

Державний первинний еталон України (ДПЕУ) одиниці звукового тиску (ОЗТ) в повітряному середовищі забезпечує відтворювання, зберігання та передавання цієї одиниці із найвищою в державі точністю. Тому створення, підтримування та постійне вдосконалювання ДПЕУ ОЗТ є актуальною задачею для досягання й підтримування єдності та простежуваності результатів акустичних вимірювань в Україні та на міжнародному рівні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження базується на результатах, які отримано під час виконання науково-дослідних робіт відповідно до тематичного плану ДП НДІ «Система» за такими темами:

«Удосконалення державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі» (номер державної реєстрації 0107U004934, ДП НДІ «Система», м. Львів, автор – відповідальний виконавець);

«Проведення звірень державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі з національними еталонами інших держав і

міжнародними еталонами» (номер державної реєстрації 0116U007243, ДП НДІ «Система», м. Львів, автор – керівник теми);

«Дослідження стабільності відтворення та зберігання одиниці звукового тиску у повітряному середовищі державним первинним еталоном ДЕТУ 10-01-11» (номер державної реєстрації 0116U007241, ДП НДІ «Система», м. Львів, автор – керівник теми).

Мета та завдання дослідження

Метою цієї роботи є вдосконалювання ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі, комплексний аналіз джерел складових непевності під час відтворювання ОЗТ, досліджування найвпливовіших складових непевності задля створювання методів і засобів вимірювання, які дають змогу зменшити непевність відтворення та передачі ОЗТ.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлено та розв'язано такі **завдання:**

1. Виконати порівняльний аналіз сучасних методів та засобів відтворювання ОЗТ;
2. Визначити теоретичні засади вдосконалювання існуючого ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі;
3. Визначити й оцінити джерела непевності вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів;
4. Проаналізувати й оцінити вплив непевності визначення поправки на теплопровідність на результати калібрування еталонних мікрофонів;
5. Визначити структуру побудови для вдосконалювання ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі;
6. Удосконалити методику дослідження метрологічних характеристик ДПЕУ ОЗТ;
7. Оцінити еквівалентність удосконаленого ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі до аналогічних еталонів інших держав.

Об'єкт дослідження: процес калібрування мікрофонів за тиском, процес удосконалення ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі.

Предмет дослідження: методи побудови та удосконалення еталонів, методи опрацювання результатів вимірювання і оцінювання непевності вимірювання під час калібрування мікрофонів на ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі.

Методи дослідження

Теоретичні та експериментальні дослідження, які проведено в цій роботі, базуються на теорії поширення звукових хвиль в циліндричних камерах; принципах інформаційних технологій; методах диференціального та інтегрального числення; теорії імовірності та математичної статистики; теорії вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень:

1. *Вперше*, за результатами аналізу та дослідження математичної моделі процесу калібрування мікрофонів, встановлено, що основними чинниками, які визначають метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі є оцінки електричного передавального імпедансу, параметрів довкілля, параметрів мікрофонів та розмірів камери малого об'єму;

2. *Вперше*, за результатами проведених досліджень математичної моделі процесу калібрування мікрофонів, запропоновано та впроваджено удосконалену структуру державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі, що дозволило:

- для мікрофонів типу LS1: зменшити непевність їх калібрування на 0.01 дБ – 0.04 дБ;
- для мікрофонів типу LS2: розширити частотний діапазон вимірювань з діапазону (31 Гц – 20 кГц) до діапазону (2 Гц – 25 кГц), крім того, зменшити непевність їх калібрування на 0.02 дБ – 0.05 дБ;

3. *Вперше* встановлено частотні залежності впливу шумів з нормальним розподілом у вимірювальних каналах на стандартний відхил результатів

калібрування мікрофонів із використанням моделювання методом Монте-Карло та показано суттєве зростання їх впливу на інфранизких частотах;

4. *Вперше*, під час уведення поправки на теплопровідність, запропоновано метод для оцінення значення частоти спряження та запропоновано використання в частотній смузі нижче від цього значення - зазначену низькочастотну модель поправки, а у високочастотній області – широкосмугову модель, що забезпечує зменшення непевності у робочому діапазоні частот.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

1. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів та засобів відтворення ОЗТ в провідних акустичних лабораторіях світу та визначено теоретичні засади удосконалення ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі;

2. Визначено структуру побудови для удосконалення ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі;

3. Створено та введено в експлуатацію удосконалену еталонну установку для калібрування лабораторних еталонних мікрофонів за тиском в діапазоні частот від 2 Гц до 25 кГц Державного первинного еталону одиниці звукового тиску в повітряному середовищі;

4. Розроблено та впроваджено наступні методики калібрування: «Державний первинний еталон одиниці звукового тиску в повітряному середовищі ДЕТУ 10-01-11. Методика калібрування еталонної установки УЕ-2ПУ» ДШВК 407539.001 МК (ДП НДІ «Система», м. Львів); «Методика калібрування за тиском вимірювальних мікрофонів на Державному первинному еталоні ДЕТУ 10-01-11 в діапазоні частот від 2 Гц до 25 кГц» ДШВК 407629.001 МК (ДП НДІ «Система», м. Львів);

5. Проведено міжнародні ключові звірення COOMET.AUV.A-K5 за результатами яких оновлено 15 СМС-рядків України в галузі акустичних вимірювань в KCDB BIPM.

Реалізація та впровадження результатів роботи

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень використано в науково-технічних рішеннях ДП «Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем» (м. Львів).

Особистий внесок здобувача

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень, які спрямовані на підвищення точності ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі, отримано автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: [1 - 5, 7, 8, 18] – створення програмного забезпечення та аналізування результатів; [6, 9 - 10] – безпосередня участь в проведенні вимірювань, опрацюванні та інтерпретації отриманих результатів; [11] – проведення вимірювань, опрацювання та узагальнення отриманих результатів; [12] – інтерпретація та аналізування результатів звірень; [13] – дослідження сучасного стану акустичних вимірювань в повітряному середовищі в Україні; [14] – проведення вимірювань, опрацювання та узагальнення отриманих результатів; [19] – безпосередня участь у визначанні основних напрямків удосконалення еталону ОЗТ; [20] – оцінювання впливу непевності визначання теплопровідності на непевність вимірювань на еталоні.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати роботи були оприлюднені та апробовані на міжнародних конференціях та семінарах – IV, V та XI Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (Харків 2004; Харків 2005; Харків 2018), III Міжнародному науково-практичному семінарі «Проблеми якості та стандартизації в автоматизованих технологіях» (Східниця 2005), XVII Національному науковому міжнародному симпозиумі «Метрологія та метрологічне забезпечення» (Созопол 2007), науково-технічній конференції «Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація» (Львів 2008), науково-технічній конференції «Technical Using of Measurement» (Славське 2017; Славське 2018; Славське 2020), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку технічного регулювання у

сферах виробництва, послуг і торгівлі згідно з вимогами ЄС» (Херсон 2017), Міжнародній науково-технічній конференції «СИСТЕМИ-2018» (Львів 2018), Міжнародній конференції метрологів МКМ'2019 (Львів 2019).

Структура та обсяг роботи

Дисертаційне дослідження складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів, узагальнення результатів роботи та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 166 сторінок, з яких 136 сторінок основного тексту, що містять 50 рисунків та 25 таблиць. Список використаних джерел налічує 60 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ПЕРВИННИЙ МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ЕТАЛОННИХ МІКРОФОНІВ ЗА ТИСКОМ (МЕТОД ВЗАЄМНОСТІ)

Акустичні перетворювачі, призначені для вимірювання характеристик звукових хвиль, фактично є давачами тиску. Мікрофони – це перетворювачі, які працюють в чутному діапазоні.

Загалом існує багато типів мікрофонів, які відрізняються за принципом роботи: електростатичні (конденсаторні), п'єзоелектричні, електродинамічні, електретні, оптоволоконні, MEMS мікрофони (з англійської MicroElectrical-Mechanical System – мікроелектромеханічні системи) тощо.

За застосування мікрофони можна розділити на три основні класи [21]:

- Комунікаційні мікрофони, які використовують для мовного спілкування (наприклад: телефонні мікрофони та слухові апарати);
- Мікрофони для запису та передавання звуку, що призначені для відтворення мови та музики;
- Вимірювальні мікрофони, які використовують для вимірювання акустичного тиску.

В акустиці для реалізації одиниці звукового тиску (паскаля) та для калібрування акустичних приладів використовують конденсаторні мікрофони, які є прецизійними перетворювачами, завдяки своїм характеристикам [22]:

- Широкий частотний діапазон та плоска частотна характеристика;
- Широкий лінійний динамічний діапазон, низькі внутрішні шуми та спотворення сигналу;
- Низький вплив на акустичне поле, яке досліджують;
- Низький вплив умов довкілля;
- Низький вплив вібрації, магнітних та електромагнітних полів;
- Висока механічна стійкість, захищеність від ударів та поштовхів;
- Висока хімічна та корозійна стійкість;
- Незначні короткотривалі коливання чутливості (випадкові зміни);

- Малі довготривалі коливання чутливості (систематичний дрейф);
- Проста конструкція, яка робить можливим калібрування цих мікрофонів.

Лабораторні еталонні мікрофони типу LS1 та LS2, які відповідають вимогам міжнародного стандарту [23], а зовнішній вигляд та конструкцію яких представлено на рисунках 1.1 та 1.2, це конденсаторні мікрофони із зовнішньою напругою поляризації які відзначаються:

- Можливістю визначення геометричних розмірів їх передніх порожнин із високою точністю;
- Високою часовою стабільністю характеристик цих мікрофонів (для чого використовують методи штучного старіння);
- Незначною та добре визначеною залежністю від умов довкілля;
- Плоскими частотними характеристиками до 8000 Гц для мікрофонів типу LS1, та до 20000 Гц для мікрофонів типу LS2.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд та геометричні розміри лабораторних еталонних мікрофонів

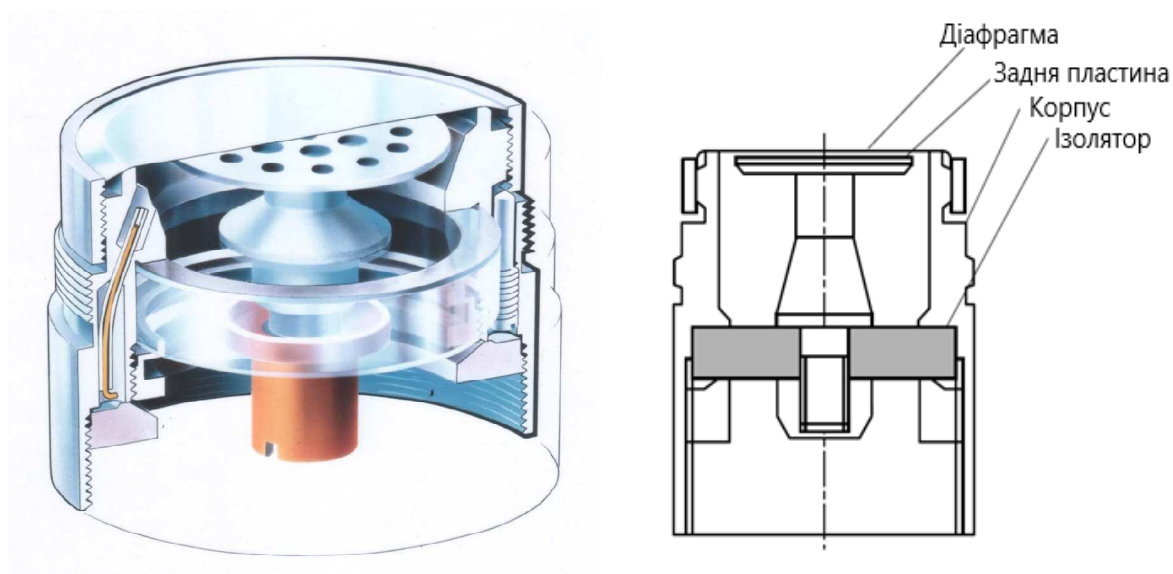


Рисунок 1.2 – Конструкція еталонних мікрофонів

Використання мікрофона для вимірювання звукового тиску змінить цей тиск внаслідок дифракції – взаємодії між звуковою хвилею та вимірювальним мікрофоном. Тому мікрофон характеризують різними типами чутливості, які відповідають типам акустичних полів:

- Поле тиску характеризується тим, що звуковий тиск має однакові амплітуду та фазу у всьому полі. Чутливість за тиском – це така чутливість, коли вимірювання проводять у закритих порожнинах або камерах, розміри яких є меншими за довжину акустичної хвилі. Міжнародний стандарт [23] визначає цей тип чутливості мікрофона наступним чином: для синусоїдного сигналу заданої частоти та для заданих умов довкілля — це відношення напруги холостого ходу мікрофона до звукового тиску, що діє на незахищену поверхню мембрани (тобто на акустичні входи мікрофона), коли звуковий тиск рівномірно розподілено по поверхні мембрани. Слід відзначити, що звукове поле діє тільки на зовнішню поверхню діафрагми мікрофона.
- Вільне звукове поле, або вільне поле – це таке середовище де звукова хвиля розповсюджується без будь-яких перешкод. Міжнародний стандарт [23] визначає чутливість мікрофона у вільному полі наступним чином: для синусоїдної плоскої біжучої звукової хвилі заданої частоти за встановленого

напрямку падіння звукової хвилі та для заданих умов довкілля — це відношення напруги холостого ходу мікрофона до звукового тиску, який міг би існувати на позиції акустичного центру мікрофона за відсутності самого мікрофона. Крім того, звукове поле діє як на зовнішню так і на внутрішню поверхні діафрагми мікрофона.

- Дифузне поле – це таке поле, яке створюють звукові хвилі, які надходять одночасно зі всіх напрямків із рівною імовірністю та із однаковою амплітудою. Міжнародний стандарт [23] визначає цей тип чутливості мікрофона наступним чином: для синусоїдного сигналу заданої частоти в дифузному звуковому полі та для заданих умов довкілля — це відношення напруги холостого ходу мікрофона до звукового тиску, який міг би існувати на позиції акустичного центру мікрофона за відсутності самого мікрофона. Тут також звукове поле діє як на зовнішню так і на внутрішню поверхні діафрагми мікрофона.

На рисунку 1.3 представлено порівняння частотних характеристик для різних типів чутливості мікрофона типу WS2, який оптимізовано для вимірювань у дифузному полі [24].

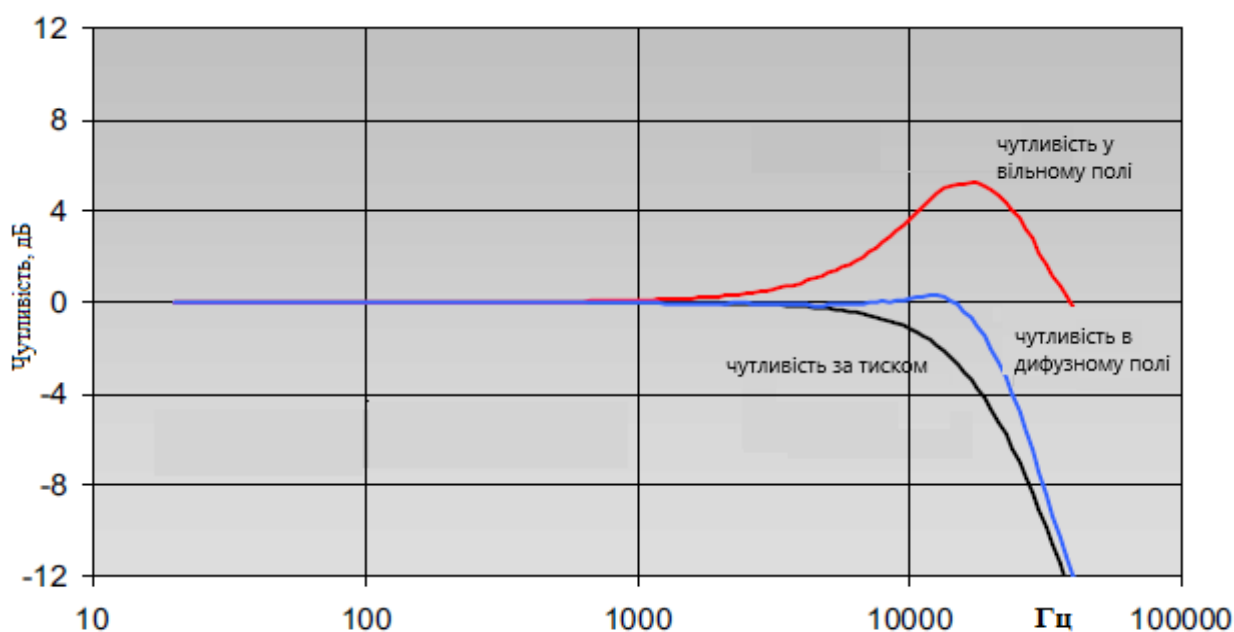


Рисунок 1.3 – Порівняння частотних характеристик різних типів чутливості для мікрофона типу WS2

На сьогодні, калібрування мікрофонів за тиском дозволяє досягти найвищого рівня точності внаслідок кількох факторів:

- створення рівномірного акустичного поля є достатньо простою задачею в діапазоні акустичних вимірювань;
- використання акустичних камер, геометричні розміри яких добре відомі та майже не залежать від умов довкілля, дозволяє визначати акустичний передавальний імпеданс із високою точністю;
- конструкція лабораторних еталонних мікрофонів розрахована на калібрування власне за таким типом чутливості.

1.1 Загальний опис методу взаємності

Загалом, існують первинні та вторинні методи калібрування вимірювальних мікрофонів. До вторинних методів відносять метод послідовного або одночасного порівняння, метод пістонфона та метод електростатичного збуджувача.

До первинних методів калібрування мікрофонів належить калібрування мікрофонів методом взаємності.

Принцип взаємності - це загальний принцип, який відіграє значну роль у сучасній фізиці. Вперше його було запропоновано Гельмгольцем у 1860 році, а лорд Рейлі розширив межі використання цього принципу та сформулював загальну теорему взаємності для лінійних динамічних систем [25].

Загалом, принцип взаємності в акустиці формулюють наступним чином: якщо акустичний тиск, p , в довільній точці простору A , створює об'ємну швидкість, U , в довільній точці простору B , то і навпаки, такий самий акустичний тиск, p , в точці простору B , створить таку саму об'ємну швидкість, U , в точці простору A . Цю залежність можна отримати, якщо застосувати теорему Гріна до хвильового рівняння Гельмгольца, і тоді вона формулюється наступним чином: якщо гармонійні коливання малої амплітуди поширюються в середовищі із рівномірною густиною, а надлишковий тиск p_1 надає частинкам швидкість u_1 , і аналогічно, надлишковий тиск p_2 надає частинкам швидкість u_2 ,

то:

$$\int (u_2 p_1 - u_1 p_2) ds = 0 \quad (1.1)$$

де інтеграл взято по границі об'єму. Середовище, що відповідає хвильовому рівнянню Гельмгольца, має бути оберненим, а явища лінійного розсіювання не порушують цю вимогу [26].

Як показав [27], із цього рівняння випливає важливий наслідок, а саме: відношення акустичної сили джерела, Q , до акустичного тиску, який це джерело створює на деякій відстані r , $P(r)$, є сталим для всіх простих джерел на заданій частоті та при однакових умовах розповсюдження звуку:

$$\frac{Q_1}{P(r)_1} = \frac{Q_2}{P(r)_2} \quad (1.2)$$

Калібрування власне мікрофонів методом взаємності було винайдено в 1940 році [28, 29]. З того часу цей метод було удосконалено та стандартизовано і, на даний момент, цей метод використовують для відтворення одиниці звукового тиску у повітряному середовищі (Па) в національних метрологічних інститутах світу відповідно до вимог міжнародного стандарту [30].

Калібрування мікрофонів методом взаємності ґрунтується на вимірюванні передавальної функції між двома, акустично зв'язаними, мікрофонами, один з яких діє як передавач, а другий – як приймач. Загальна схема вимірювань під час калібрування мікрофонів за тиском представлена на рисунку 1.4.

Під час калібрування мікрофонів використовують три мікрофони, які по чергово, попарно з'єднують між собою за допомогою акустичної камери малого об'єму (КМО) та визначають електричний передавальний імпеданс кожної пари ($Z_{e,ij}$).

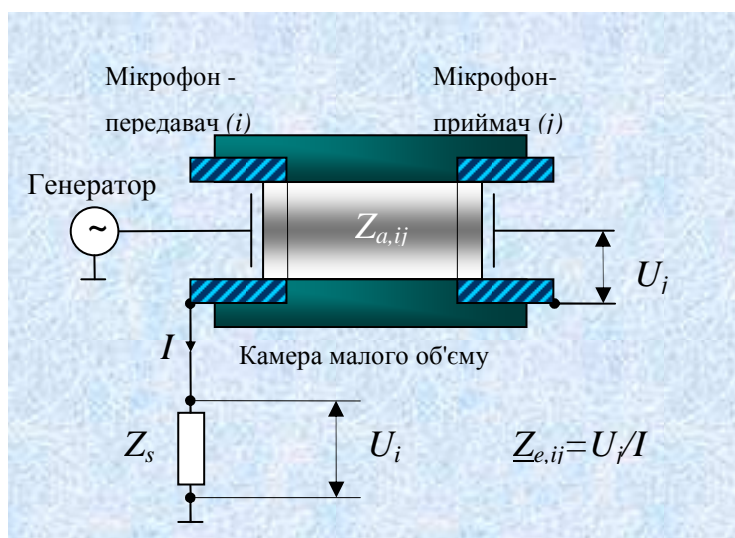


Рисунок 1.4 – Загальна схема вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів методом взаємності.

Акустичний передавальний імпеданс ($Z_{a,ij}$) кожної пари визначають виходячи з аналізу акустичної лінії зв'язку між мікрофонами. Добуток чутливостей за тиском мікрофонів, що складають кожну пару, дорівнює відношенню електричного передавального імпедансу цієї пари до акустичного передавального імпедансу:

$$\underline{M}_{pi} \underline{M}_{pj} = \frac{\underline{Z}_{e,ij}}{\underline{Z}_{a,ij}} \quad (1.3)$$

Таким чином, отримують систему з трьох лінійних рівнянь, розв'язок якої дає змогу визначити чутливість кожного мікрофона.

1.2. Аналіз стану вимірювань чутливості еталонних мікрофонів у провідних метрологічних лабораторіях світу

Калібрування мікрофонів за використання методу взаємності було вперше запропоновано Куком, та трохи згодом Макліном та Беранеком в 40-х роках минулого сторіччя [31], [32]. Вже в кінці 1940-х років були проведені перші між-лабораторні звірення із калібрування однодуюмових мікрофонів у США. Подальші дослідження та удосконалення методу було, зокрема, представлено в

працях T.F.W. Embleton, та I.R. Dagg [33], A.C. Corney [34], G.S.K. Wong [35, 37], D.L.H. Gibbings та A.V. Gibson [36], дослідження впливу довкілля на чутливість мікрофонів було представлено К. Rasmussen в [38] та L. Wu, G.S.K. Wong, P. Hanes, W. Ohm в [39], С. Guianvarc'h, J.-N.Durocher, M. Bruneau, A.-M.Bruneau провели теоретичні дослідження акустичного передавального імпедансу циліндричних порожнин в [40]. Дослідження впливу поправки на теплопровідність на результати калібрування мікрофонів було представлено у [41] - [43].

Перший міжнародний стандарт, який встановлював вимоги до калібрування мікрофонів за тиском методом взаємності було опубліковано 1971 році [44], який згодом було замінено на [45], а потім на [30]. Загалом, з 2000 року ССАUV ВІРМ провів 4 ключових звірення (п'яте проходить на даний момент [46]) із калібрування мікрофонів методом взаємності та планує проведення іще двох до 2029 року.

Сучасний стан акустичних вимірювань у провідних лабораторіях світу можна оцінити за описом, які ці лабораторії подають у своїх звітах з виконання міжнародних ключових звірень [47].

Провідною лабораторією світу в галузі акустичних вимірювань в повітряному середовищі безперечно є **DPLA** (Danish Primary Laboratory of Acoustics – Головна лабораторія Данії з акустики), якою сумісно керують DFM (Danish Fundamental Metrology Ltd – Інститут фундаментальної метрології Данії) та провідний виробник обладнання для акустичних вимірювань у світі – фірма Brüel & Kjaer S&V A/S. Головні напрямки дослідницької діяльності цієї лабораторії пов'язані із удосконаленням калібрування мікрофонів внаслідок покращення методів калібрування, розширення частотного та динамічного діапазону калібрувань [48]. Зокрема, там проводять дослідження із розширення частотного діапазону до частот нижче 1 Гц під час калібрування мікрофонів за тиском первинним методом взаємності, досліджують альтернативні методи калібрування для підтвердження результатів калібрування на низьких частотах, тощо.

Вимірювання чутливості еталонних мікрофонів на первинному еталоні в **DPLA** проводять з використанням чотирьох КМО за допомогою системи для калібрування мікрофонів типу 9699 виробництва фірми Brüel & Kjør, аналізатору сигналів типу PULSE тієї ж фірми та відповідного програмного забезпечення. Під час калібрування визначають індивідуальні параметри кожного мікрофона (об'єм передньої порожнини, еквівалентний об'єм мікрофона, фактор втрат, резонансну частоту та низькочастотне значення коефіцієнту тиску). Заявлена розширена непевність вимірювань ($k=2$) для дюймових мікрофонів типу LS1 знаходиться в межах: від 0.015 дБ до 0.11 дБ.

Національний інститут метрології Китаю **NIM** (National Institute of Metrology) виконує вимірювання чутливості еталонних мікрофонів із використанням чотирьох КМО за допомогою системи для калібрування мікрофонів типу 5998 виробництва фірми Brüel & Kjør, аналізатору сигналів типу BK3560C та програмного забезпечення тієї ж фірми. Під час калібрування визначають індивідуальні параметри кожного мікрофона (об'єм передньої порожнини, еквівалентний об'єм мікрофона, фактор втрат та резонансну частоту). Заявлена розширена непевність вимірювань ($k=2$) знаходиться в межах від 0.03 дБ до 0.2 дБ.

В Національній фізичній лабораторії Великої Британії **NPL** (National Physical Laboratory) калібрування еталонних мікрофонів виконують із використанням однієї КМО за допомогою системи калібрування мікрофонів власного виробництва, розрахунки виконують за допомогою програмного забезпечення власної розробки. Під час калібрування визначають індивідуальні параметри кожного мікрофона (об'єм та глибину передньої порожнини), а для параметрів акустичного імпедансу мікрофона використовують номінальні значення. Заявлена розширена непевність вимірювань ($k=2$) знаходиться в межах від 0.03 дБ до 0.27 дБ.

Національний інститут Метрології, Якості та Технології Бразилії **INMETRO** (National Institute of Metrology, Quality and Technology) виконує вимірювання чутливості еталонних мікрофонів із використанням чотирьох

КМО за допомогою системи для калібрування мікрофонів типу Aurelio CMF22 власного виробництва, яка визначає електричний передавальний імпеданс пар мікрофонів із використанням швидкого перетворення Фур'є та зворотної згортки, розрахунки виконують за допомогою програмного забезпечення власної розробки. Під час калібрування визначають індивідуальні параметри кожного мікрофона (об'єм та глибину передньої порожнини мікрофона), та використовують номінальні значення для еквівалентний об'єм мікрофона, фактору втрат та резонансної частоти. Заявлена розширена непевність вимірювань ($k=2$) знаходиться в межах від 0.04 дБ до 0.183 дБ.

Національний метрологічний інститут Японії **NMI** (National Metrology Institute of Japan) виконує вимірювання чутливості еталонних мікрофонів із використанням двох КМО за допомогою системи для калібрування мікрофонів методом взаємності власного виробництва, розрахунки виконуються за допомогою програмного забезпечення власної розробки. Під час калібрування визначають індивідуальні параметри кожного мікрофона (об'єм та глибина передньої порожнини, еквівалентний об'єм мікрофонів) для фактору втрат та резонансної частоти мікрофонів використовували номінальні значення. Заявлена розширена непевність вимірювань ($k=2$) знаходиться в межах від 0.04 дБ до 0.19 дБ,.

1.3 Опис та метрологічні характеристики Державного первинного еталону ОЗТ у повітряному середовищі ДЕТУ 10-01-00

Відтворення одиниці звукового тиску (Па) в повітряному середовищі відбувається шляхом калібрування лабораторних еталонних мікрофонів первинним методом взаємності відповідно до вимог міжнародних стандартів ДСТУ/ІЕС 61094-2:2009 [30] (за тиском) та ДСТУ/ІЕС 61094-3:2015 [49] (у вільному полі).

Еталон ДЕТУ 10-01-00 було створено та введено в експлуатацію 2000 р. Еталон складається із трьох незалежних еталонних вимірювальних установок,

кожна з яких дозволяє калібрувати мікрофони за різними типами чутливості та в різних частотних діапазонах, а саме:

- еталонна установка УЕ-1П – калібрування мікрофонів у вільному полі в діапазоні частот від 2 Гц до 125 Гц;
- еталонна установка УЕ-2П – калібрування мікрофонів за тиском в частотному діапазоні від 2 Гц до 25 кГц первинним методом взаємності;
- еталонна установка УЕ-3П – калібрування мікрофонів первинним методом взаємності у вільному полі в діапазоні частот від 1 кГц до 100 кГц.

Оскільки калібрування мікрофонів за тиском дозволяє досягнути найвищого рівня точності, тому еталонна установка УЕ-2П національного еталона ДЕТУ 10-01-00 є основною в складі еталона з точки зору визначення метрологічних характеристик цього еталона та встановлення ступеня його еквівалентності до аналогічних еталонів інших держав.

Національний еталон ДЕТУ 10-01-00 прийняв участь в трьох регіональних ключових звіреннях [6, 10]:

- COOMET.AUV.A-K1.1 – калібрування за тиском дюймових лабораторних еталонних мікрофонів типу LS1 в частотному діапазоні від 63 Гц до 8 кГц, учасники: Німеччина та Україна;
- COOMET.AUV.A-K2 – калібрування за тиском дюймових лабораторних еталонних мікрофонів типу LS1 в частотному діапазоні від 2 Гц до 250 Гц, учасники: Росія та Україна;
- COOMET.AUV.A-K3 – калібрування за тиском півдюймових лабораторних еталонних мікрофонів типу LS2 в частотному діапазоні від 31.5 Гц до 31.5 кГц, за участю акустичних лабораторій Данії, Польщі, Румунії, України та Росії.

За результатами цих звірень національний еталон ДЕТУ 10-01-00 було визнано еквівалентним до національних еталонів інших держав, а в базу даних KCDB VIPM внесено 17 рядків калібрувальних та вимірювальних можливостей (СМС) України в галузі акустики.

Структурна схема еталонної установки УЕ-2П представлена на рисунку 1.5, а спрощена схема вимірювань електричного передавального імпедансу пари мікрофонів – на рисунку 1.6.

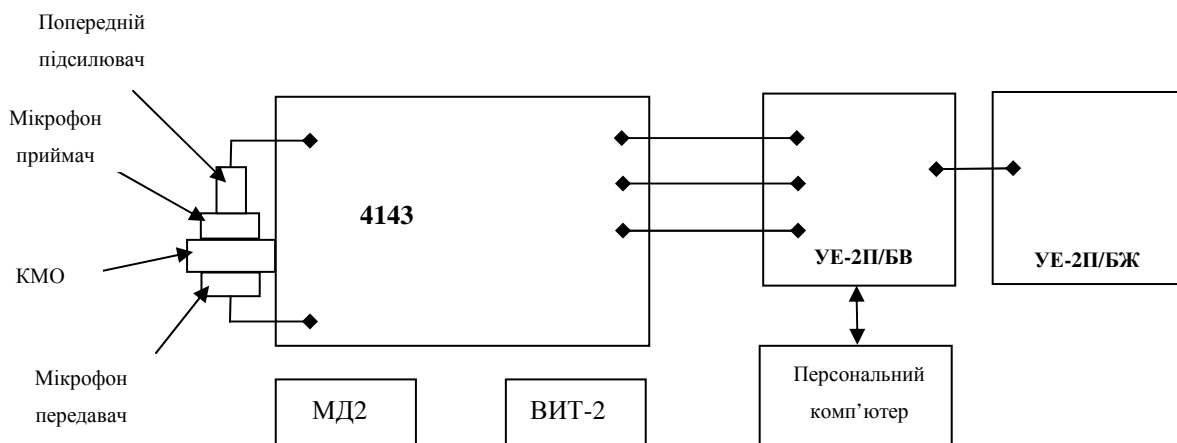


Рисунок 1.5 – Структурна схема еталонної установки УЕ-2П

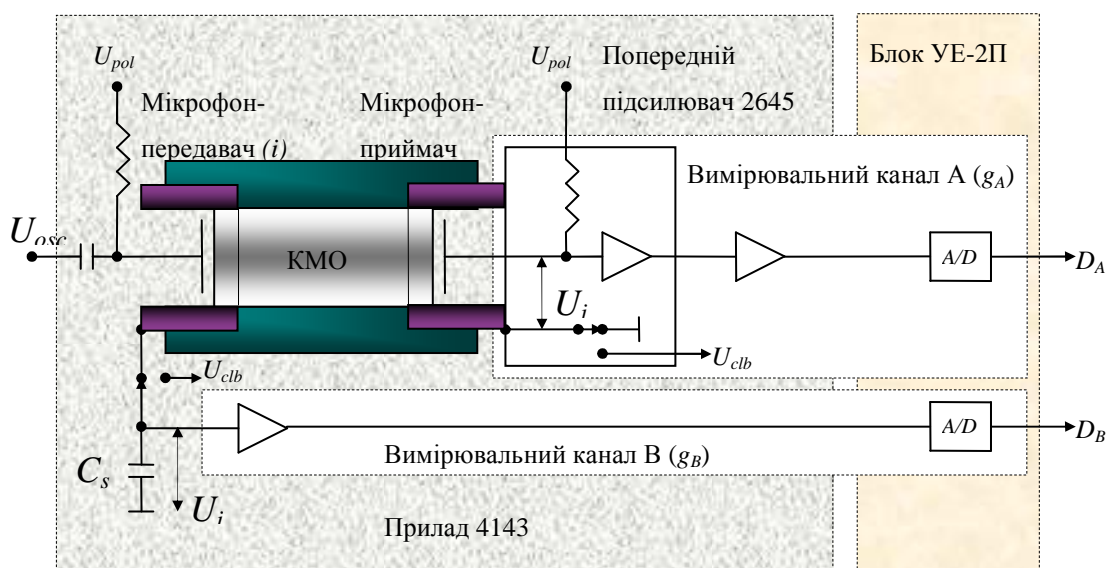


Рисунок 1.6 – Спрощена схема вимірювань електричного передавального імпедансу пари мікрофонів на еталонній установці УЕ-2П

Еталонна установка УЕ-2П складається із:

- Блока вимірювального (УЕ-2П/БВ), який, в свою чергу, складається із двох вимірювальних каналів, модуля генератора та модуля керування;

- Блока живлення (УЕ-2П/БЖ), який створює напруги живлення необхідні для роботи УЕ-2П/БВ;
- Приладу для калібрування мікрофонів методом взаємності типу 4143;
- КМО (– для калібрування мікрофонів типу LS1, та – для калібрування мікрофонів типу LS2);
- Попереднього підсилювача мікрофона-приймача типу 2673;
- Приладів МД2 та ВИТ-2 які визначають параметри довкілля під час проведення вимірювань;
- Персонального комп'ютера із прикладним програмним забезпеченням, який дозволяє проводити калібрування мікрофонів в автоматичному режимі та формувати протоколи вимірювань.

Оцінення непевності вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів на первинному акустичному еталоні проводилась відповідно до вимог GUIDE 98-3 (GUM:1995) [50]. Однак, оскільки модельна функція є доволі складною та суттєво нелінійною, то використання аналітичного методу, який потребує лінеаризації модельної функції та оцінки залишку ряду Тейлора є доволі проблематичним.

Тому для оцінки непевності було використано метод числового диференціювання [2-5]. В цьому методі відгуки $u_k(y)$, які являють собою складові непевності вихідної величини y , і які зв'язані з непевністю k -тої вхідної величини x_k , розраховують як частковий приріст модельної функції Δf_k при заданому відхиленні значення x_k від номінального:

$$u_k(y) = \Delta f_k = f(x_k)^+ - f(x_0) \quad (1.4)$$

де: $f(x_0)$ – величина модельної функції при номінальних значеннях всіх вхідних величин в заданій точці простору параметрів;

$f(x_k)^+$ – величина модельної функції при номінальних значеннях всіх вхідних величин за виключенням однієї k -тої вхідної величини x_k , яку

підставляють із відхиленням від її номінального значення на величину, яка дорівнює її стандартній непевності.

Після чого, із врахуванням можливих кореляційних зв'язків, розраховують стандартну непевність типу B, сумарну стандартну непевність u_c та розширену непевність U вимірювань для заданого рівня довірчої імовірності.

В Таблиці 1.1 приведено бюджет непевності вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів, який було представлено на міжнародних збірках COOMET.AUV.A-K1.1.

1.4 Вибір напрямків удосконалення та дослідження Державного первинного еталону ОЗТ у повітряному середовищі

Джерела непевності під час калібрування на первинному еталоні ДЕГУ 01-10-00 можна згрупувати за факторами впливу:

- перша група – це непевність вимірювань електричного передавального імпедансу. Електричний передавальний імпеданс пари мікрофонів визначають як відношення напруги на виході ненавантаженого мікрофона-приймача до струму збудження, який протікає через мікрофон-передавач. В свою чергу, струм збудження мікрофона-передавача визначають як спад напруги на еталонному конденсаторі, який включено послідовно до цього мікрофона. Тобто, до цієї групи входять непевності вимірювання відношення напруг та ємності еталонного конденсатора;
- на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу пари мікрофонів впливає визначення параметрів довкілля під час калібрування;
- ще одна група вхідних величин, що суттєво впливають на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу пари мікрофонів є непевності параметрів мікрофонів (фронтальний та еквівалентний об'єми, глибина та

Таблиця 1.1 – Бюджет непевності вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів, який було представлено ДП НДІ «Система» на міжнародних збірках СОOMET.AUV.A-K1.1.

	Вхідна величина	Позначення	Стандартна непевність в залежності від частоти				
			63 Гц	250 Гц	1000 Гц	4000 Гц	10000 Гц
Тип А (10^{-4} дБ)							
1	Повторюваність вимірювань		152	132	105	87	512
Тип В (10^{-4} дБ)							
2	Відношення напруг	U_{12}	81	81	61	61	61
3	Відношення напруг	U_{13}	81	81	61	61	61
4	Відношення напруг	U_{23}	81	81	61	61	61
5	Температура	T	2	2	3	13	18
6	Статичний тиск	p_s	46	45	46	59	31
7	Відносна вологість	H	2	2	2	3	14
8	Ємність конденсатора	C_s	25	25	25	25	25
9	Частота	f	0	0	1	33	68
10	Тиск насичених парів	p_m	0	0	0	0	2
11	Акустична податливість	C	83	83	79	22	32
12	Акустична маса	L	0	0	2	11	88
13	Акустичний опір	R	0	0	7	71	77
14	Відношення $V_{e(r)}/V_{e(i)}$	α	0	0	3	35	44
15	Глибина порожнини	l_F	122	122	121	90	145
16	Довжина камери	l_{c1}	1	0	1	15	113
17	Довжина камери	l_{c2}	1	0	1	18	136
18	Діаметр камери	d_c	1	0	0	0	0
19	Діаметр порожнини	d_F	26	26	26	26	27
20	Об'єм камери	V_c	1	1	1	1	2
21	Напруга поляризації	U_p	13	13	13	13	13
22	Резонансна частота	f_0	0	0	0	8	62
23	Коефіцієнт тиску	a_{0ps}	29	29	29	29	29
24	Коефіцієнт температури	a_{0t}	24	24	24	24	24
	Сумарна стандартна непевність типу В		216	215	193	185	305
	Заявлена розширена непевність ($k=2$), дБ		0,05	0,05	0,04	0,04	0,12

діаметр фронтальної порожнини, резонансна частота, коефіцієнт втрат;

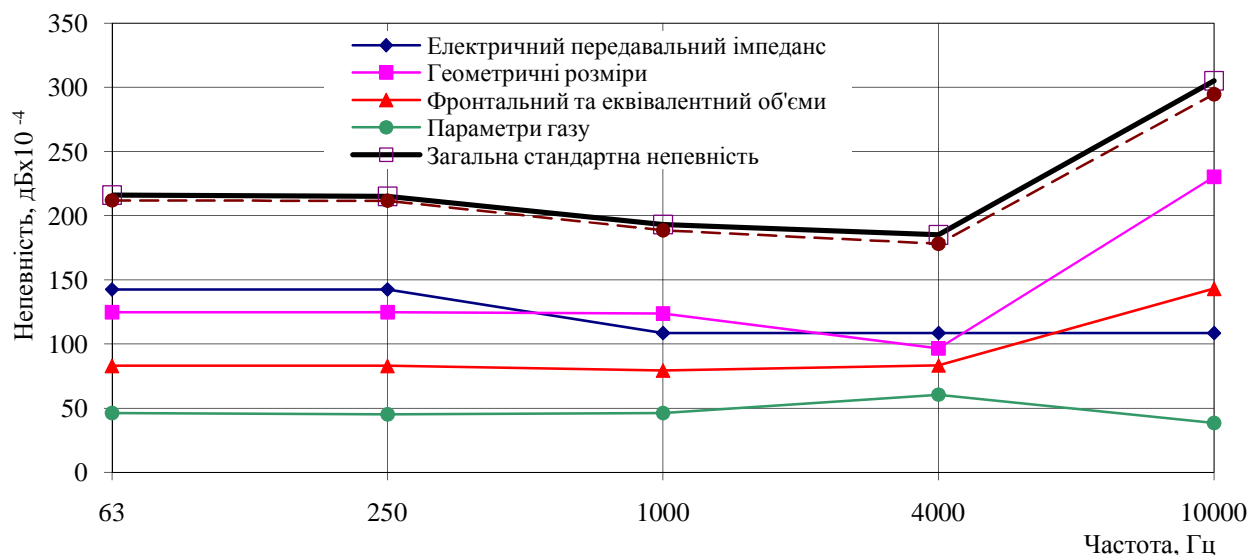
- на непевність вимірювань також суттєво впливає непевність визначання геометричних розмірів мікрофонів та КМО;
- однією із головних складових непевності вимірювань під час калібрування на первинному еталоні ДЕТУ 01-10-00 є повторюваність вимірювань – непевність за типом А.

В таблиці 1.2 та на рисунку 1.7 представлені частотні залежності непевності вимірювань на первинному еталоні від вхідних величин, які згруповано за факторами впливу.

Таблиця 1.2 – Частотні залежності непевності вимірювань на первинному еталоні від вхідних величин, які згруповано за факторами впливу

Непевність у дБ·10⁻⁴

Частота, Гц	63	250	1000	4000	10000
Електричний передавальний імпеданс	143	143	109	109	109
Параметри довкілля	46	45	46	60	38
Параметри мікрофонів	83	83	79	83	143
Геометричні розміри мікрофонів та КМО	125	125	124	97	230
Сумарна стандартна непевність за типом В	212	212	189	178	295



Рисунк 1.7 – Графічне представлення частотних залежностей непевності вимірювань на первинному еталоні від непевностей вхідних величин, які згруповано за факторами впливу.

Очевидно, що зменшення непевності кожної групи цих вхідних величин, а також зменшення стандартної непевності вимірювань за типом А (СКВ вимірювань), суттєво вплине на підвищення характеристик точності первинного акустичного еталона.

1.5 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз характеристик акустичних еталонних перетворювачів;
2. Розглянуто та проаналізовано існуючі методи відтворення ОЗТ, зазначено, що калібрування мікрофонів за тиском первинним методом взаємності дозволяє досягти найвищого рівня точності;
3. Розглянуто вимірювальні можливості провідних закордонних лабораторій в цій галузі, зазначено, що вони постійно удосконалюються;
4. Проаналізовано метрологічні характеристики ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі та вказано, що вони не відповідають сучасному стану вимірювань в цій галузі;
5. Визначено теоретичні засади і розроблено шляхи удосконалення діючого

еталону – зменшення непевності визначення: електричного передавального імпедансу; параметрів довкілля; параметрів мікрофонів та їх геометричних розмірів; параметрів КМО та зменшення стандартної непевності вимірювань за типом А.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СКЛАДОВИХ НЕПЕВНОСТІ ПІД ЧАС ВІДТВОРЕННЯ ОЗТ У ПОВІТРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

2.1 Математична модель відтворення ОЗТ

Якщо конденсаторний мікрофон використати в якості джерела звуку та подати на нього змінний сигнал збудження, то це викличе змінний в часі рух діафрагми мікрофона. Середовище, в даному випадку – повітря, яке знаходиться навколо цієї діафрагми, буде розширюватись та стискатись під дією цього руху, та розповсюджуватись як звуковий тиск.

Якщо в поле цього звукового тиску помістити інший мікрофон, то звукова хвиля буде діяти на діафрагму мікрофона, тобто, зміна відстані між діафрагмою та задньою пластиною мікрофона викличе зміну ємності цього мікрофона, що проявиться як змінна напруга на його електричних виходах.

Таким чином, для того щоб визначити фактичну передавальну функцію між входом мікрофона передавача та виходом мікрофона приймача необхідно розв'язати хвильове рівняння за зазначених граничних умов. Але, оскільки безпосереднє вирішення цього рівняння є доволі складною задачею, то загальноприйнятим підходом до її розв'язання є аналіз спрощеної системи, в яку входять три окремі складові, тобто, мікрофон передавач, середовище розповсюдження та мікрофон приймач [51]. Ці складові можна змоделювати окремо та знайти загальне рішення. Ця задача спроститься, якщо взяти до уваги що під час калібрування у полі тиску, довжина хвилі є значно більшою за розміри акустичної камери та мікрофонів, тобто амплітуда та фаза цього поля буде однаковою в кожній точці цього поля.

Моделювання мікрофонів

Конденсаторний мікрофон можна розглядати як обернений перетворювач. Це означає, що коли на його акустичний вхід діє сигнал акустичного збудження, на його електричному виході виникне електричний сигнал та

навпаки. Мікрофон можна представити як чотирьохполюсник та скласти систему канонічних рівнянь:

$$\underline{U} = \underline{z}_{11}\underline{i} + \underline{z}_{12}\underline{q} \quad (2.1)$$

$$\underline{p} = \underline{z}_{21}\underline{i} + \underline{z}_{22}\underline{q}$$

Де: \underline{U} - напруга сигналу на електричному виході мікрофона, у вольтах (В);

\underline{p} - рівномірно розподілений звуковий тиск на акустичному виході мікрофона, у паскалях (Па);

\underline{q} - об'ємна швидкість на акустичному виході (діафрагмі) мікрофона, у кубічних метрах за секунду ($\text{м}^3/\text{с}$);

\underline{i} - струм, який протікає через електричний вихід мікрофона, в амперах (А);

$\underline{z}_{11} = \underline{Z}_e$ - електричний імпеданс мікрофона, коли його діафрагма заблокована, в омах (Ом);

$\underline{z}_{22} = \underline{Z}_a$ - акустичний імпеданс мікрофона, коли його електричний вихід ненавантажено, в паскаль на секунду до кубічного метра ($\text{Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$);

$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{z}_T$ - прямий та зворотній передавальний імпеданс, які для обернених перетворювачів рівні між собою, у вольт на секунду до кубічного метра ($\text{В}\cdot\text{с}/\text{м}^3$).

Для того, щоб знайти значення передавального імпедансу мікрофона розглянемо сили, які діють на його мембрану під час його збудження акустичним сигналом. Елементарні вирази для сили притягання між двома протилежно зарядженими пластинами, f_e , (електростатична сила), та для ємності конденсатора, який складається із паралельних пластин, C , ϵ :

$$f_e = \frac{-Q_e}{2\epsilon_0 S} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d+x} \quad (2.3)$$

Де:

Q_e - електричний заряд, в кулонах (Кл);

ϵ_0 - діелектрична проникність, в кулонах до другої степені до ньютонна

на метр квадратний ($\text{Кл}^2/\text{Н}\cdot\text{м}^2$);

S - площа пластин, у метрах квадратних (м^2);

d - відстань між пластинами, у метрах (м);

x - відхил від положення рівноваги, який виникає внаслідок дії сил збудження, у метрах (м).

Рівновагу сил, які діють на мембрану мікрофона, можна представити у вигляді диференційного рівняння [51]:

$$\begin{aligned} f_A + f_e &= L_m \ddot{x} + R_m \dot{x} + \frac{1}{C_m} x \\ f_A &= L_m \ddot{x} + R_m \dot{x} + \frac{1}{C_m} x + \frac{Q_e^2}{2\varepsilon_0 S} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Де:

f_A - акустична сила;

L_m - акустична маса мембрани мікрофона;

R_m - акустичний опір мембрани мікрофона;

C_m - акустична гнучкість мембрани мікрофона.

Так само можна отримати рівновагу напруг для електричної частини мікрофона:

$$\begin{aligned} U_0 + u &= L_e \ddot{Q}_e + R_e \dot{Q}_e + \frac{Q_e}{C_e} \\ U_0 + u &= L_e \ddot{Q}_e + R_e \dot{Q}_e + \frac{Q_e(d+x)}{\varepsilon_0 S} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Де:

U_0 - напруга поляризації;

u - змінна напруга сигналу

L_e - електрична індуктивність мембрани мікрофона;

R_e - електричний опір мембрани мікрофона;

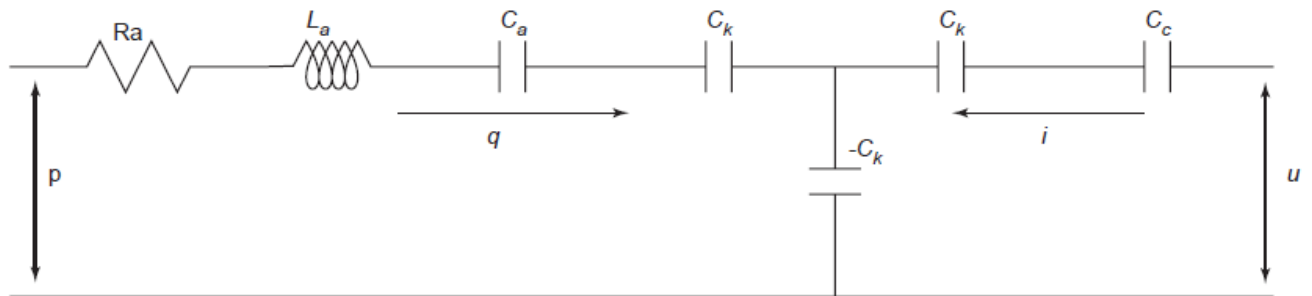
C_e - електрична ємність мембрани мікрофона.

Розв'язок цих рівнянь [51] дає змогу визначити передавальний імпеданс мікрофона:

$$Z_T = \frac{1}{j\omega C_k} \quad (2.6)$$

$$C_k = \frac{\varepsilon_0 S}{Q_{e,0}} \quad (2.7)$$

А це, в свою чергу, дає можливість створити еквівалентну схему мікрофона, яка представлена на рисунку 2.1 [51], та яку можна використати для аналізу його властивостей.



Позначки:	C_a	- акустична гнучкість діафрагми мікрофона;
	L_a	- акустична маса діафрагми мікрофона;
	R_a	- акустичний опір мікрофона;
	C_k	- гнучкість, яка виникає внаслідок електроакустичного зв'язку;
	C_c	- електрична ємність мікрофона, коли його діафрагма заблокована;
	q	- об'ємна швидкість діафрагми;
	p	- звуковий тиск на діафрагмі;
	i	- електричний струм, який протікає через електричні виходи мікрофона;
	u	- напруга на електричних виходах мікрофона.

Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема мікрофона

Відповідно до цієї схеми, напруга на електричних виходах мікрофона дорівнює:

$$u = -\frac{1}{j\omega C_k} q + \frac{1}{j\omega C_c} i \quad (2.8)$$

А звуковий тиск на діафрагмі мікрофона:

$$p = Z_a q - \frac{1}{j\omega C_k} i \quad (2.9)$$

Де: Z_a - акустичний імпеданс діафрагми, який розраховують як:

$$Z_a = \frac{1}{j\omega C_a} + j\omega L_a + R_a \quad (2.10)$$

Тепер можливо визначити чутливість мікрофона за тиском, яка дорівнює відношенню напруги холостого ходу на електричних виходах мікрофона до звукового тиску, який діє на його діафрагму, якщо цей тиск розподілено

рівномірно по діаграмі:

$$M_p = \frac{u}{p} \Big|_{i=0} = \frac{-\frac{1}{j\omega C_k} q}{Z_a q} = -\frac{1}{j\omega C_k Z_a} \quad (2.11)$$

Однак, акустичний імпеданс діафрагми мікрофона можна також визначити через його еквівалентний об'єм, який є комплексною величиною та залежить від частоти. Використання еквівалентного об'єму замість імпедансу діафрагми спрощує оцінення впливу мікрофона на звуковий тиск невеликих акустичних систем, наприклад порожнин акустичних камер малого об'єму. Еквівалентний об'єм діафрагми – це такий об'єм повітря, який має таку саму гнучкість або імпеданс, що і сама діафрагма.

Загалом, акустичну гнучкість, C_{air} , об'єму газу (повітря) визначають за формулою [22]:

$$C_{air} = \frac{V}{\gamma P_s}$$

Де: V - об'єм порожнини, м³;

γ - відношення питомих теплоємностей;

P_s - статичний тиск газу в порожнині, Па.

Відповідно, гнучкість діафрагми мікрофона:

$$C_a = \frac{V_e}{\gamma P_s} \quad (2.12)$$

Де: V_e - еквівалентний об'єм діафрагми, м³.

Таким чином, еквівалентний об'єм діафрагми мікрофона дорівнює:

$$\underline{V_e} = \frac{\gamma P_s}{j\omega \underline{Z_d}} \quad (2.13)$$

Де: $\underline{Z_d}$ - імпеданс діафрагми.

У випадку, коли можна знехтувати навантаженням на електричних виходах мікрофона, еквівалентна схема, яку представлено на рисунку 2.1, стає більш спрощеною, так що:

$$C_a = \frac{C_d C_c}{C_d + C_c}; L_a = L_d + L_s; R_a = R_s \quad (2.14)$$

Де: C_d - гнучкість діафрагми;

C_c - акустична гнучкість внутрішньої порожнини;

L_d - маса діафрагми;

L_s - акустична маса щілини позаду діафрагми;

R_s - акустичний опір щілини позаду діафрагми.

Тоді, еквівалентний об'єм мікрофона дорівнює:

$$V_e = \frac{\gamma P_s}{j\omega[(j\omega C_a)^{-1} + j\omega L_a + R_a]} \quad (2.15)$$

Іншим варіантом розрахунку еквівалентного об'єму мікрофона є розрахунок за формулою [22]:

$$V_e(f) = V_{e,lf} \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2} + j \frac{f}{f_0} Q^{-1} \right)^{-1} \quad (2.16)$$

Де: $V_{e,lf}$ - низькочастотний еквівалентний об'єм діафрагми, який розраховують як:

$$V_{e,lf} = \gamma P_s C_a;$$

f_0 - резонансна частота діафрагми, яку розраховують як:

$$f_0 = (2\pi\sqrt{C_a L_a})^{-1};$$

Q - коефіцієнт втрат діафрагми мікрофона, який розраховують як:

$$Q = \sqrt{\frac{L_a}{C_a} R_a^{-2}}.$$

Реалізація методу взаємності

Конденсаторний мікрофон – це обернений перетворювач, тобто, його можна використовувати і як джерело звуку (мікрофон-передавач) і як приймач звуку. Тоді, якщо акустично з'єднати мікрофон-передавач та мікрофон-приймач за допомогою камери малого об'єму (КМО), та знати акустичний передавальний імпеданс такої системи, то можна визначити добуток чутливостей цих мікрофонів. Еквівалентна схема такого з'єднання представлена на рисунку 2.2 [30].

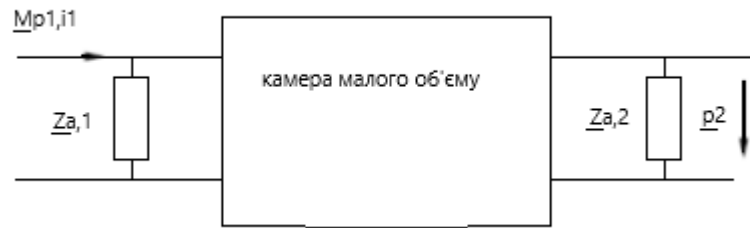


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема вимірювань під час визначення чутливості мікрофонів за тиском

Якщо припустити, що мікрофон-передавач має чутливість затиском \underline{M}_{p1} , а мікрофон-приймач - \underline{M}_{p2} , то, відповідно до рівняння (1.3), струм, \underline{i}_1 , через електричні виходи мікрофона-передавача створить коротко-замкнену об'ємну швидкість ($\underline{p} = 0$ на діафрагмі мікрофона), яка буде дорівнювати $\underline{M}_{p1}\underline{i}_1$, і таким чином, звуковий тиск на акустичному вході мікрофона-приймача буде дорівнювати $\underline{p}_2 = \underline{Z}_{a,12}\underline{M}_{p1}\underline{i}_1$, де $\underline{Z}_{a,12}$ – акустичний передавальний імпеданс системи.

Тоді, напруга холостого ходу на виході мікрофона-приймача буде:

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{p2} \cdot \underline{p}_2 = \underline{Z}_{a,12}\underline{M}_{p1}\underline{M}_{p2}\underline{i}_1$$

А добуток чутливостей цих мікрофонів можна визначити за формулою:

$$\underline{M}_{p1}\underline{M}_{p2} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,12}} \frac{\underline{U}_2}{\underline{i}_1} = \frac{\underline{Z}_{e,12}}{\underline{Z}_{a,12}} \quad (2.17)$$

де: $\underline{Z}_{e,12}$ – електричний передавальний імпеданс пари мікрофонів.

Якщо, в свою чергу, взяти три мікрофона, позначити їх як 1, 2 та 3, скласти із них три пари, 1-2, 1-3 та 2-3 мікрофони, то, таким чином, можна отримати систему із трьох лінійних рівнянь з трьома невідомими, рішення якої, для чутливості першого мікрофона, буде [30]:

$$\underline{M}_{p1} = \left(\frac{\underline{Z}_{e,12}\underline{Z}_{e,13}}{\underline{Z}_{e,23}} \frac{\underline{Z}_{a,23}}{\underline{Z}_{a,12}\underline{Z}_{a,13}} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

Акустичний передавальний імпеданс системи можна визначити теоретично, якщо звуковий тиск буде однаковий у всіх точках КМО, що має місце, коли довжина акустичної хвилі значно більше розмірів цієї КМО. Тоді

газ в камері поводить себе як просто як гнучкість, тобто акустичний передавальний імпеданс системи із двох мікрофонів та КМО дорівнює [30]:

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,V}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}} = j\omega \left(\frac{V}{\kappa p_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_{ref} p_{s,ref}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_{ref} p_{s,ref}} \right) \quad (2.19)$$

Де: V - загальний геометричний об'єм КМО;

$V_{e,1}$ - еквівалентний об'єм мікрофона-передавача;

$V_{e,2}$ - еквівалентний об'єм мікрофона-приймача;

$Z_{a,V} = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$ - акустичний імпеданс газу, який знаходиться в КМО;

ω - кутова частота;

p_s - статичний тиск повітря;

$p_{s,r}$ - статичний тиск повітря за опорних умов довкілля ($p_{s,ref} = 101325\text{Па}$);

κ - відношення питомих теплоємностей під час проведення вимірювань;

κ_{ref} - відношення питомих теплоємностей за опорних умов довкілля.

На високих частотах, коли розміри КМО є співмірними із довжиною хвилі, цю систему можна розглядати як однорідну передавальну лінію, за умов, що КМО має циліндричну форму та діаметр, який дорівнює діаметру діафрагми мікрофона, а також за умов плоско-хвильового розповсюдження сигналу та адіабатичного стискання та розширення газу. В цьому випадку акустичний імпеданс системи розраховують за формулою [30]:

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,0}} \left[\left(\frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \cosh(\underline{\gamma} l_0) + \left(1 + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \sinh(\underline{\gamma} l_0) \right] \quad (2.20)$$

Де: $Z_{a,0}$ - акустичний імпеданс плоских хвиль в КМО;

l_0 - довжина камери, тобто, відстань між діафрагмами мікрофонів;

$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$ - комплексний коефіцієнт розповсюдження. Дійсна частина цього коефіцієнту враховує втрати на в'язкість та теплопровідність на циліндричній поверхні КМО, а уявна частина – це кутове хвильове число.

Однак, в закритих камерах теплопровідність між повітрям та стінками

камер викличе поступовий перехід від адіабатичних до ізотермальних умов. Точний характер цього переходу залежить від робочої частоти та розмірів камери. Крім того, рух частинок вздовж стінок камери викличе появу втрат на в'язкість. Ці явища вплинуть на значення звукового тиску, який створює мікрофон-передавач, і їх вплив необхідно враховувати під час розрахунку акустичного імпедансу системи.

На низьких частотах, коли можна припустити, що звуковий тиск є однаковим у всіх точках камери, вплив теплопровідності враховують через уявне збільшення об'єму камери за допомогою комплексного поправного коефіцієнта, $\underline{\Delta}_H$, до геометричного об'єму камери V в рівнянні (2.19):

$$\underline{\Delta}_H = \frac{\kappa}{1 + (\kappa - 1)\underline{E}_V} \quad (2.21)$$

Де: \underline{E}_V - комплексна передавальна функція температури, яку визначають як відношення синусоїдальної зміни температури, усередненої за простором, викликаной звуковим тиском, до синусоїдальної зміни температури, яка виникла б у випадку, коли стінки камери абсолютно не проводили тепло. Її розраховують за формулою [30]:

$$\underline{E}_V = 1 - \underline{S} + D_1 \underline{S}^2 + (3/4)\sqrt{\pi} D_2 \underline{S}^3 \quad (2.22)$$

Де:

$$\underline{S} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi} X_v} \quad (2.23)$$

$$D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi(2R+1)^2} \quad (2.24)$$

$$D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi}(2R+1)^3} \quad (2.25)$$

$$R = \frac{l_c}{d_c} \quad (2.26)$$

$$X_v = \frac{fl^2}{\kappa \alpha_t} \quad (2.27)$$

$$l = \frac{V_c}{S_c} \quad (2.28)$$

Де: l_c - довжина камери;

d_c - діаметр камери;

f - частота сигналу;

α_t - коефіцієнт теплової дифузії газу, який знаходиться в камері;

V_c - об'єм камери;

S_c - площа внутрішньої поверхні камери.

На високих частотах, крім втрат на теплопровідність, з'являються втрати пов'язані із в'язкістю, вплив яких фактично зменшує площу поперечного перетину камери внаслідок появи граничного шару біля поверхонь але, в той самий час, збільшує фактичну довжину камери внаслідок зменшення швидкості звуку. На низьких частотах вплив цих двох факторів компенсує один одного, хоча вплив теплопровідності залишається. Значення комплексного коефіцієнту розповсюдження та акустичного імпедансу камери розраховують на основі теорії Кірхгофа [30] за формулами:

$$\underline{\gamma} = j \frac{\omega}{c} \left[1 + \frac{1-j}{\sqrt{2}} \frac{1}{a} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega \rho}} + (\kappa - 1) \sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}} \right) \right] \quad (2.29)$$

$$\underline{Z}_{a,0} = \frac{\rho c}{S_0} \left[1 + \frac{1-j}{\sqrt{2}} \frac{1}{a} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega \rho}} - (\kappa - 1) \sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}} \right) \right] \quad (2.30)$$

Де: S_0 - площа перетину КМО;

ρ - густина газу, який знаходиться в КМО;

c - швидкість звуку в газі, який знаходиться в КМО;

η - в'язкість газу, який знаходиться в КМО;

a - радіус КМО.

Крім того, втрати на теплопровідність виникають і на торцевих поверхнях камери (діафрагмах мікрофонів), що враховують за допомогою адмітансу, який додають до адмітансу кожного мікрофону в рівнянні (2.20):

$$\frac{1}{\underline{Z}_{a,h}} = \frac{S_0}{\rho c} \frac{1+j}{\sqrt{2}} (\kappa - 1) \frac{1}{c} \sqrt{\alpha_t \omega} \quad (2.31)$$

Як видно із рівнянь (2.20) – (2.25) на чутливість мікрофонів впливають величини, які описують властивості газу, що знаходиться в КМО під час вимірювань (зазвичай, це повітря). Ці величини залежать від умов довкілля, тобто, температури, статичного тиску та відносної вологості повітря під час

вимірювань. Значення цих величин розраховують на основі процедур, які рекомендовані міжнародними організаціями та знайшли загальне визнання.

Густина вологого повітря

Густина вологого повітря розраховують за формулою [30]:

$$\rho = \left[3.48374 + 1.4446(x_c - 0.0004) \times 10^3 \frac{p_s}{ZT} (1 - 0.378x_w) \right] \quad (2.32)$$

Де: x_c - молярна частка вуглекислого газу у повітрі;

T - термодинамічна температура газу, в Кельвінах;

$$Z = 1 - [a_{\rho,0} + a_{\rho,1}t + a_{\rho,2}t^2 + (a_{\rho,3} + a_{\rho,4}t)x_w + (a_{\rho,5} + a_{\rho,6}t)x_w^2] + \frac{p_s^2}{T^2}(a_{\rho,7} + a_{\rho,8}x_w^2)$$

$$x_w = \frac{H}{100} \frac{p_{sv}(t)}{p_s} f(p_s, t)$$

$$p_{sv}(t) = \exp(a_{\rho,0}T^2 + a_{\rho,1}T + a_{\rho,2} + a_{\rho,3}T^{-1})$$

$$f(p_s, t) = a_{\rho,0} + a_{\rho,1}p_s + a_{\rho,2}t^2$$

Де: H - відносна вологість, у відсотках;

$a_{\rho,i}$ - коефіцієнти поліному для розрахунку густини повітря.

Швидкість звуку у повітрі

За відсутності розсіювання, швидкість звуку у повітрі визначає швидкість звуку нульової частоти відповідно до формули [30]:

$$c_0 = a_{c,0} + a_{c,1}t + a_{c,2}t^2 + (a_{c,3} + a_{c,4}t + a_{c,5}t^2)x_w + \\ (a_{c,6} + a_{c,7}t + a_{c,8}t^2)p_s + (a_{c,9} + a_{c,10}t + a_{c,11}t^2)x_c + a_{c,12}x_w^2 + a_{c,13}p_s^2 + \\ a_{c,14}x_c^2 + a_{c,15}x_w p_s x_c$$

Де: $a_{c,i}$ - коефіцієнти поліному для розрахунку швидкості звуку у повітрі.

Швидкість звуку має незначну частотну залежність внаслідок розсіювання, яке виникає від ефектів релаксації для складових частин повітря. Швидкість звуку для робочої частоти можна розрахувати за формулою:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} - \sum_n \frac{\alpha_{vn}}{2\pi f_{vn}} \quad (2.33)$$

Де: α_{vn} - коефіцієнт затухання складової повітря;

f_{vn} - частота релаксації складової повітря;

n - позначка складової повітря (азот або кисень).

Відношення питомих теплоємностей повітря розраховують за формулою:

$$k = a_{k,0} + a_{k,1}t + a_{k,2}t^2 + (a_{k,3} + a_{k,4}t + a_{k,5}t^2)x_w + (a_{k,6} + a_{k,7}t + a_{k,8}t^2)ps + (a_{k,9} + a_{k,10}t + a_{k,11}t^2)xc + (a_{k,12}x_w^2 + a_{k,13}ps^2 + a_{k,14}xc^2 + a_{k,15}x_w psxc) \quad (2.34)$$

Де: $a_{k,i}$ - коефіцієнти поліному для розрахунку відношення питомих теплоємностей повітря.

В'язкість повітря розраховують за формулою [30]:

$$\eta = [a_{\eta,0} + a_{\eta,1}T + (a_{\eta,2} + a_{\eta,3}T)x_w + a_{\eta,4}T^2 + a_{\eta,5}x_w^2] \times 10^{-8} \quad (2.35)$$

Де: $a_{\eta,i}$ - коефіцієнти поліному для розрахунку в'язкості повітря.

Коефіцієнт теплової дифузії повітря розраховують за формулою:

$$\alpha_t = \frac{k_a}{\rho C_p} \quad (2.36)$$

Де: k_a - теплопровідність повітря, яку розраховують відповідно до:

$$k_a = 4186.8 \times [a_{\alpha,0} + a_{\alpha,1}T + a_{\alpha,2}T^2 + (a_{\alpha,3} + a_{\alpha,4}T)x_w] \times 10^{-8}$$

C_p - питома теплоємність при постійному тиску, яку розраховують відповідно до:

$$C_p = 4186.8 \times [a_{p,0} + a_{p,1}T + a_{p,2}T^2 + a_{p,3}T^3 + (a_{p,4} + a_{p,5}T + a_{p,6}T^2)x_w + (a_{p,7} + a_{p,8}T + a_{p,9}T^2)x_w^2]$$

Де: $a_{\alpha,i}$ - коефіцієнти поліному для розрахунку теплопровідності повітря;

$a_{p,i}$ - коефіцієнти поліному для розрахунку питомої теплоємності.

Вплив умов довкілля

Крім того, слід зазначити, що чутливість конденсаторних мікрофонів буде завжди залежати від умов довкілля, а саме, статичного тиску, температури та відносної вологості повітря під час проведення вимірювань. Ця залежність пояснюється конструкцією самих мікрофонів, тобто, акустичними властивостями повітря, яке знаходиться за мембраною мікрофона, та механічною конструкцією мікрофона. Очевидно, що цієї залежності не можна уникнути, тому її необхідно враховувати із необхідною точністю, а саму

чутливість мікрофонів під час калібрування потрібно приводити до опорних умов довкілля, із метою отримання результатів, які можна порівнювати між собою. Відповідно до міжнародного стандарту [30] опорними умовами довкілля є:

- температура повітря – $t_{ref} = 23.0 \text{ }^\circ\text{C}$;
- статичний тиск – $p_{s,ref} = 101325 \text{ Па}$;
- відносна вологість повітря – $RH_{ref} = 50\%$.

Теоретичні та практичні дослідження коефіцієнтів температури та статичного тиску для лабораторних еталонних мікрофонів описані К. Расмуссеном в статті [38]. В цій статті розглянуто теоретичний вплив умов довкілля на імпеданс діафрагми мікрофона, на імпеданс тонкого шару повітря, який знаходиться між діафрагмою та задньою пластиною мікрофона, на акустичний імпеданс отворів та прорізів у задній пластині та на акустичний імпеданс задньої порожнини мікрофона. В статті зроблено та підтверджено практичними результатами наступні висновки:

- вплив статичного тиску на чутливість на низьких частотах залежить тільки від гнучкості діафрагми та гнучкості задньої порожнини мікрофона, а, оскільки, у першому наближенні можна вважати, що об'єм задньої порожнини є постійним для даного типу мікрофона, то низькочастотний коефіцієнт статичного тиску, $\delta_{p,lf}$, буде пропорційний низькочастотній чутливості індивідуального мікрофона, тобто:

– для мікрофонів типу LS1 (B&K4160):

$$\delta_{p,lf} = -350 \times 10^{-6} M_{p,250}, \text{ дБ/В};$$

із $U = 0.0002 \text{ дБ/кПа}$,

де: $M_{p,250}$ – чутливість мікрофона за тиском на частоті 250 Гц;

U – розширена ($k = 2$) непевність вимірювань.

– для мікрофонів типу LS2 (B&K4180):

$$\delta_{p,lf} = -484 \times 10^{-6} M_{p,250}, \text{ дБ/В};$$

із $U = 0.0002 \text{ дБ/кПа}$.

- вплив температури на чутливість на низьких частотах викликає зміни механічної напруги діафрагми та ширини повітряного шару між діафрагмою та задньою пластиною мікрофона. Для лабораторних еталонних мікрофонів температурні коефіцієнти, $\delta_{t,lf}$, мають наступні значення:
 - для мікрофонів типу LS1 (B&K4160):

$$\delta_{t,lf} = -0.00247, \text{ дБ/К};$$

$$\text{із } U = 0.0019 \text{ дБ/К},$$
 - для мікрофонів типу LS2 (B&K4180):

$$\delta_{t,lf} = -0.00156, \text{ дБ/К};$$

$$\text{із } U = 0.0015 \text{ дБ/К}.$$
- відносна вологість повітря впливає тільки на його густину ρ , в першому наближенні, нею можна знехтувати під час приведення чутливості мікрофонів до опорних умов довкілля.

Отримані результати дійсні для статичного тиску, який знаходиться в межах від 80 кПа до 115 кПа, та для температури повітря в межах від 15 °С до 35 °С.

Загальний порядок розрахунку чутливості еталонних мікрофонів під час калібрування первинним методом взаємності регламентовано міжнародним стандартом [30].

Відповідно до [30] чутливість мікрофона слід подавати за опорних умов довкілля ($t_{ref} = 23 \text{ °С}$, $p_{ref} = 101325 \text{ Па}$, $H_{ref} = 50 \text{ \%}$):

$$\underline{M}_{pr} = \underline{M}_p - [\delta_p (p_s - p_{ref}) + \delta_t (t - t_{ref})] \quad (2.37)$$

Де: t , p_s , H – температура, статичний тиск, відносна вологість повітря під час вимірювань, відповідно;

\underline{M}_{pr} – чутливість мікрофона за тиском за опорних умов;

\underline{M}_{p1} – чутливість мікрофона за тиском під час вимірювань;

δ_p , δ_t – коефіцієнти статичного тиску та температури, відповідно;

$$\delta_m = a_0 + a_1 x + \dots + a_9 x^9, \quad x = \frac{f}{f_0}, \quad m \rightarrow p, t; \quad p \neq t \quad (2.38)$$

$a_0, a_1 \dots a_9$ – коефіцієнти полінома, які або визначають експериментально для кожного мікрофона індивідуально, або приймають їх типові значення [38].

f – частота, на якій визначають чутливість мікрофона;

f_0 – резонансна частота мікрофона.

Вплив радіально-хвильового руху

Визначення чутливості мікрофонів за тиском передбачає, що тиск по поверхні мембрани мікрофона розподілено рівномірно. Однак, на високих частотах ця вимога не виконується, оскільки мембрана мікрофона передавача рухається по закону, який можна описати функцією Бесселя (за умови, нехтування жорсткістю мембрани та наявністю нерухомої задньої пластини мікрофона). Таким чином, мікрофон передавач створює в КМО тиск, який характеризується радіально-хвильовим рухом, що, в свою чергу викликає нерівномірний розподіл тиску на мембрані мікрофона приймача. Загально прийнятий підхід до врахування цього явища під час калібрування мікрофонів є використання поправки до акустичного передавального імпедансу системи мікрофони - КМО [52], який у цьому випадку визначають за формулою:

$$\frac{1}{Z'_{a,tr}} = \frac{1}{Z_{a,tr}} \frac{q_{corr}}{p_{corr}} \quad (2.39)$$

Де: $\frac{1}{Z_{a,tr}}$ – акустичний передавальний імпеданс системи мікрофони – КМО, розрахований за формулою (2.20);

q_{corr} - поправний коефіцієнт першого порядку до акустичного передавального імпедансу (2.20), обумовлений радіально-хвильовим рухом в КМО за припущення, що акустичні імпеданси мікрофонів є безмежними;

p_{corr} - поправний коефіцієнт другого порядку до акустичного передавального імпедансу (2.20), обумовлений спільним впливом хвильового руху та обмеженим акустичним імпедансом мікрофонів.

$$q_{corr} = \frac{Z_{a,t} + Z_{a,ref}}{Z_{a,t} + Z_{a,c,t}} \frac{Z_{a,r} + Z_{a,ref}}{Z_{a,r} + Z_{a,c,r}} \quad (2.40)$$

Де: $Z_{a,t}, Z_{a,r}$ - акустичні передавальні імпеданси мікрофона передавача та мікрофона приймача, відповідно;

$Z_{a,ref}$ - вхідний імпеданс порожнини (закритої труби) для плоскої акустичної хвилі;

$Z_{a,c,t}, Z_{a,c,r}$ - імпеданс навантаження для мікрофона передавача та мікрофона приймача, відповідно.

2.2 Вплив непевності вимірювань електричного передавального імпедансу

Вимірювання електричного передавального імпедансу пари мікрофонів є одним із головних джерел непевності калібрування еталонних мікрофонів.

Електричний передавальний імпеданс пари мікрофонів визначають як відношення напруги, яка виникає на електричних виходах мікрофона-приймача, під дією акустичного тиску на його діафрагму до струму збудження, який протікає через мікрофон-передавач та створює цей акустичний тиск. Оскільки, струм збудження мікрофона-передавача визначають через спадок напруги на еталонному імпедансі (зазвичай, еталонній ємності), який включено послідовно до мікрофона, то електричний передавальний імпеданс дорівнює:

$$\underline{Z}_{e,ij} = \frac{1}{j\omega C_{ref}} \frac{U_i}{U_j} \quad (2.41)$$

Де: C_{ref} - еталонна ємність, у фарадах;

U_j - напруга, яка виникає на електричних виходах мікрофона-приймача, у вольтах;

U_i - спадок напруги на еталонній ємності, у вольтах.

Вимірювання відношення напруг (або $\underline{Z}_{e,ij}$), зазвичай, проводять в два етапи:

- на першому (етап "робота") визначають рівні сигналів в вимірювальних каналах разом із коефіцієнтами підсилення каналів:

$$D_{A1} = g_A U_j$$

$$D_{B1} = g_B U_i$$

$$R_1 = \frac{D_{A1}}{D_{B1}} \quad (2.42)$$

Де: D_{A1} та D_{B1} - покази в вимірювальному каналі А та В, відповідно;

g_A та g_B - коефіцієнти підсилення каналів А та В, відповідно.

- на другому (етап "калібрування") визначають відношення коефіцієнтів підсилення у вимірювальних каналах, коли на входи обох каналів одночасно подають одну і ту саму напругу калібрування:

$$D_{A2} = g_A U_{clb}$$

$$D_{B2} = g_B U_{clb}$$

$$R_2 = \frac{D_{A2}}{D_{B2}} \quad (2.43)$$

Де: U_{clb} - напруга калібрування каналів.

Таким чином, електричний передавальний імпеданс пари мікрофонів дорівнює:

$$\underline{Z}_{e,ij} = \frac{1}{j\omega C_{ref}} \frac{D_{A1}}{D_{B1}} \frac{D_{B2}}{D_{A2}} = \frac{1}{j\omega C_{ref}} \frac{R_1}{R_2} \quad (2.44)$$

Для такої схеми вимірювань головними джерелами непевності є:

- шуми вимірювальних каналів;
- часова нестабільність вимірювальних каналів;
- нелінійність вимірювальних каналів;
- мала розрядність аналого-цифрових перетворювачів у вимірювальних каналах;
- велика відстань між мікрофоном-передавачем та еталонним імпедансом, що призводить до появи паразитного імпедансу;
- перехресні завади між каналами.

2.2.1 Оцінення впливу шумів вимірювальних каналів

Оскільки рівень сигналів у вимірювальних каналах суттєво залежить від частоти та типу мікрофонів, які калібрують, то для оцінки впливу шумів на

точність визначення електричного передавального імпедансу пари мікрофонів логічно буде застосувати аналітичні методи моделювання. Якщо припустити, що шуми вимірювальних каналів це випадкові процеси із нормальним законом розподілу, які є незалежними в кожному каналі, то можна дослідити вплив цього фактору на непевність вимірювань чутливості мікрофонів за допомогою моделювання методом Монте-Карло. Формула (2.44) в такому випадку буде мати наступний вигляд:

$$\underline{Z}_{e,ij} = \frac{1}{j\omega C_{ref}} \frac{(D_{A1} + D_{A,n1})(D_{B2} + D_{B,n2})}{(D_{B1} + D_{B,n1})(D_{A2} + D_{A,n2})} \quad (2.45)$$

Де: $D_{A,n1}$, $D_{A,n2}$ - додаткові складові в показах АЦП вимірювального каналу А, які виникають внаслідок змінних в часі випадкових шумів на першому та другому етапах калібрування пари мікрофонів, відповідно;

$D_{B,n1}$, $D_{B,n2}$ - додаткові складові в показах АЦП вимірювального каналу В, які виникають внаслідок змінних в часі випадкових шумів на першому та другому етапах калібрування пари мікрофонів, відповідно.

На рисунку 2.3 представлено частотні залежності результатів моделювання методом Монте-Карло для 100000 спостережень впливу шумів вимірювальних каналів на стандартний відхил результатів калібрування для різних типів мікрофонів, коли ці шуми мають нормальний розподіл із математичним сподіванням 100 одиниць і різні значення стандартного відхилення.

На рисунку 2.4 представлено частотні залежності результатів моделювання методом Монте-Карло для 100000 спостережень впливу шумів вимірювальних каналів на стандартний відхил результатів калібрування для різних типів мікрофонів, коли ці шуми мають нормальний розподіл із різними значеннями математичного сподівання.

2.2.2 Оцінення впливу часової нестабільності вимірювальних каналів

Оскільки визначення електричного передавального імпедансу пари мікрофонів проводять у два етапи, то зміна в часі характеристик вимірювальних каналів буде впливати на непевність вимірювань під час

калібрування мікрофонів. Очевидно, що ця залежність буде мати лінійний характер та її необхідно уникати чи то шляхом покращення часової стабільності характеристик каналів, чи то зменшенням часу між проведенням різних етапів вимірювання електричного передавального імпедансу.

2.2.3 Оцінення впливу нелінійності вимірювальних каналів

Оскільки рівні сигналів під час калібрування вимірювальних каналів (другий етап вимірювань електричного передавального імпедансу), зазвичай, не будуть співпадати із рівнями сигналів, які спостерігались на першому етапі вимірювань, то можлива нелінійність динамічних характеристик вимірювальних каналів вплине на непевність вимірювань під час калібрування мікрофонів. Очевидно, що покращення лінійності в якнайбільшому динамічному діапазоні вимірювань підвищить точність калібрування мікрофонів, а саму нелінійність необхідно визначати та враховувати під час оцінення непевності вимірювань.

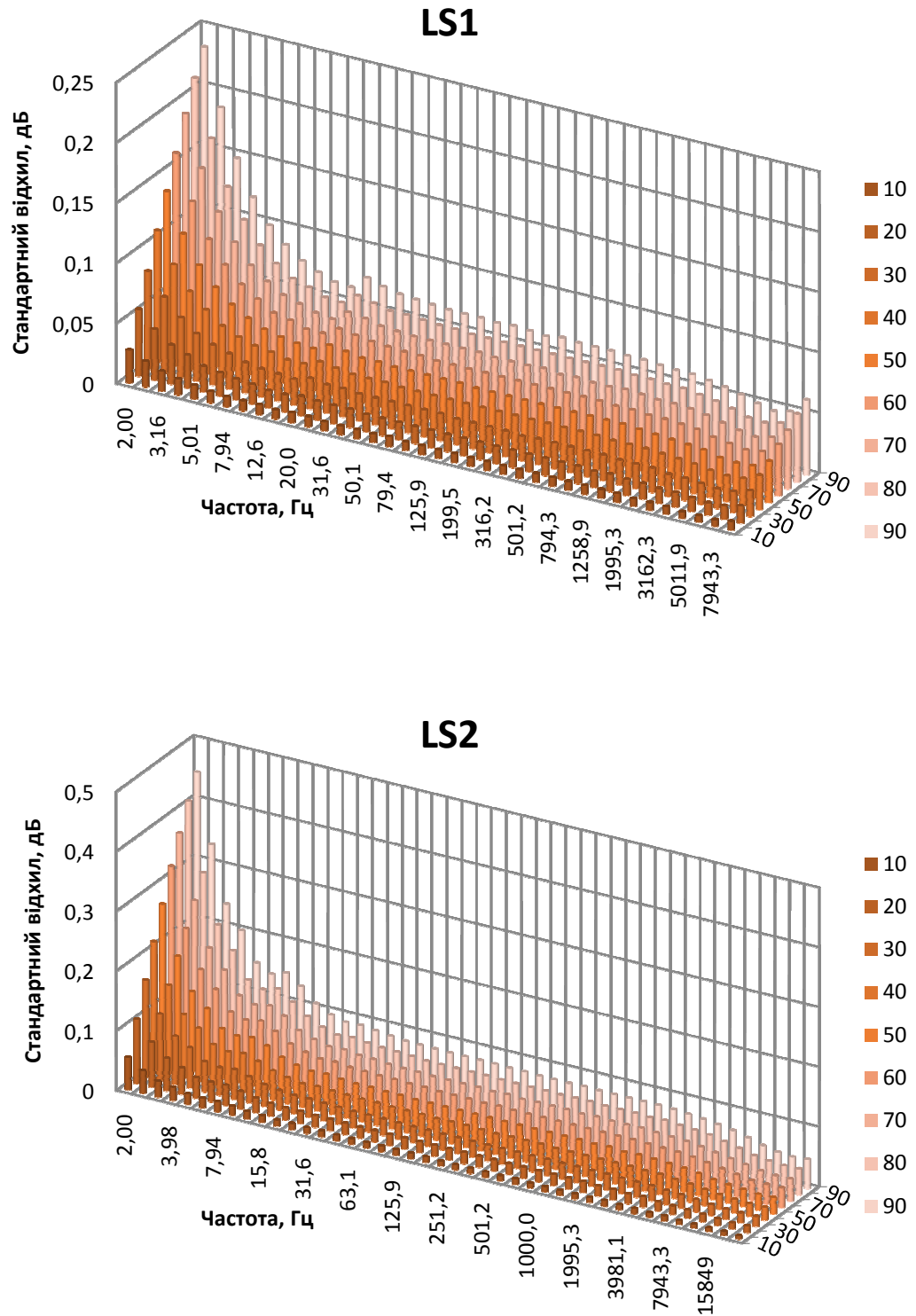


Рисунок 2.3 – Частотні залежності результатів моделювання методом Монте-Карло впливу шумів вимірювальних каналів на стандартний відхил результатів калібрування мікрофонів, коли ці шуми мають нормальний розподіл із різними значеннями стандартного відхилення

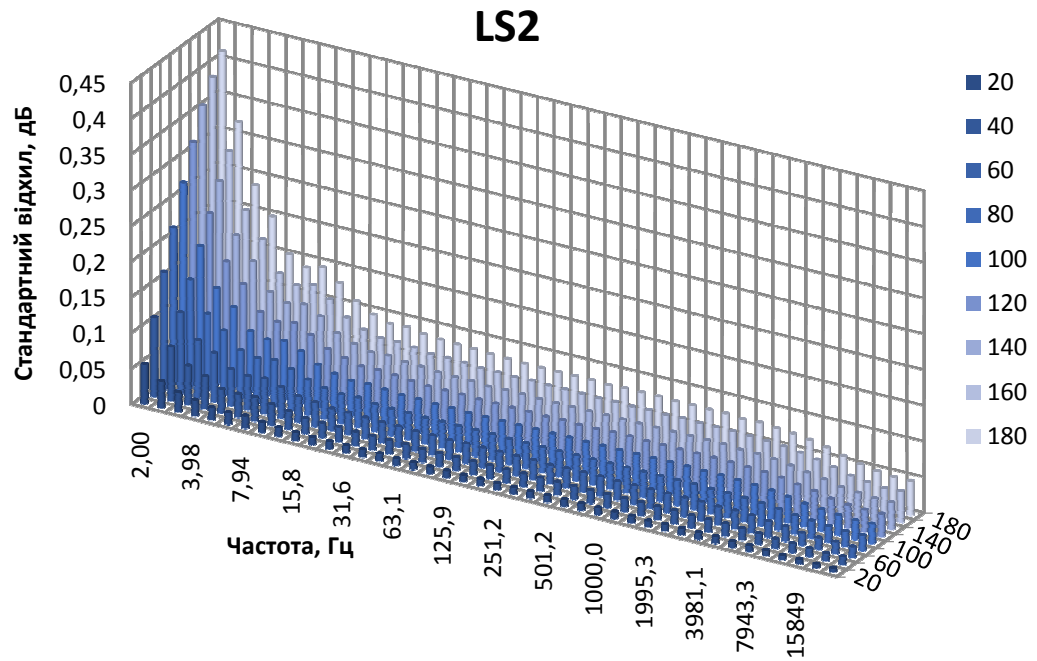
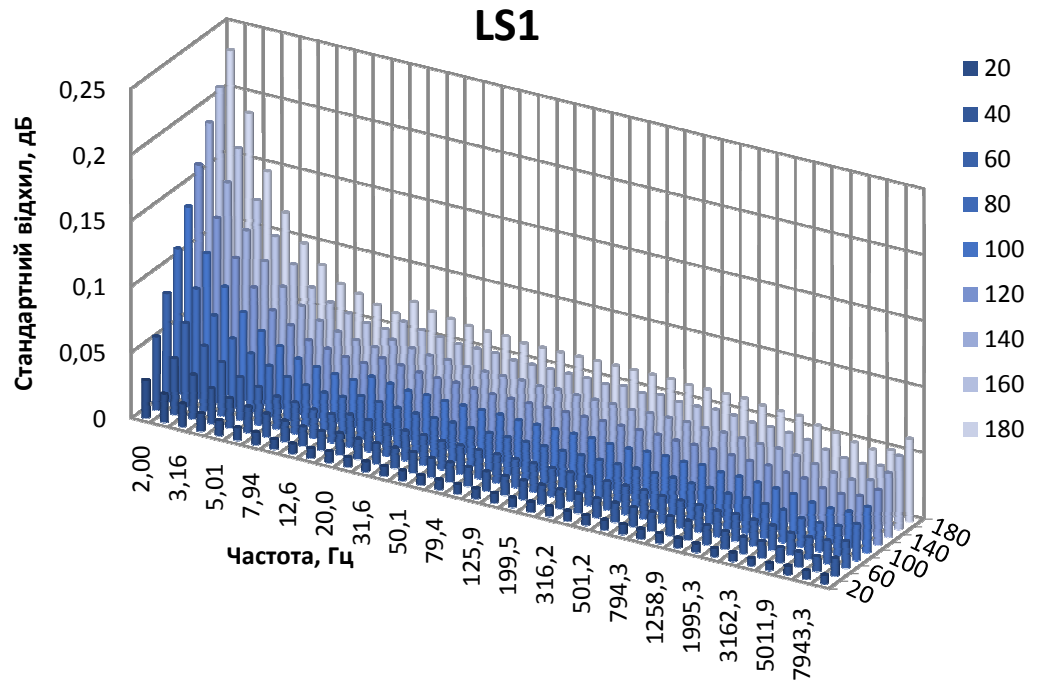


Рисунок 2.4 – Частотні залежності результатів моделювання методом Монте-Карло впливу шумів вимірювальних каналів на стандартний відхил результатів калібрування мікрофонів, коли ці шуми мають нормальний розподіл із різними значеннями математичного сподівання

2.2.4 Оцінення впливу розрядності АЦП вимірювальних каналів

Внаслідок обмеженої кількості розрядів АЦП, які знаходяться у вимірювальних каналах, в показах цих каналів виникне похибка квантування. Шум квантування можна представити як адитивний дискретний сигнал, який враховує похибки квантування. Якщо припустити, що шум квантування – це випадковий, шумоподібний процес, який є стаціонарним, не корельованим із вхідним сигналом, має характеристики близькі до білого шуму та має рівномірний розподіл, тоді його математичне сподівання, M_e , та дисперсія, D_e , дорівнюють [53]:

$$M_q = -0,5Q \quad (2.47)$$

$$D_q = Q^2/12 \quad (2.48)$$

де: Q - крок квантування.

В таблиці 2.1 представлено результати обчислення математичного сподівання, дисперсії та СКВ шумів квантування для АЦП різної розрядності.

Таблиця 2.1 – Результати обчислення математичного сподівання та дисперсії шумів квантування для АЦП різної розрядності для вхідного сигналу із рівнем 1 В

Розрядність АЦП	Q	M_q	D_q	СКВ	M_q відн. $M_{q,18}$	D_q відн. $D_{q,18}$
12	2,441E-04	-1,221E-04	4,967E-09	7,048E-05	64	4096
16	1,526E-05	-7,629E-06	1,940E-11	4,405E-06	4	16
18	3,815E-06	-1,907E-06	1,213E-12	1,101E-06	1	1
24	5,960E-08	-2,980E-08	2,961E-16	1,721E-08	0,015625	0,000244

За представленими результатами можна дійти висновку, що найменша прийнятна кількість розрядів АЦП у вимірювальних каналах еталонної установки становить 16.

2.2.5 Оцінення впливу паразитного імпедансу

Оскільки значення еталонної ємності безпосередньо входить у формулу розрахунку електричного передавального імпедансу пари мікрофонів (2.42), то поява паразитного імпедансу, який вплине на значення цієї еталонної ємності, вплине і на непевність вимірювань під час калібрування мікрофонів. Тому необхідно використовувати такі схемотехнічні рішення, які дозволять зменшити до мінімуму вплив паразитного імпедансу.

2.2.6 Оцінення впливу перехресних завод у вимірювальних каналах

Перехресні завади виникають тому що, що сигнал, переданий по одній лінії, може створити небажані ефекти в інших лініях внаслідок існування ємнісних, індуктивних або резистивних зв'язків між цими лініями. Зазвичай, сигнал перехресної завади має ту-саму частоту, що і корисний сигнал, тому його доволі складно виокремити та врахувати його вплив. Наявність в еталонній установці модуля генерації сигналів, який має достатньо високий рівень вихідного сигналу, та двох вимірювальних каналів, вхідні сигнали яких, в свою чергу, мають порівняно низькі рівні, робить необхідним приділяти велику увагу заводостійкості цих вимірювальних каналів.

2.3 Вплив непевності визначання умов довкілля

Умови довкілля впливають на визначення чутливості мікрофонів внаслідок дії двох факторів: по перше, вони впливають на параметри повітря, яке заповнює КМО під час проведення вимірювань, тобто змінюють акустичний передавальний імпеданс системи мікрофони – КМО, а, по друге, вони впливають на механічні властивості самих мікрофонів та властивості повітря, яке заповнює їх задні порожнини. Оскільки під час вимірювань температура повітря в КМО може відрізнятись від температура мікрофонів, то доцільно розглянути вплив цих факторів на результати калібрування мікрофонів окремо.

2.3.1. Оцінення впливу параметрів довкілля на акустичний передавальний імпеданс системи мікрофони - КМО

Параметри повітря в КМО впливають на її акустичний передавальний імпеданс внаслідок того, що вони визначають швидкість розповсюдження звуку, густину, відношення питомих теплоємностей, в'язкість та теплопровідність повітря в акустичній камері. Оцінювання впливу параметрів довкілля було проведено методом числового диференціювання. На рисунках 2.5 – 2.7 представлено результати впливу різних значень непевності визначення атмосферного тиску, температури та відносної вологості повітря на непевність результатів калібрування різних типів мікрофонів.

Як видно із представлених результатів, найбільший вплив серед параметрів довкілля на непевність калібрування як дюймових так і півдюймових мікрофонів має непевність визначення температури повітря в КМО на високих частотах.

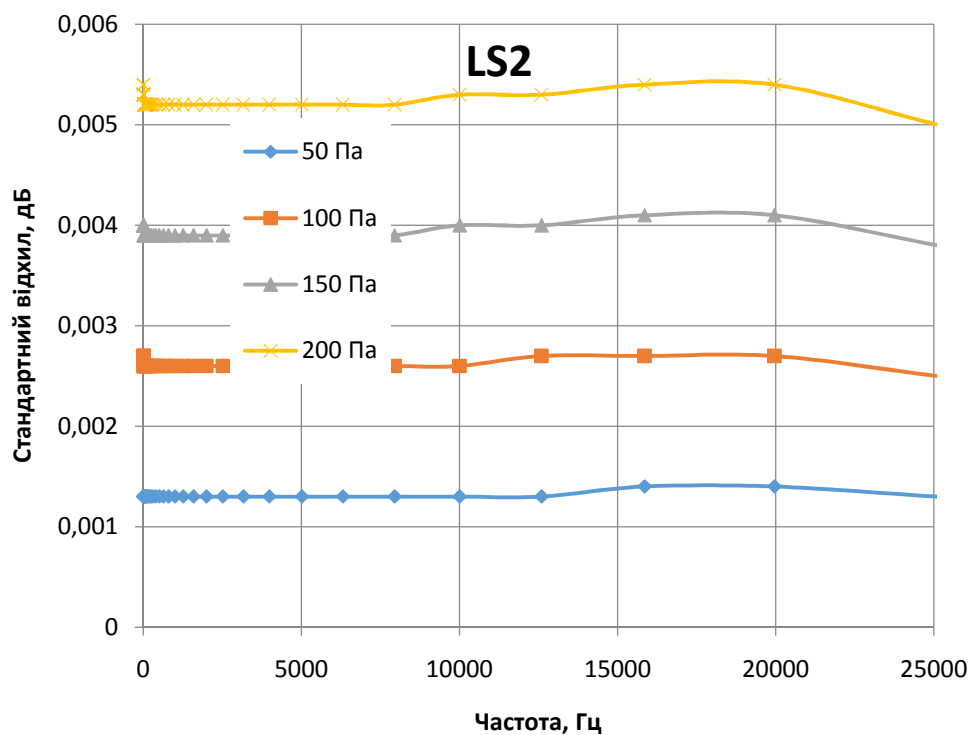
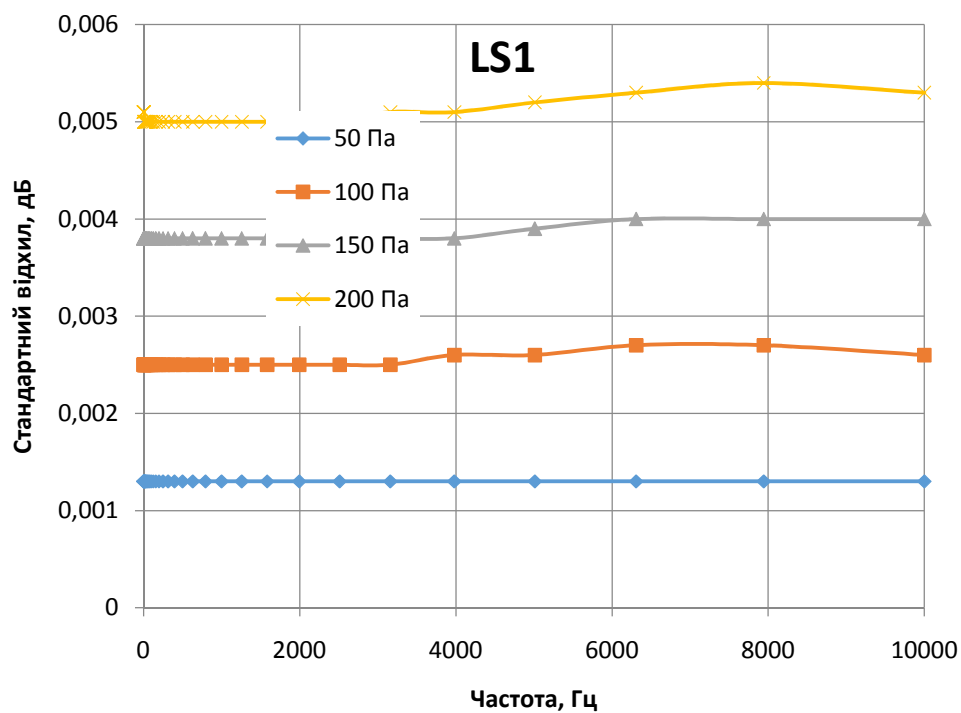


Рисунок 2.5 – Частотні залежності впливу різних значень непевності визначення атмосферного тиску на непевність результатів калібрування мікрофонів

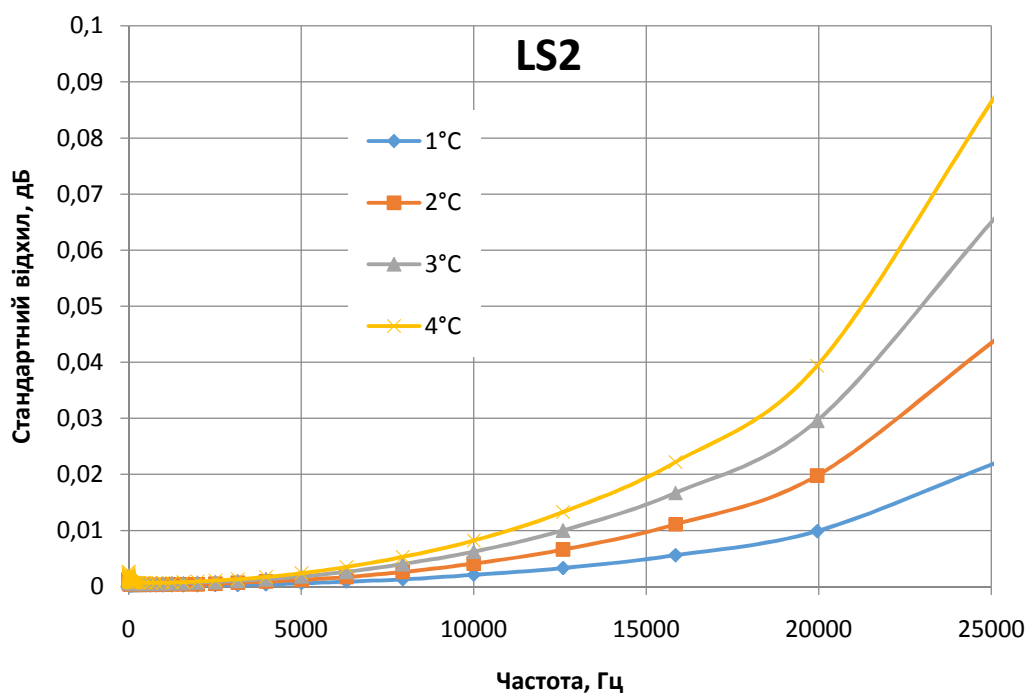
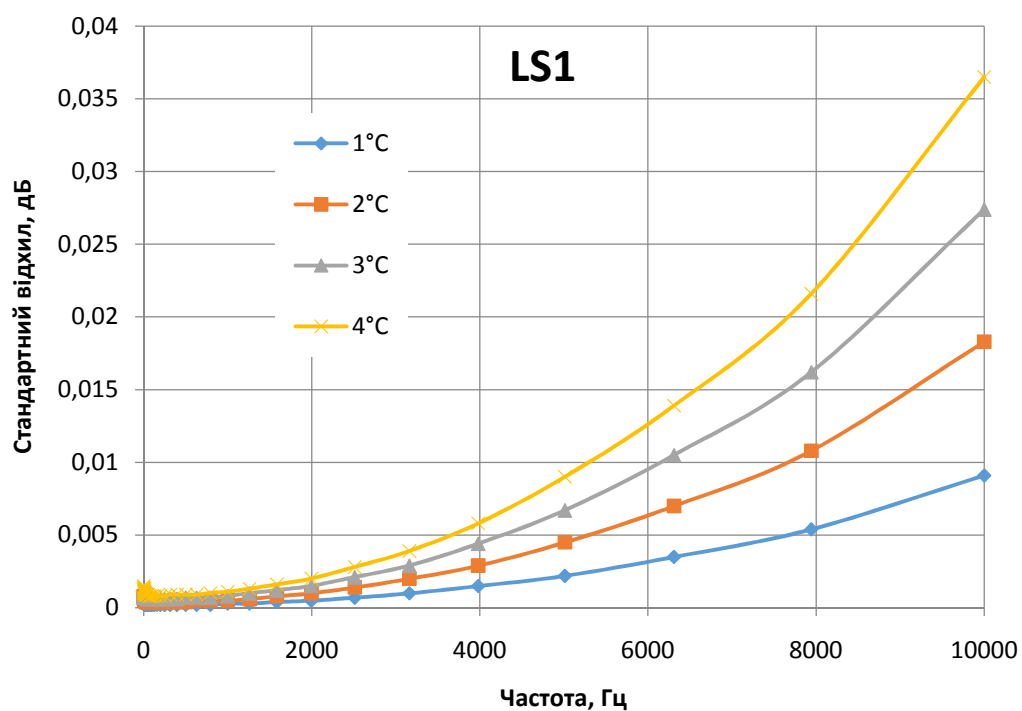


Рисунок 2.6 – Частотні залежності впливу різних значень непевності визначення температури повітря на непевність результатів калібрування мікрофонів

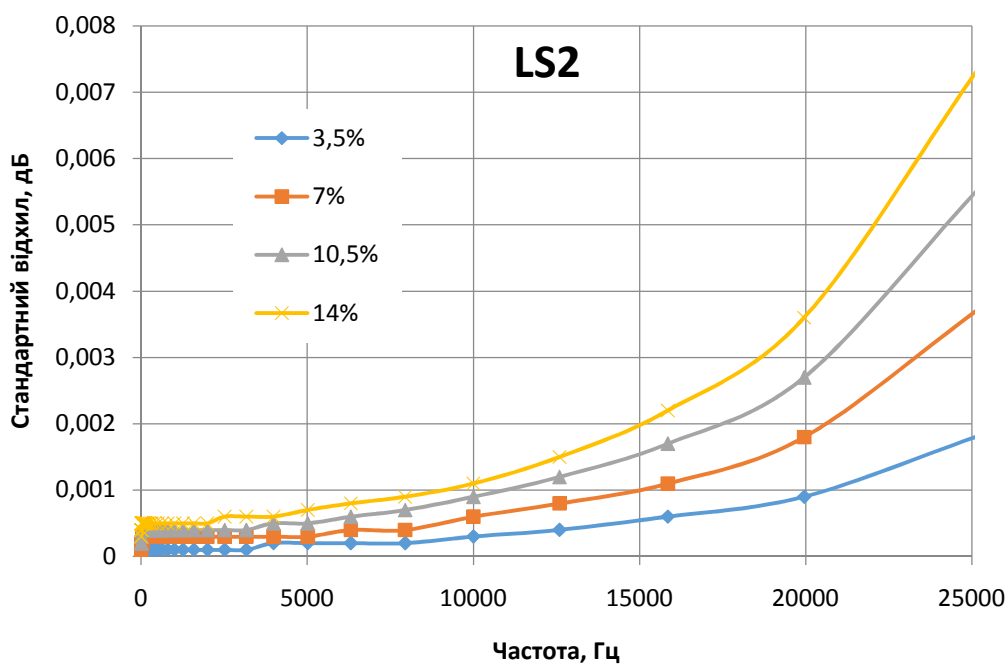
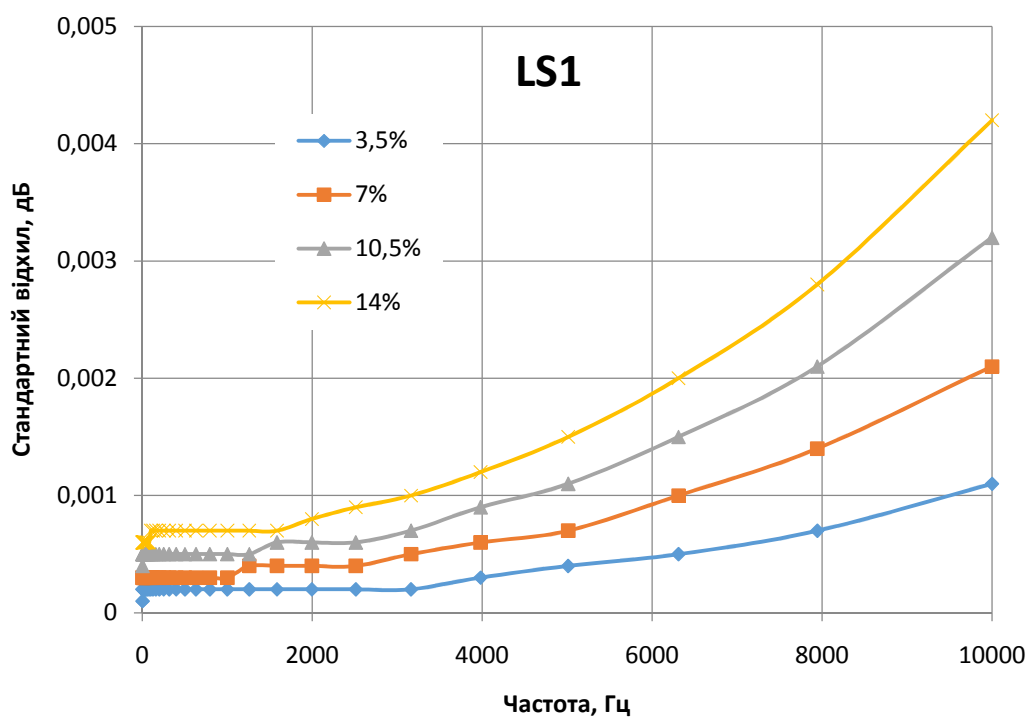


Рисунок 2.7 – Частотні залежності впливу різних значень непевності визначення відносної вологості повітря на непевність результатів калібрування мікрофонів

2.3.2. Оцінення впливу параметрів довкілля на властивості мікрофонів

Міжнародний стандарт [30] вимагає подавати отримані результати чутливості мікрофонів приведеними до опорних умов довкілля. Приведення відбувається за допомогою поліноміальних функцій, які було визначено експериментально [54]. Тому непевність калібрування мікрофонів, яка виникає внаслідок впливу довкілля на властивості мікрофонів, залежить від непевності коефіцієнтів поліноміальних функцій та непевності визначення параметрів довколишнього середовища.

На рисунках 2.8 та 2.9 представлено результати обчислення впливу непевності поліноміальних функцій коефіцієнтів тиску, δ_p , і температури, δ_t , та різних значень непевності визначення статичного тиску та температури мікрофона на непевність результатів калібрування різних типів мікрофонів.

Як видно із представлених результатів обчислень, на непевність калібрування мікрофонів великий вплив мають непевності поліноміальних функцій коефіцієнтів тиску, δ_p , та температури, δ_t , а також непевність визначення температури мікрофона під час його калібрування.

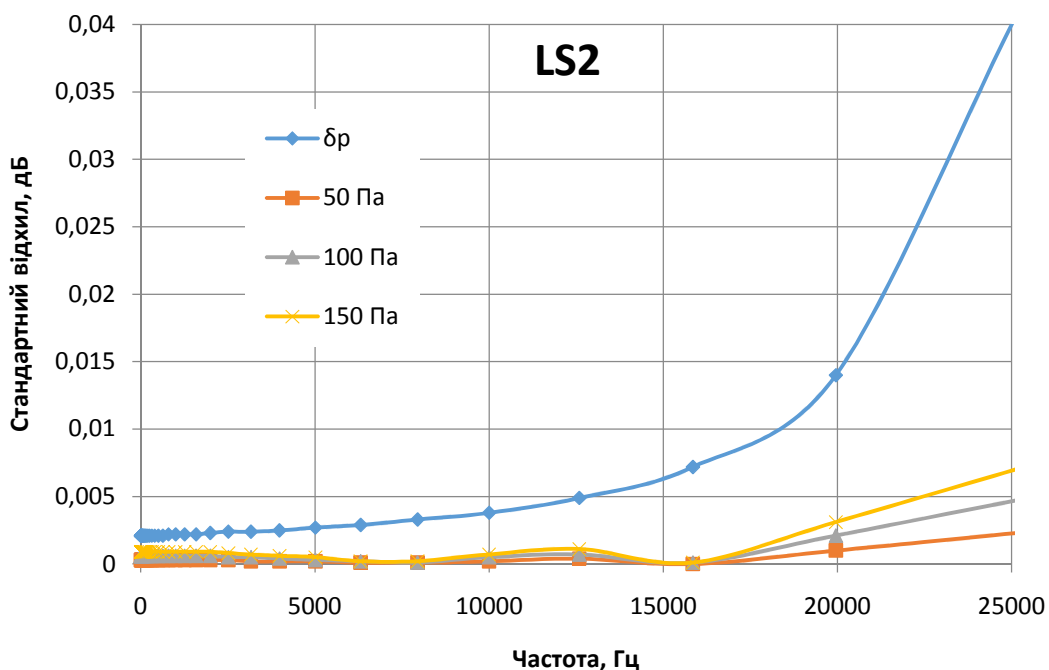
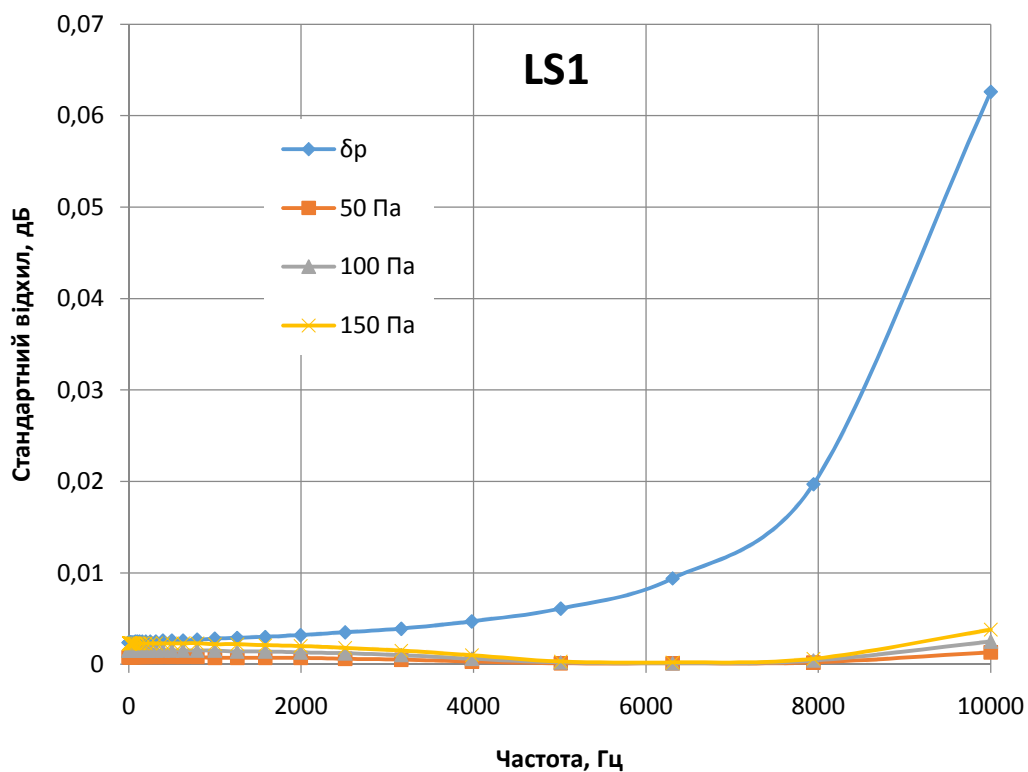


Рисунок 2.8 – Частотні залежності впливу непевності поліноміальних функцій коефіцієнта тиску, δ_p , та різних значень непевності визначення статичного тиску на непевність результатів калібрування мікрофонів

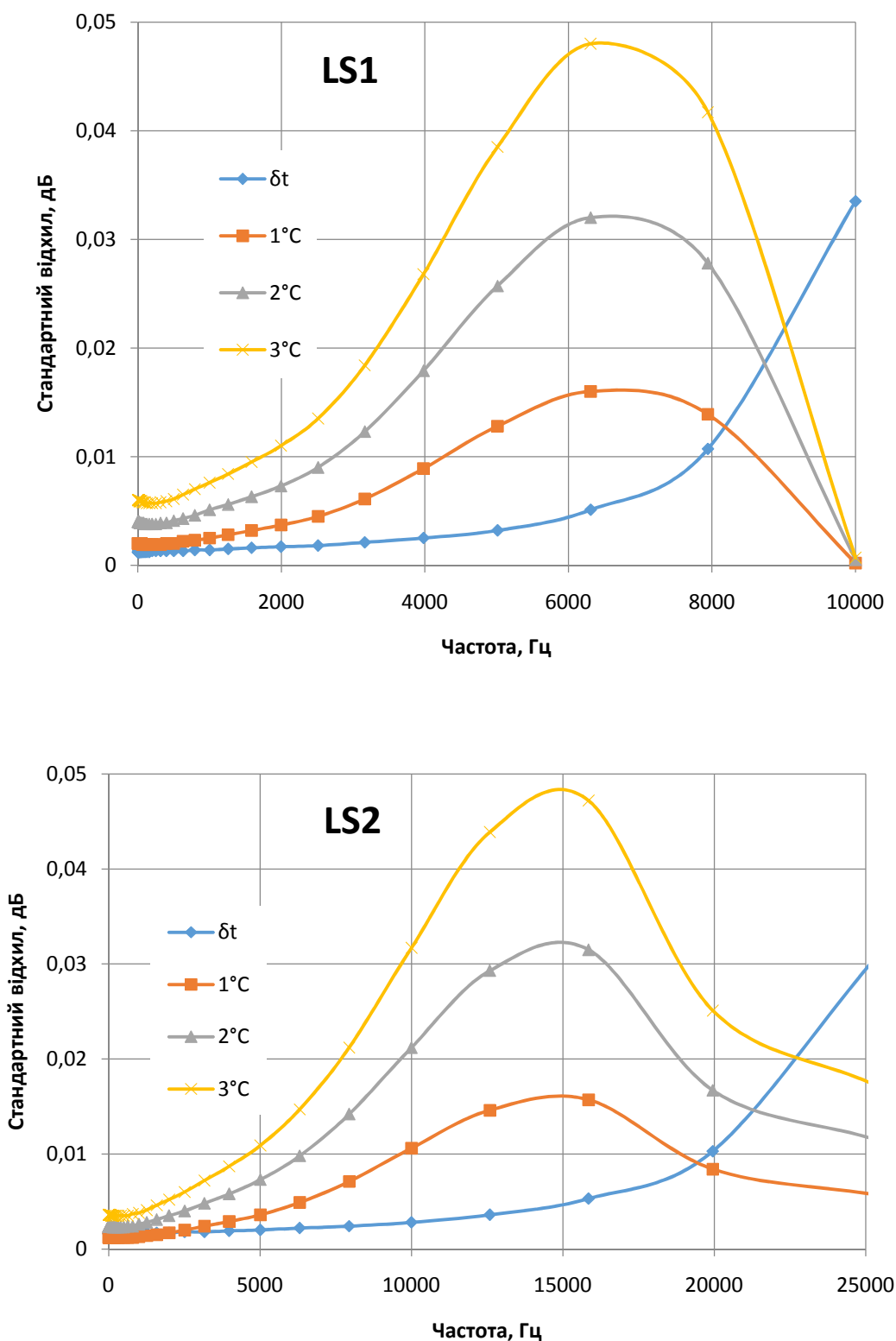


Рисунок 2.9 – Частотні залежності впливу непевності поліноміальних функцій коефіцієнта температури, δt , та різних значень непевності визначення температури мікрофона на непевність результатів калібрування мікрофонів

2.4 Вплив непевності визначання параметрів мікрофона

Одна з груп вхідних величин, що суттєво впливають на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу пари мікрофонів, а, тим самим, і на непевність калібрування мікрофонів, є непевності визначання геометричних розмірів (глибини і діаметру фронтальної порожнини мікрофонів та довжини і діаметру КМО), та параметрів мікрофонів (еквівалентного і фронтального об'ємів, резонансної частоти та коефіцієнта втрат).

2.4.1. Оцінення впливу геометричних розмірів на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу

Оцінення впливу геометричних розмірів КМО та мікрофонів на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу пари мікрофонів було проведено методом числового диференціювання. На рисунках 2.10 – 2.12 представлено частотні залежності впливу непевностей визначення довжини КМО, діаметру КМО та глибини фронтальної порожнини мікрофона на непевність вимірювань під час калібрування мікрофонів, відповідно.

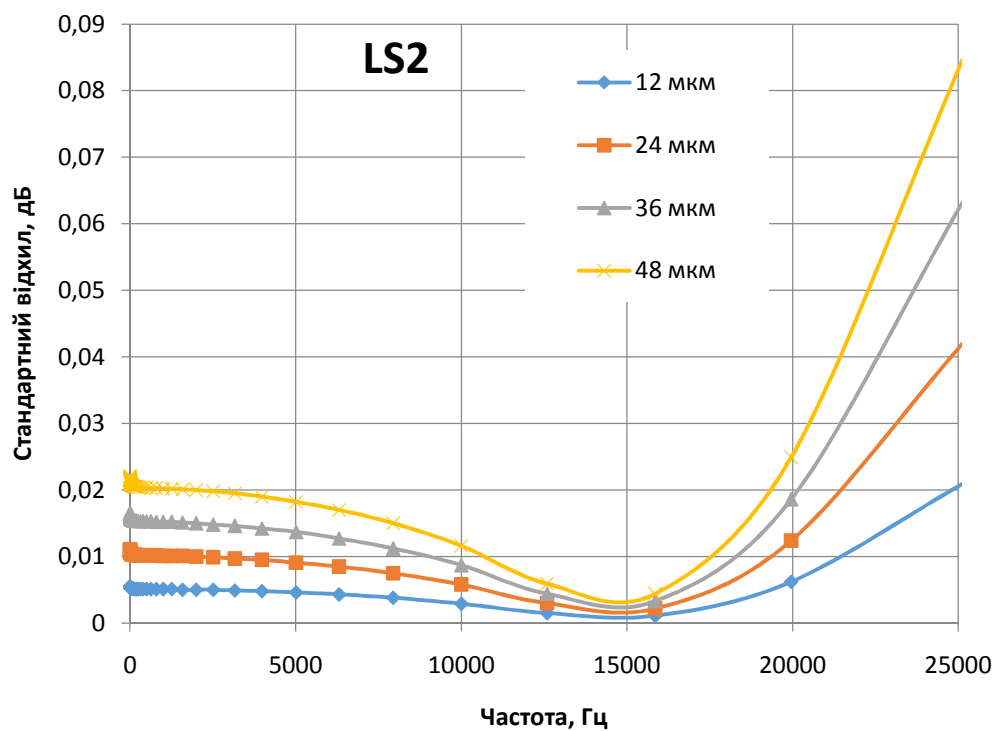
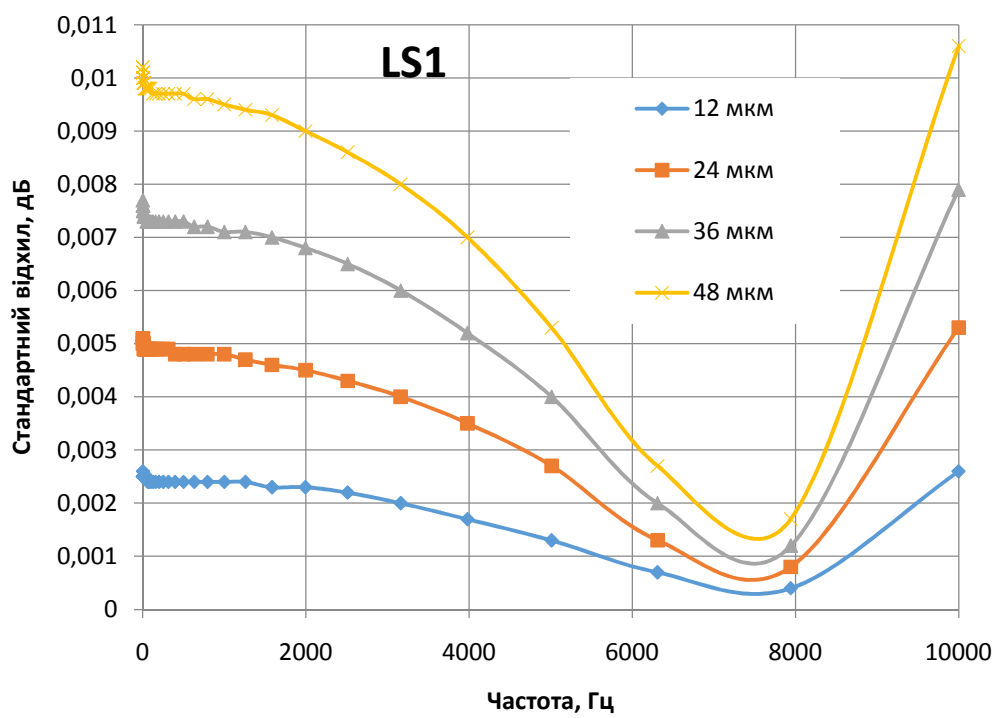


Рисунок 2.10 – Частотні залежності впливу непевності визначення довжини КМО на непевність результатів калібрування мікрофонів

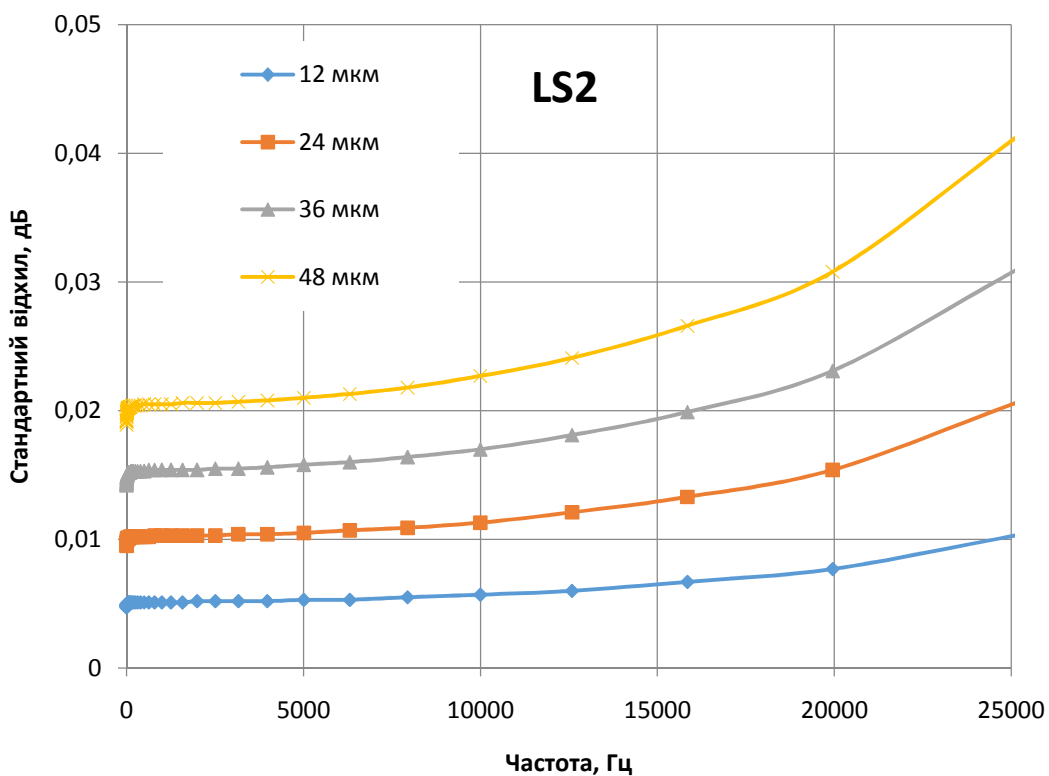
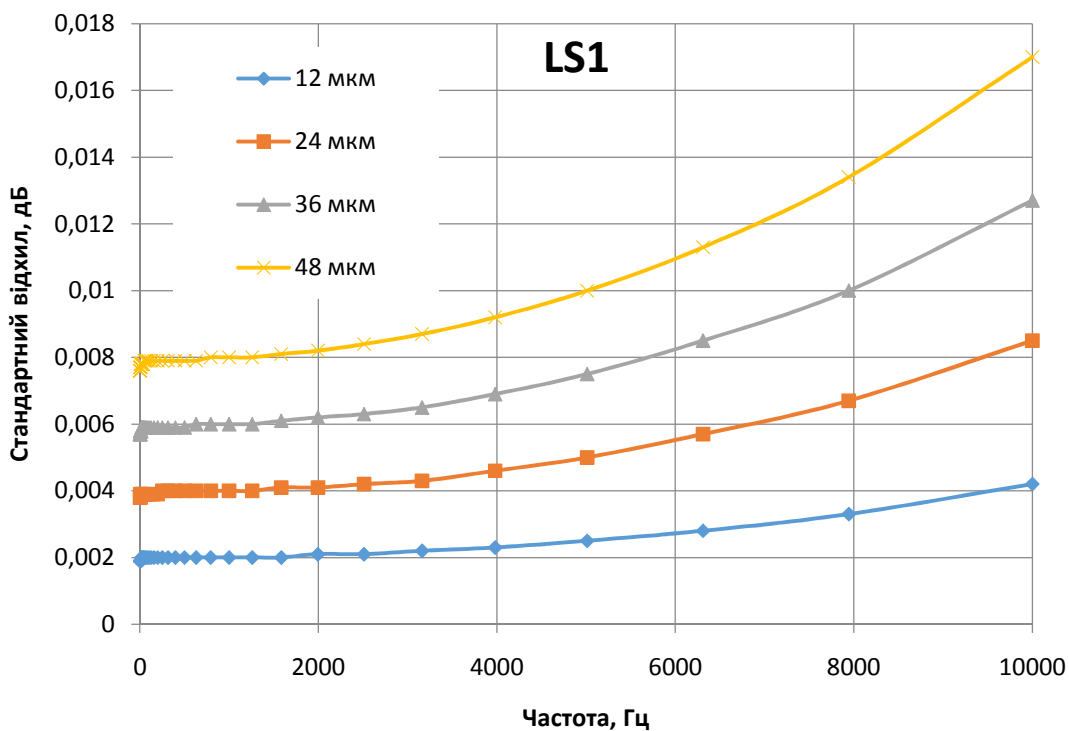


Рисунок 2.11 – Частотні залежності впливу непевності визначення діаметру КМО на непевність результатів калібрування мікрофонів

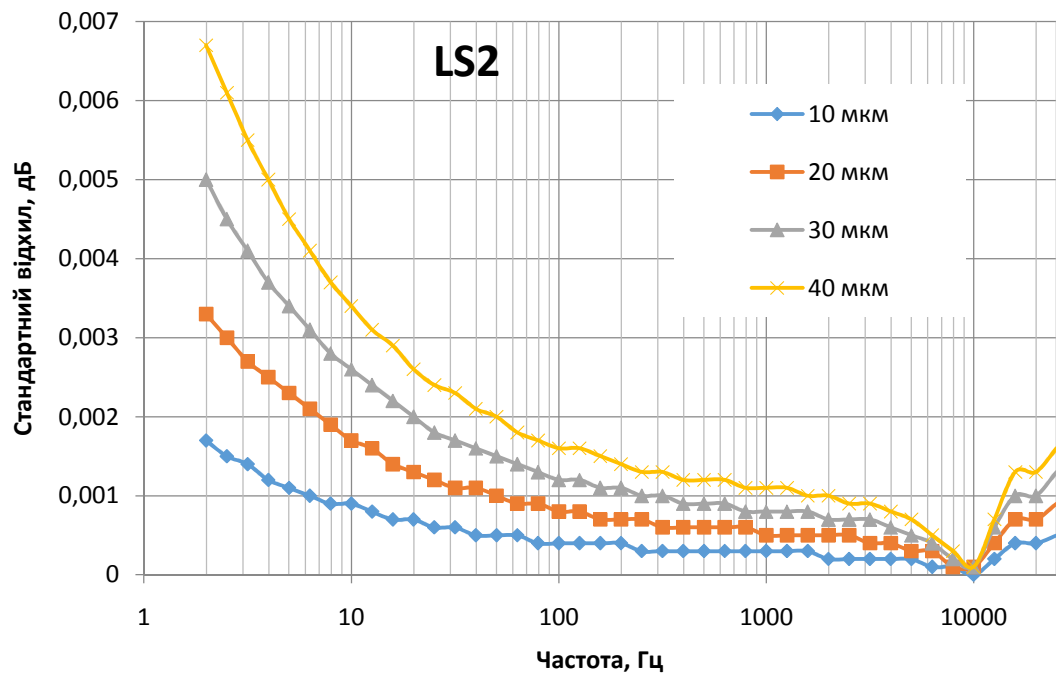
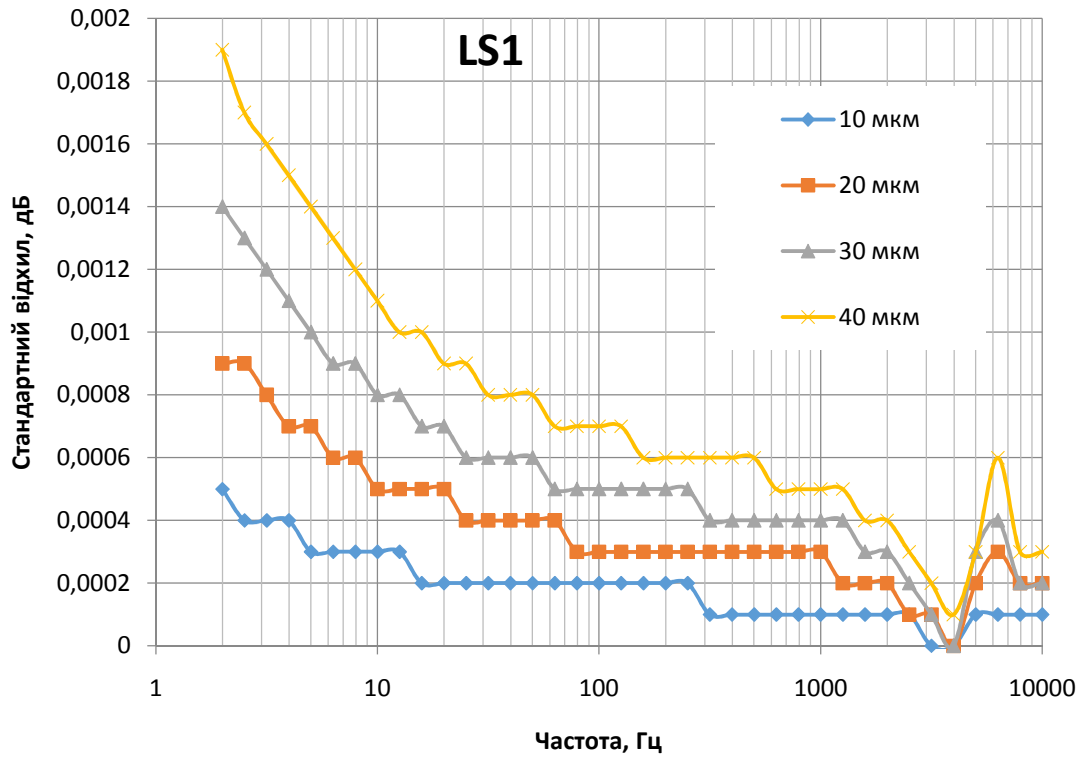


Рисунок 2.12 – Частотні залежності впливу непевності визначення глибини фронтальної порожнини на непевність результатів калібрування мікрофонів

Із отриманих результатів розрахунку очевидно, що непевність визначення геометричних розмірів КМО має суттєвий вплив на непевність результатів калібрування обох типів мікрофонів у всьому діапазоні частот.

2.4.2. Оцінення впливу параметрів мікрофона на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу

Параметри мікрофона – його фронтальний та еквівалентний об'єми, резонансна частота та коефіцієнт втрат, входять у формулу розрахунку акустичного передавального імпедансу під час визначення чутливості мікрофонів, тому необхідно оцінити вплив непевності визначення цих параметрів на непевність визначення чутливості.

Фронтальний об'єм мікрофону – це об'єм повітря, який знаходиться в порожнині перед діафрагмою мікрофона. Еквівалентний об'єм діафрагми мікрофону – це об'єм повітря, який має ту саму гнучкість (або імпеданс), що і діафрагма [22].

Резонансна частота мікрофона – це така частота, на якій фаза його чутливості дорівнює 90° , а коефіцієнт втрат характеризує опір затухання діафрагми.

Оцінення впливу визначення параметрів мікрофонів на непевність оцінки акустичного передавального імпедансу пари мікрофонів було проведено методом числового диференціювання. На рисунках 2.13 – 2.16 представлено частотні залежності впливу непевностей визначення фронтального та еквівалентного об'ємів мікрофонів, резонансної частоти та коефіцієнта втрат мікрофона на непевність вимірювань під час калібрування різних типів мікрофонів, відповідно.

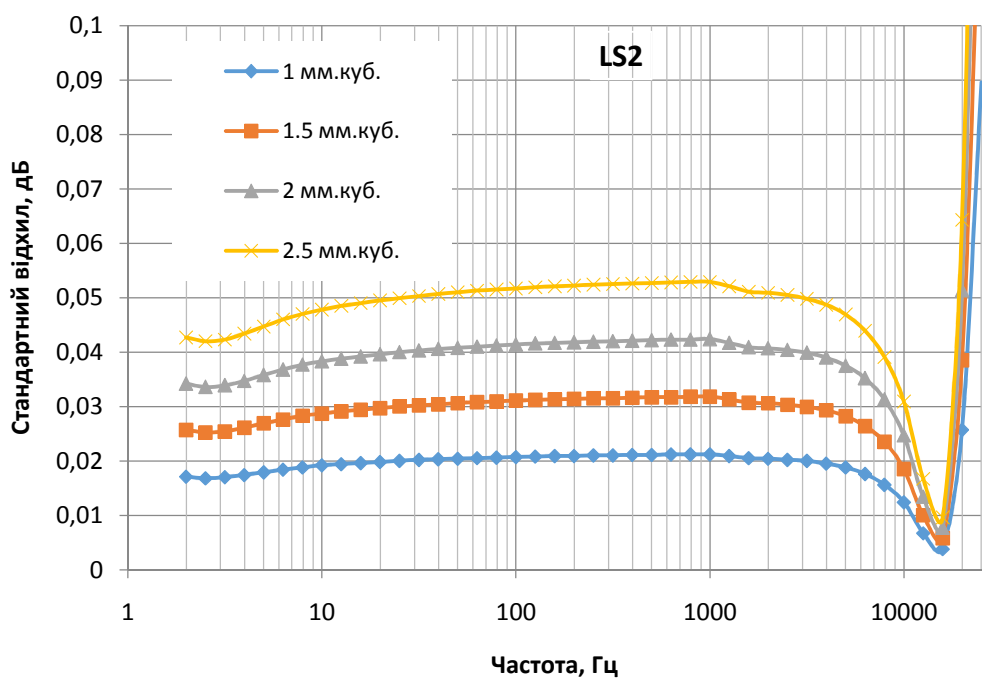
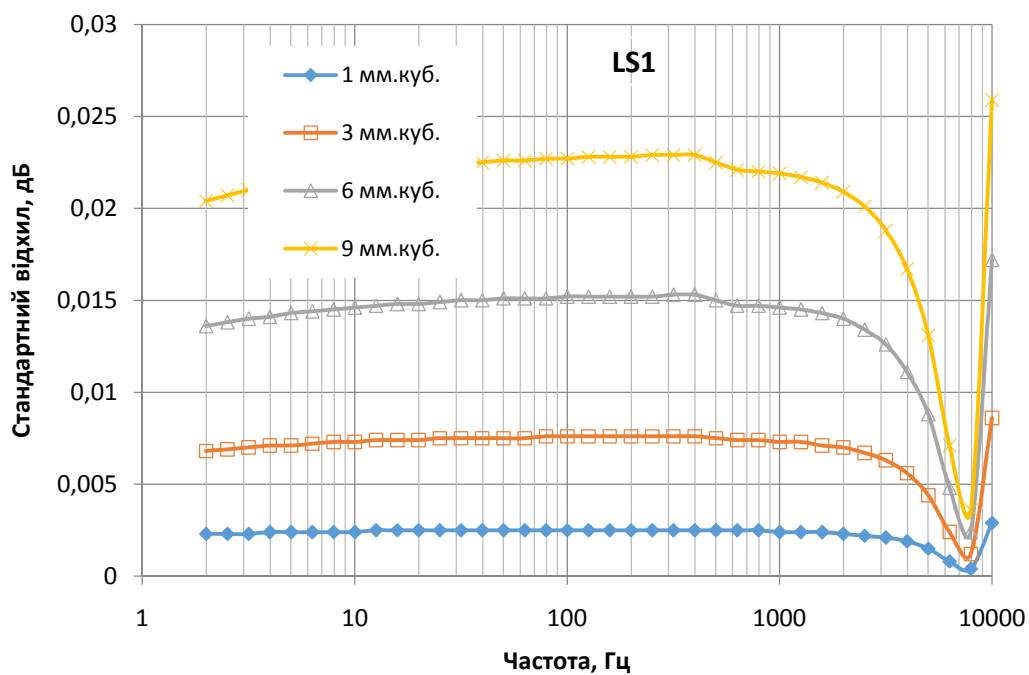


Рисунок 2.13 – Частотні залежності впливу непевності визначення фронтального об'єму на непевність результатів калібрування мікрофонів

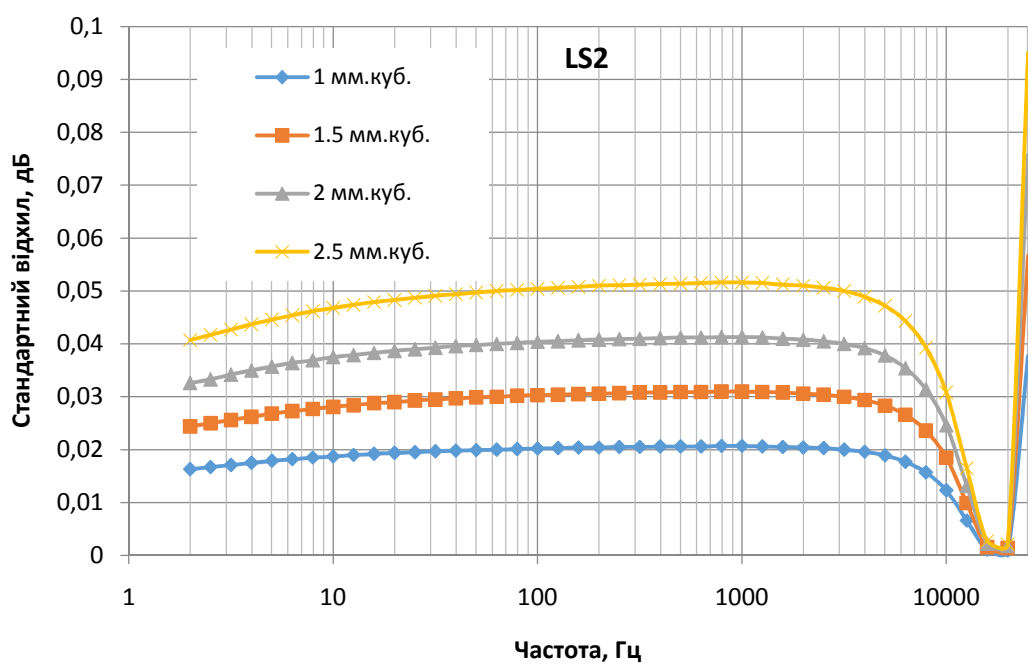
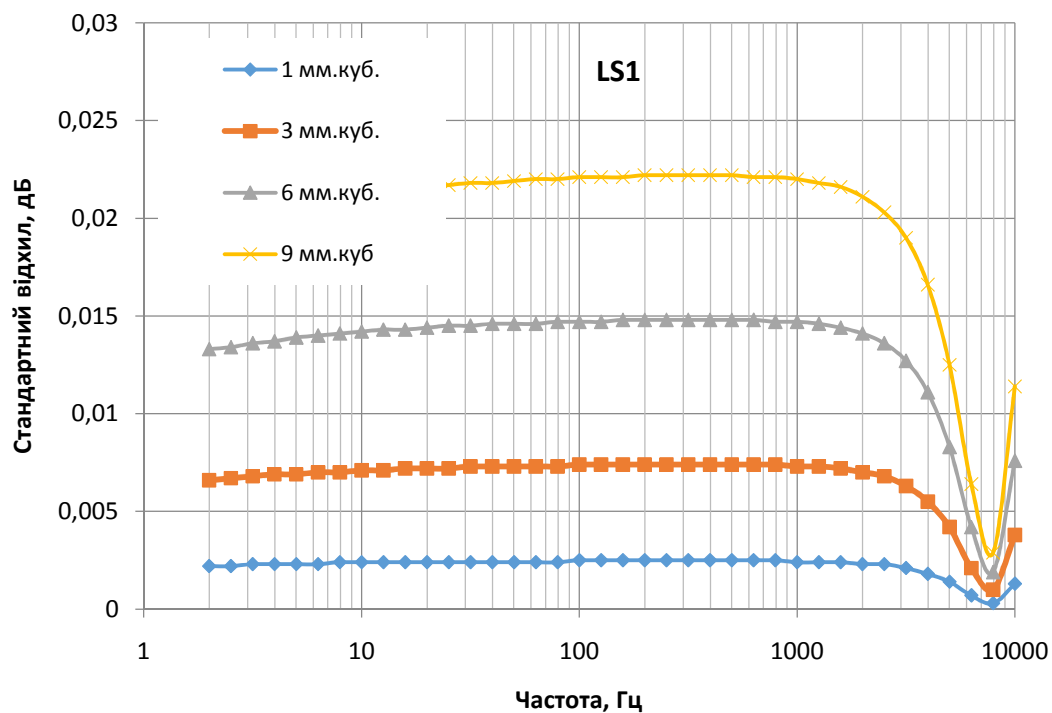


Рисунок 2.14 – Частотні залежності впливу непевності визначення еквівалентного об'єму на непевність результатів калібрування мікрофонів

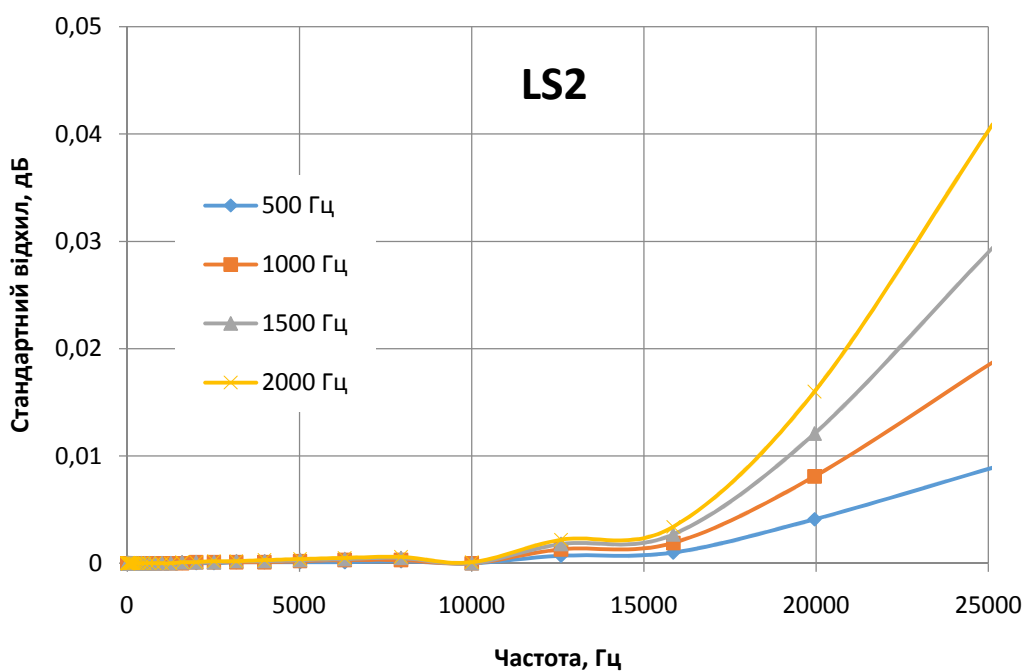
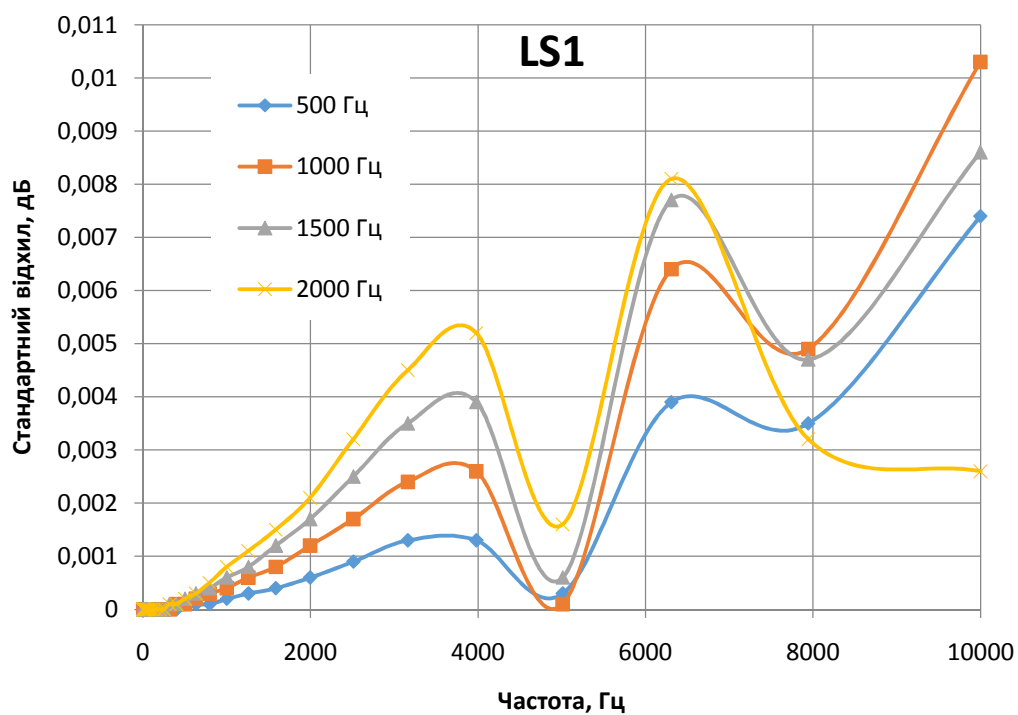


Рисунок 2.15 – Частотні залежності впливу непевності визначення резонансної частоти на непевність результатів калібрування мікрофонів

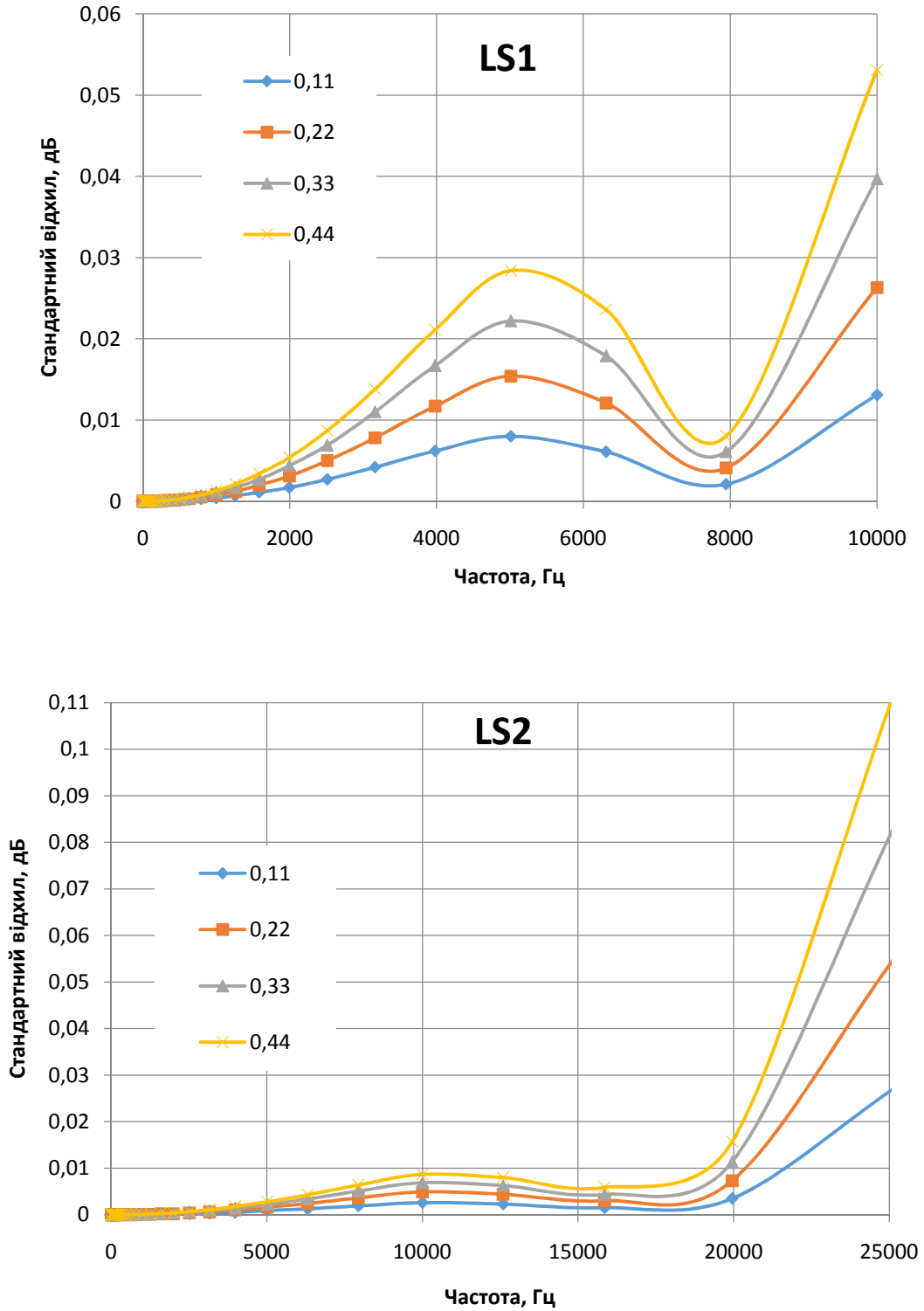


Рисунок 2.16 – Частотні залежності впливу непевності визначення коефіцієнта втрат на непевність результатів калібрування мікрофонів

2.5 Вплив інших чинників

До інших чинників, які впливають на непевність калібрування мікрофонів та які ще не було розглянуто, відносять:

- непевність визначення поправки на теплопровідність (буде розглянуто у третьому розділі);
- непевність встановлення напруги поляризації мікрофонів;
- непевність визначення швидкості звуку, густини і в'язкості повітря та відношення питомих теплоємностей;
- вплив радіально хвильового руху на високих частотах;
- захисне заземлення мікрофона передавача та мікрофона приймача;
- непевність, яка виникає внаслідок невизначеного витікання повітря із КМО під час калібрування.

Оскільки вихідний сигнал конденсаторного мікрофона є пропорційним значенню напруги поляризації, то непевність встановлення напруги поляризації буде впливати на непевність результатів калібрування мікрофонів. Зазвичай, для лабораторних еталонних мікрофонів типу LS1 та LS2 напруга поляризації становить 200 В, і, якщо, наприклад, точність її встановлення знаходиться в межах ± 50 мВ, то це призведе до непевності визначення чутливості мікрофонів в 0.002 дБ.

Швидкість звуку у повітрі, густину і в'язкість повітря та відношення питомих теплоємностей визначають відповідно до вимог міжнародного стандарту [30], де також вказано стандартні непевності цих величин. На рисунку 2.17 представлено вплив на результати калібрування різних типів мікрофонів, який виникає із непевності визначення параметрів повітря.

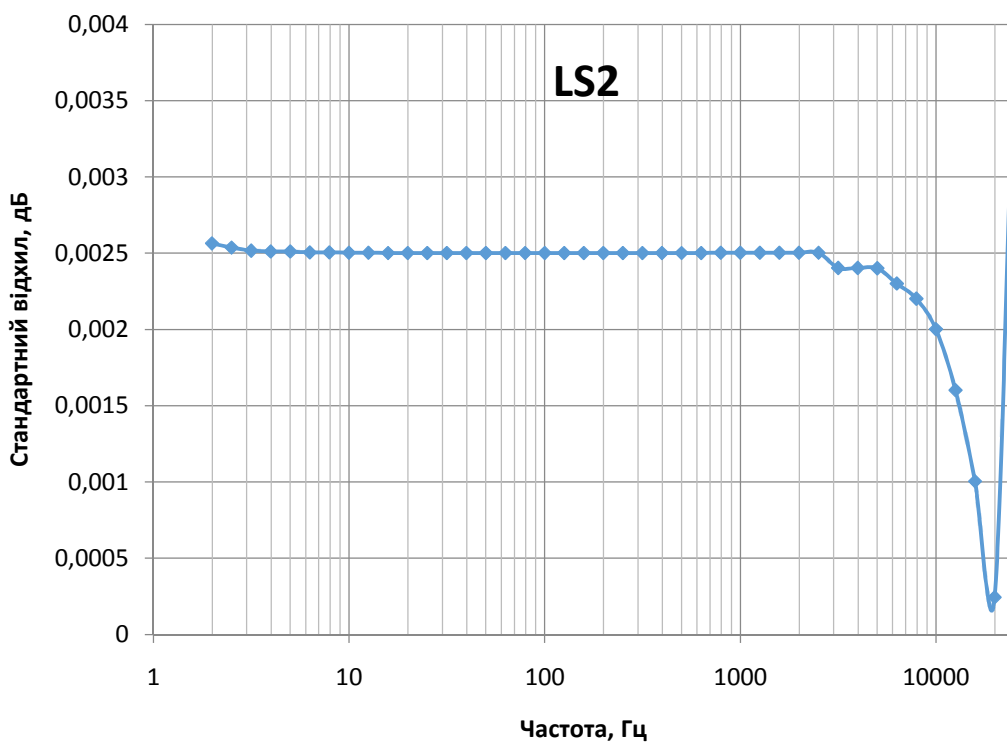
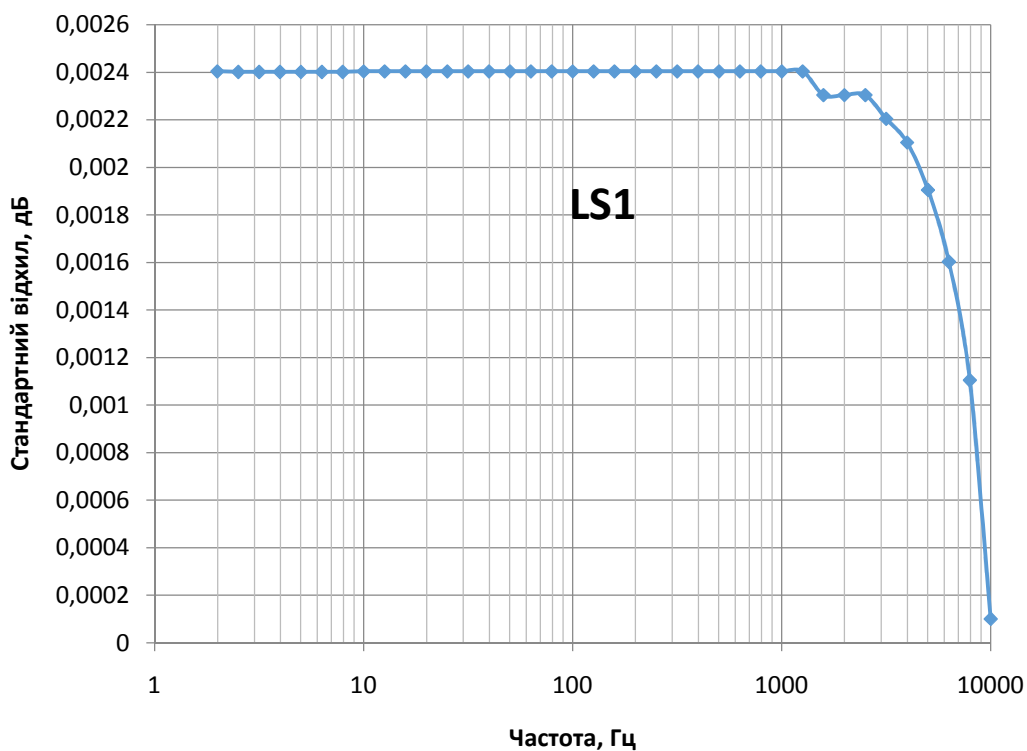


Рисунок 2.17 – Частотні залежності впливу непевності визначення параметрів повітря на непевність результатів калібрування мікрофонів

2.6 Висновки до розділу

1. Представлено математичну модель процесу калібрування мікрофонів методом взаємності з врахуванням впливних чинників;
2. Досліджено вплив на чутливість мікрофонів чинників, які описують властивості газу під час вимірювань – температури, статичного тиску та відносної вологості повітря;
3. Проаналізовано схему вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів, встановлено головні джерела непевності, зокрема, це шуми вимірювальних каналів, мала розрядність АЦП у вимірювальних каналах, велика відстань між мікрофоном передавачем та еталонним імпедансом та перехресні завади між вимірювальними каналами;
4. Проведено оцінення впливу шумів вимірювальних каналів на непевність результатів калібрування мікрофонів;
5. Встановлено частотні залежності результатів моделювання методом Монте-Карло для 100000 спостережень впливу шумів вимірювальних каналів на стандартний відхил результатів калібрування для різних типів мікрофонів;
6. Оцінено вплив часової нестабільності, нелінійності, розрядності АЦП, паразитного імпедансу та перехресних завод у вимірювальних каналах методом числового диференціювання;
7. Розроблено рекомендації щодо структури побудови удосконаленого еталону;
8. Встановлено, що найбільший вплив на непевність результатів калібрування мікрофонів має непевність визначання температури в КМО;
9. Проаналізовано вплив непевності встановлення напруги поляризації мікрофонів, визначання параметрів повітря, радіально-хвильового руху на високих частотах та схеми заземлення мікрофонів під час вимірювань.

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕПЕВНОСТІ ОЦІНКИ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЕТАЛОННИХ МІКРОФОНІВ

3.1 Неоднозначність існуючих моделей визначання поправки на теплопровідність

Розширення діапазону вимірювань в сторону інфранизьких частот є одним із напрямків подальшого розвитку акустичних вимірювань у повітряному середовищі [55].

Але, із зниженням частоти зростає вплив поправки на теплопровідність, яка враховує передачу енергії до та від внутрішніх поверхонь КМО та мембран мікрофонів. На низьких частотах непевність визначення поправки на теплопровідність є однією із основних складових непевності калібрування мікрофонів. Як було показано в п.2.1 міжнародний стандарт [30], подає дві можливі моделі розрахунку цієї поправки, так звані низькочастотне рішення (*Low Frequency Solution*) та широкосмугове рішення (*Broadband Solution*), але не надає переваги жодній із них. Низькочастотне рішення базується на моделі теплопровідності Гербера в закритій циліндричній порожнині для збуджувача із нескінченним імпедансом. Широкосмугове рішення – на теорії передачі тепла між газом та циліндричною поверхнею обмежених розмірів, крім того, ця модель враховує вплив в'язкості газу.

Однак, як було показано в [41, 42], застосування цих моделей дає результати, які значною мірою різняться між собою. Неоднозначність стандарту [30] відносно поправки на теплопровідність призвела до виникнення деяких проблем під час проведення останніх, завершених на даний час, міжнародних ключових звірень під егідою Консультативного Комітету з Акустики, Ультразвуку та Вібрації Міжнародного Бюро Мір та Ваг (ССАUV ВІРМ) – ССАUV.A-K5 [47], більш того постало питання визначення та

експериментального підтвердження коректної моделі поправки на теплопровідність.

На рисунку 3.1 представлено різницю між рівнями та фазами чутливості для мікрофонів різного типу, які отримано із застосуванням низькочастотного та широкосмугового рішень стандарту [30] розрахунку поправки на теплопровідність.

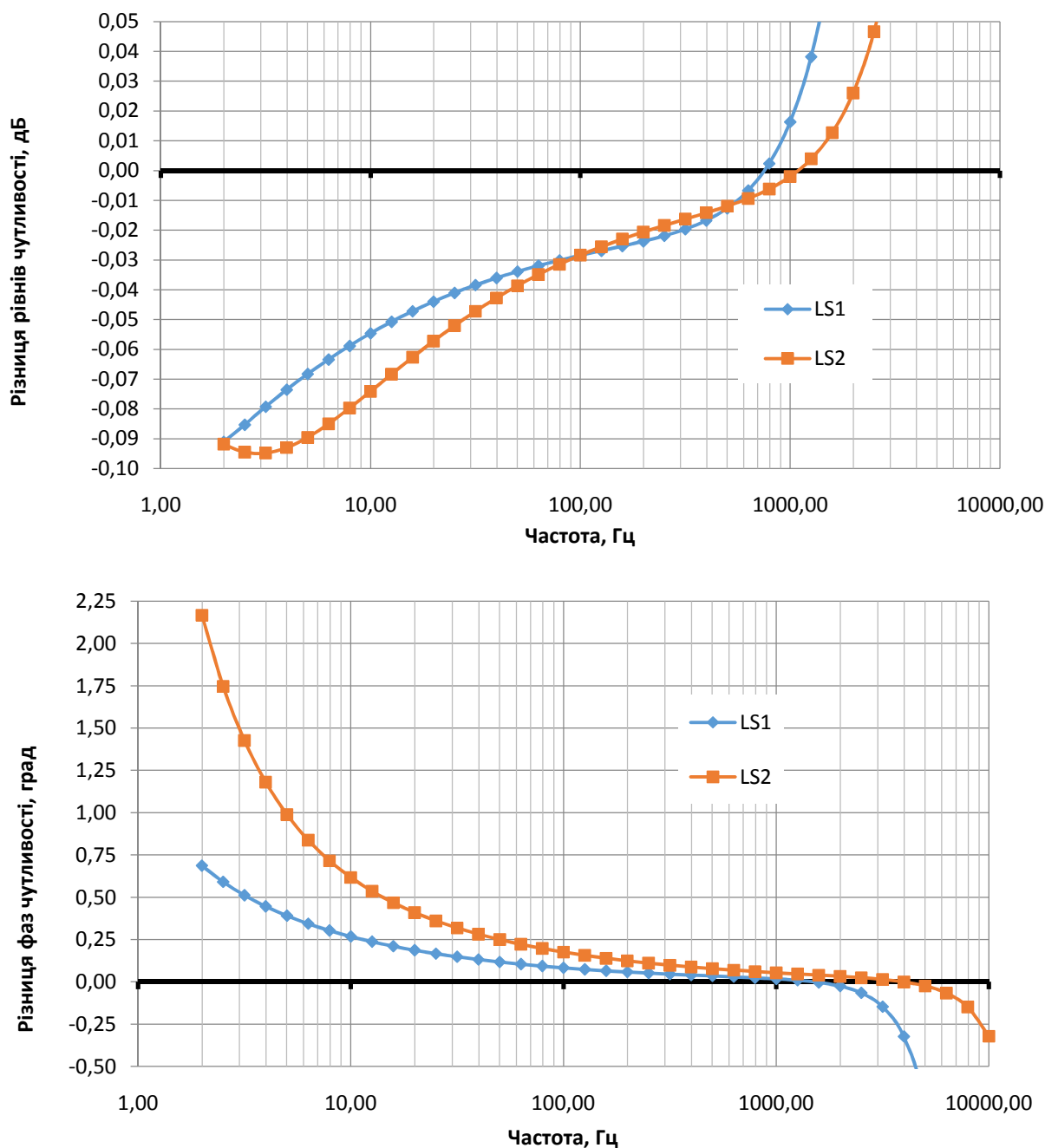


Рисунок 3.1 – Різниця між рівнями та фазами чутливості мікрофонів типу LS1 та LS2, які отримано із застосуванням низькочастотного та широкосмугового рішень стандарту [30] розрахунку поправки на теплопровідність

Як було показано в [41], головними, але не єдиними, факторами, що визначають різну поведінку запропонованих моделей теплопровідності в діапазоні низьких частот, є:

- Спрощений варіант розрахунку обох моделей;
- Некоректний розрахунок втрат на торцевих поверхнях КМО (діафрагмах мікрофонів) в широкосмуговому рішенні призводить до порушення принципу збереження енергії;
- Некоректне врахування впливу нарізі у фронтальній порожнині мікрофона (на низьких частотах розміри нарізі є меншими за розміри ізотермального граничного шару повітря).

3.2 Альтернативні моделі розрахунку поправки на теплопровідність

Повне рішення Гербера для комплексної передавальної функції температури для збуджувача із нескінченним імпедансом, \underline{E}_Y , у формулі (2.21) має наступний вигляд [41]:

$$\underline{E}_Y = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{DN_n}{1+M_n/(2\pi jX_v)} \quad (3.1)$$

Де: X_v – розраховують за формулою (2.27);

D, N_n, M_n – константи, які залежать від геометрії порожнини. Для циліндра обмежених розмірів вони дорівнюють [41]:

$$D = \frac{8}{\pi^2} \quad (3.2)$$

$$N_{mr} = \frac{1}{(m+1/2)^2 \lambda_r^2} \quad (3.3)$$

$$M_{mr} = \frac{(m+1/2)^2 \pi^2 + \lambda_r^2 R^2}{(2R+1)^2} \quad (3.4)$$

Де: λ_r – корені функції Бесселя нульового порядку першого роду, $J_0(\lambda_r) = 0$.

R – розраховують за формулою (2.26).

Подальші теоретичні та експериментальні дослідження цієї проблеми було проведено в національному метрологічному інституті Франції в галузі акустичних вимірювань, Laboratoire Commun de Métrologie (LNE-CNAM), [43]. Ці дослідження довели, що використання широкосмугового рішення під час

калібрування методом взаємності еталонних мікрофонів в області низьких частот є некоректним внаслідок того, що на цих частотах не можна нехтувати розмірами ізотермального граничного шару повітря порівняно із радіусом циліндричної камери.

Крім того, було запропоновано альтернативне рішення, яке також ґрунтувалось на моделі теплопровідності в закритій циліндричній порожнині Гербера, але для збуджувача із нульовим імпедансом. Тобто, акустичний імпеданс пари мікрофонів під час калібрування було запропоновано розраховувати за формулою:

$$\frac{1}{Z_{-a,ij}} = \frac{j\omega V}{\kappa P_s} [\kappa - (\kappa - 1)E_p] + \frac{1}{Z_{-a,i}} + \frac{1}{Z_{-a,j}} \quad (3.5)$$

Де: E_p – комплексна передавальна функція тиску.

Було розглянуто два варіанти розрахунку комплексної передавальної функції тиску: повний та спрощений. Повне альтернативне рішення представлено формулою:

$$E_p = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{8/\pi^2}{(m+1/2)^2 \lambda_n^2} F_{m,n} \right] \quad (3.6)$$

Де:

$$F_{m,n} = \left(1 + \frac{\lambda_n^2 R^2 + (m+1/2)^2 \pi^2}{(1+2R)^2} X_p^2 \right)^{-1} \quad (3.7)$$

λ_n – корені функції Бесселя нульового порядку першого роду;

$$X_p = \frac{A}{V} \frac{1-j}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}} \quad (3.8)$$

A – загальна внутрішня площа циліндричної поверхні, в m^2 .

Спрощене альтернативне рішення розраховують за формулою:

$$E_p = 1 - X_p + \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi(2R+1)^2} X_p^2 + \frac{3}{4} \sqrt{\pi} \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi}(2R+1)^3} X_p^3 \quad (3.9)$$

На рисунку 3.2 представлено різницю між рівнями чутливості для мікрофонів типу LS2 (КМО із об'ємом 0.4см^3) для повного та спрощеного варіантів рішень низькочастотної та альтернативної моделей розрахунку поправки на теплопровідність.

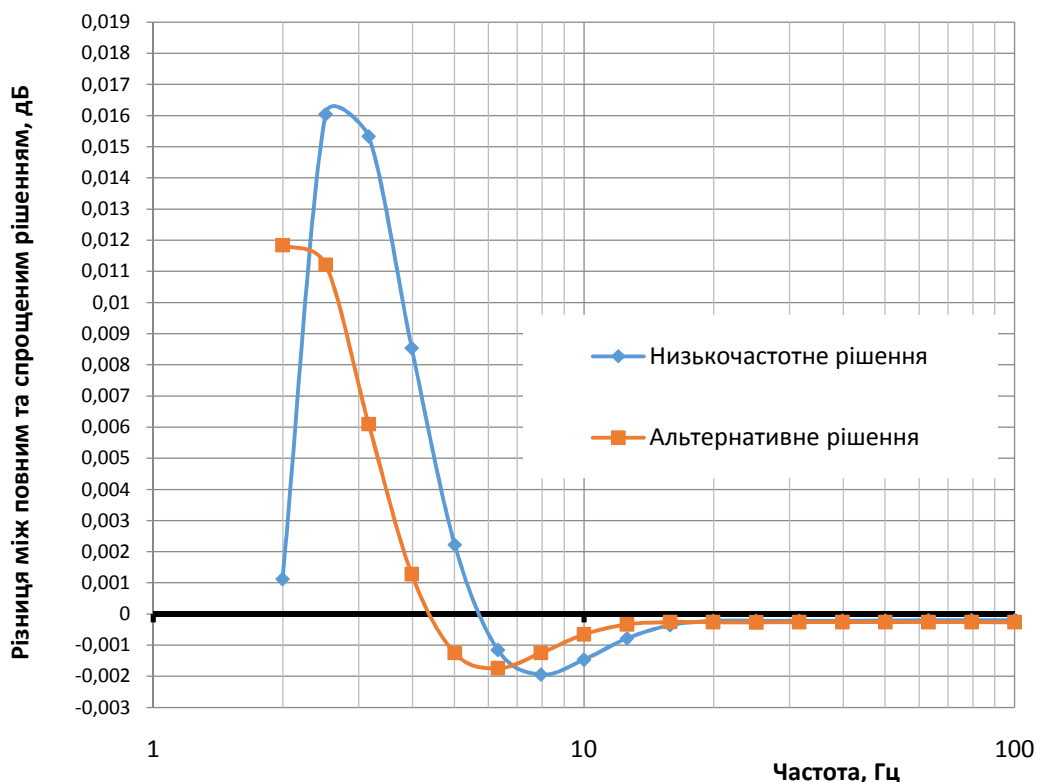


Рисунок 3.2 – Різниця між рівнями чутливості мікрофонів типу LS2, які отримано із застосуванням повного та спрощеного варіантів рішень низькочастотної та альтернативної моделей розрахунку поправки на теплопровідність

Крім того, були проведені експериментальні дослідження коректності вибраної поправки на теплопровідність, які ґрунтувались на припущенні, що різниця між чутливостями мікрофона, які визначено в двох КМО із достатньо різними розмірами, на низьких частотах буде прямувати до нуля, якщо використано коректні поправки на теплопровідність за умови, що всі інші фактори, які впливають на чутливість мікрофона, залишаться незмінними.

При порівнянні отриманих результатів було розглянуто чотири моделі поправки на теплопровідність:

- Широкозмугове рішення представлено в [30];
- Низькочастотне рішення представлено в [30];
- Спрощене альтернативне рішення, яке запропоновано авторами [43];

– Повне альтернативне рішення, яке запропоновано авторами [43].

Порівняння експериментальних результатів для мікрофонів типу LS1 для різних моделей поправки на теплопровідність представлені на рисунку 3.3 для різниць рівнів чутливостей, та на рисунку 3.4 – для різниць фаз чутливостей мікрофона у різних КМО.

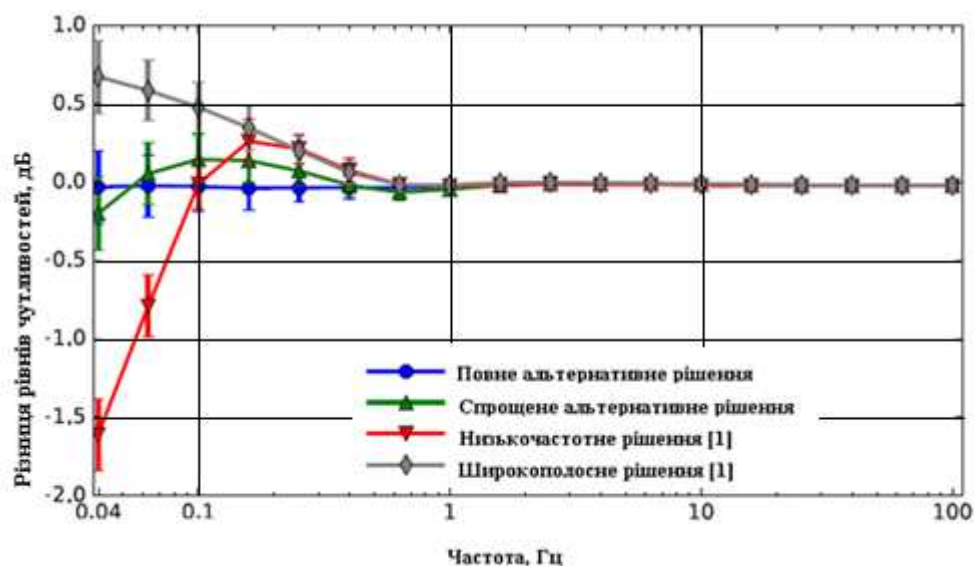


Рисунок 3.3 – Різниця рівнів чутливостей мікрофона типу LS1 для різних моделей поправки на теплопровідність

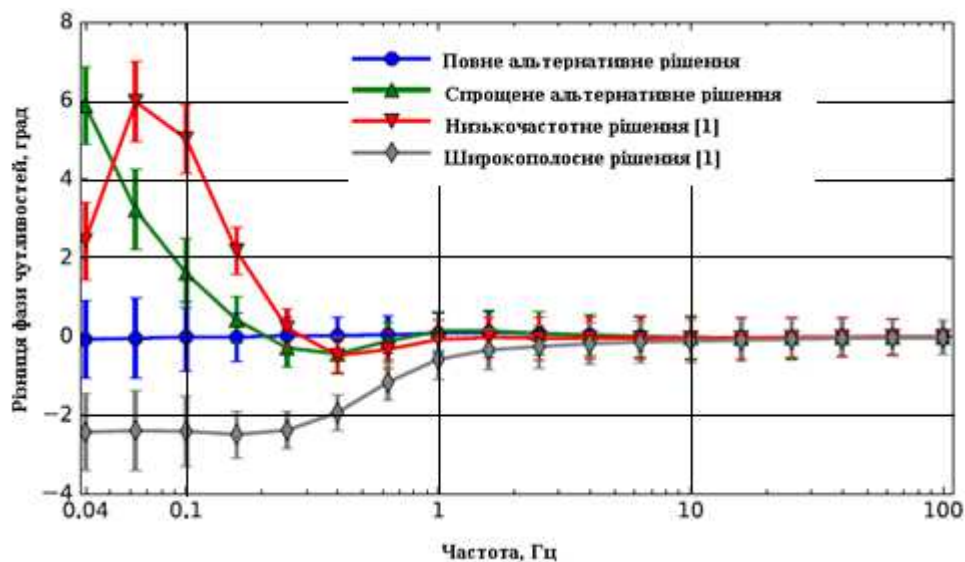


Рисунок 3.4 – Різниця фаз чутливостей мікрофона типу LS1 для різних моделей поправки на теплопровідність

За наведеними результатами автори [43] роблять наступні висновки:

- обидві моделі поправки на теплопровідність, які представлено в [30], є некоректними на частотах нижче 10 Гц;
- на частотах до 1 Гц можна використовувати спрощене альтернативне рішення, яке запропоновано в [43];
- на частотах нижче 1 Гц необхідно використовувати повне альтернативне рішення, яке запропоновано в [43].

Однак, слід зауважити, що:

- не проведено порівняння із повним низькочастотним рішенням Гербера для збуджувача із безмежним імпедансом;
- всі експериментальні дослідження стосувались тільки мікрофонів типу LS1;
- представлені результати не супроводжувались відповідною непевністю вимірювань.

На рисунках 3.5 та 3.6 представлено, відповідно, різницю між рівнями та фазами чутливості мікрофонів різних типів, які отримано із застосуванням обох моделей визначання поправки на теплопровідність по відношенню до широкосмугової моделі. А на рисунку 3.7 – різницю між рівнями та фазами чутливості мікрофонів різних типів за застосування обох моделей визначання поправки на теплопровідність.

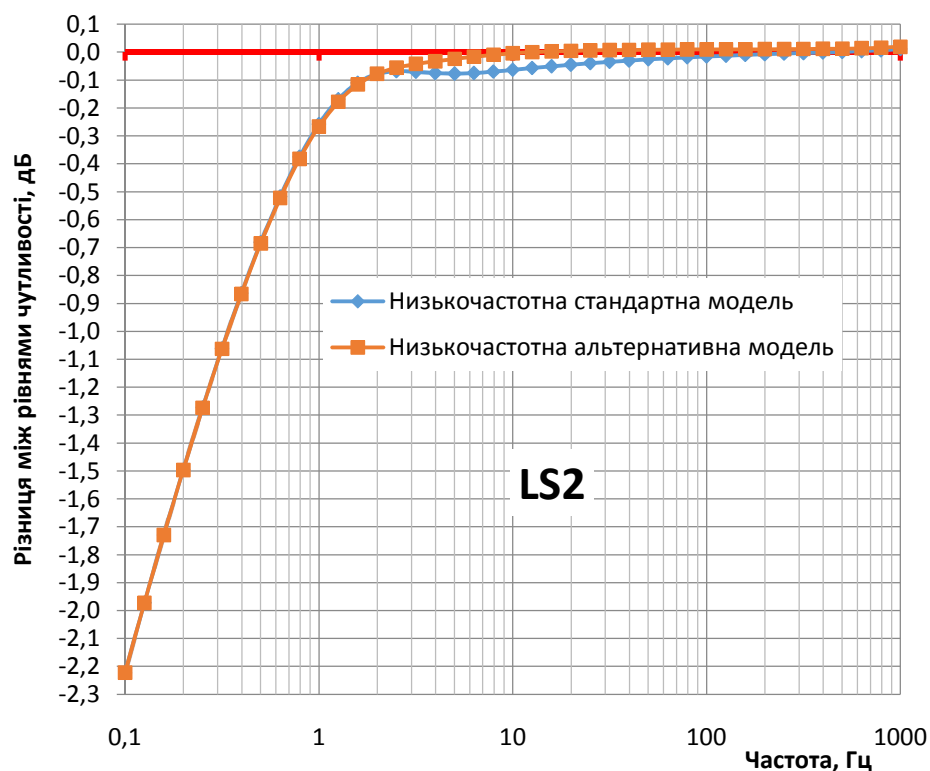
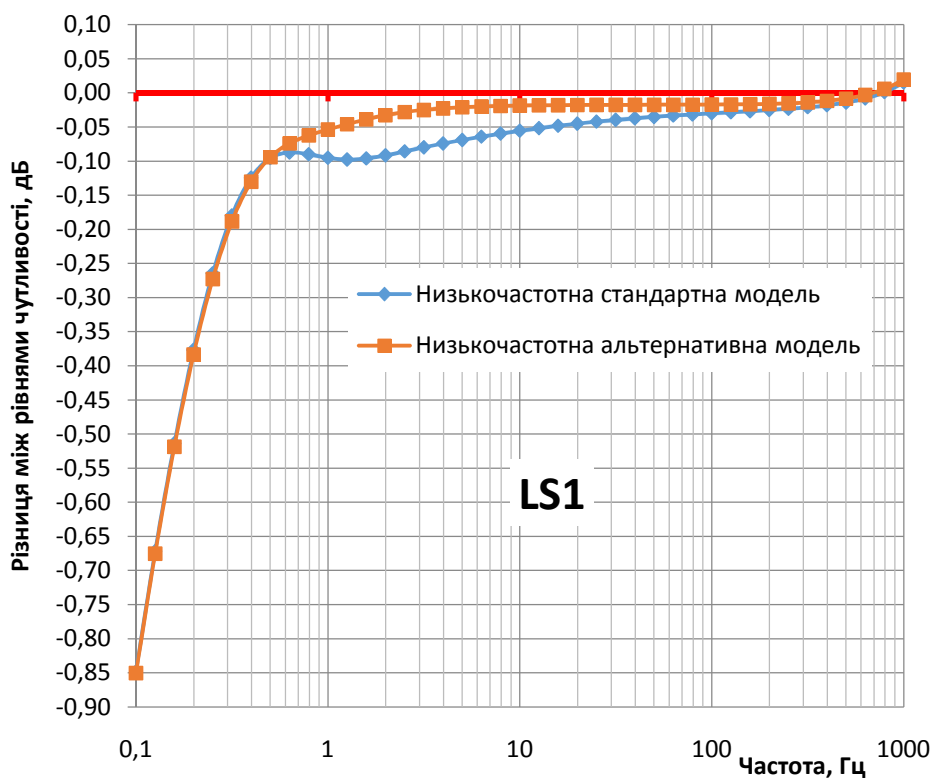


Рисунок 3.5 – Різниця між рівнями чутливості мікрофонів типу LS1 та LS2, які отримано із застосуванням обох моделей визначання поправки на теплопровідність по відношенню до широкосмугової моделі

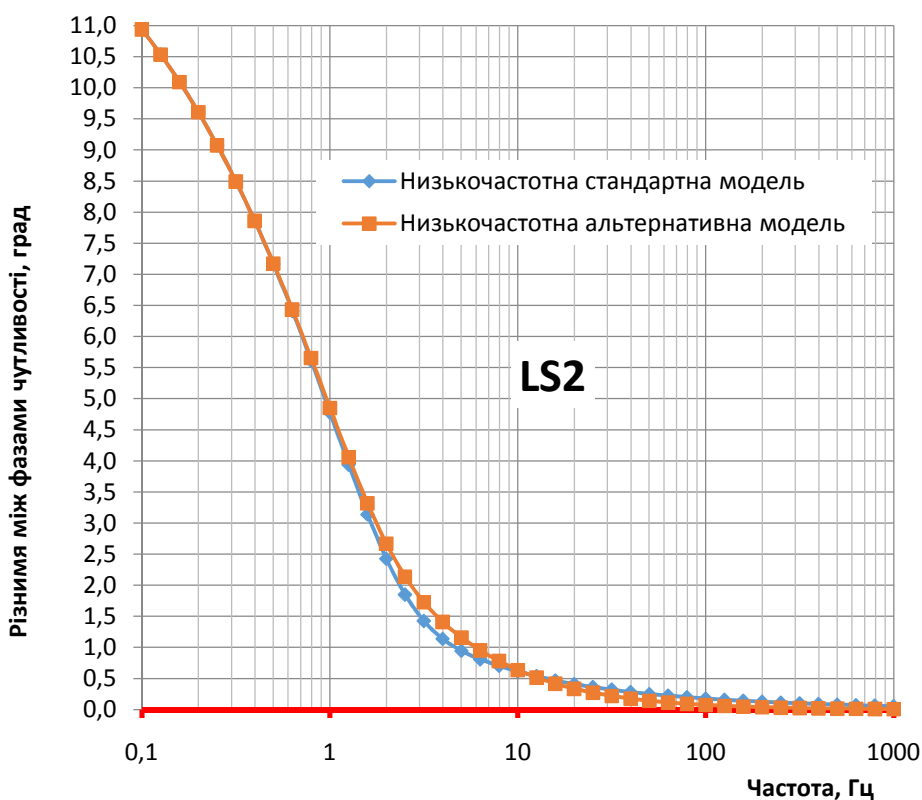
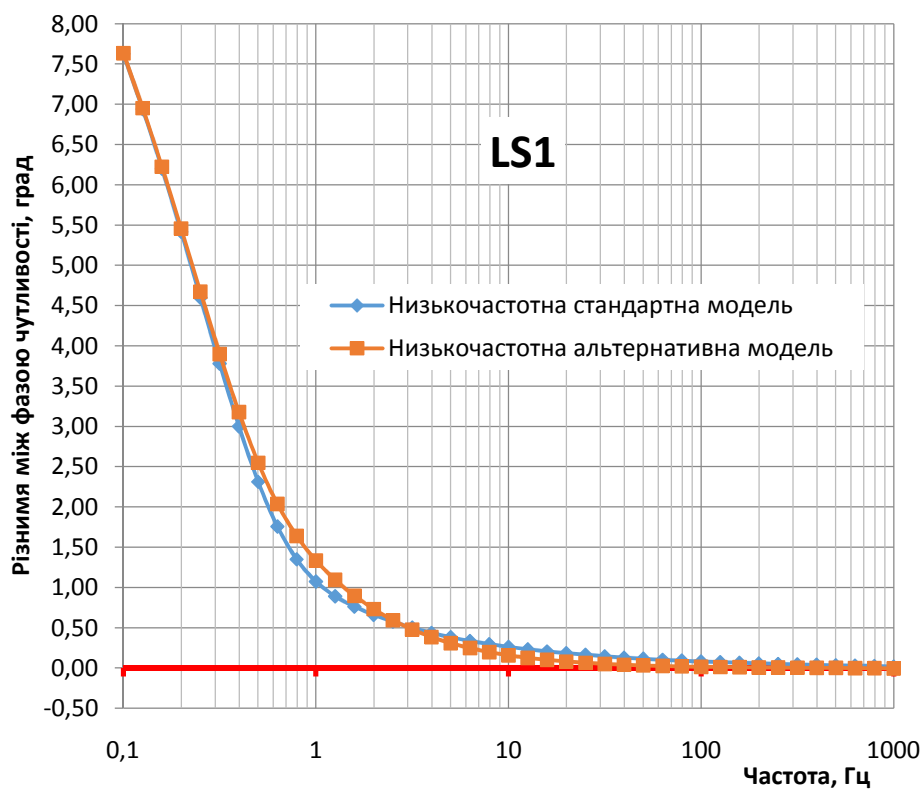


Рисунок 3.6 – Різниця між фазами чутливості мікрофонів типу LS1 та LS2, які отримано із застосуванням обох моделей визначання поправки на теплопровідність по відношенню до широкосмугової моделі

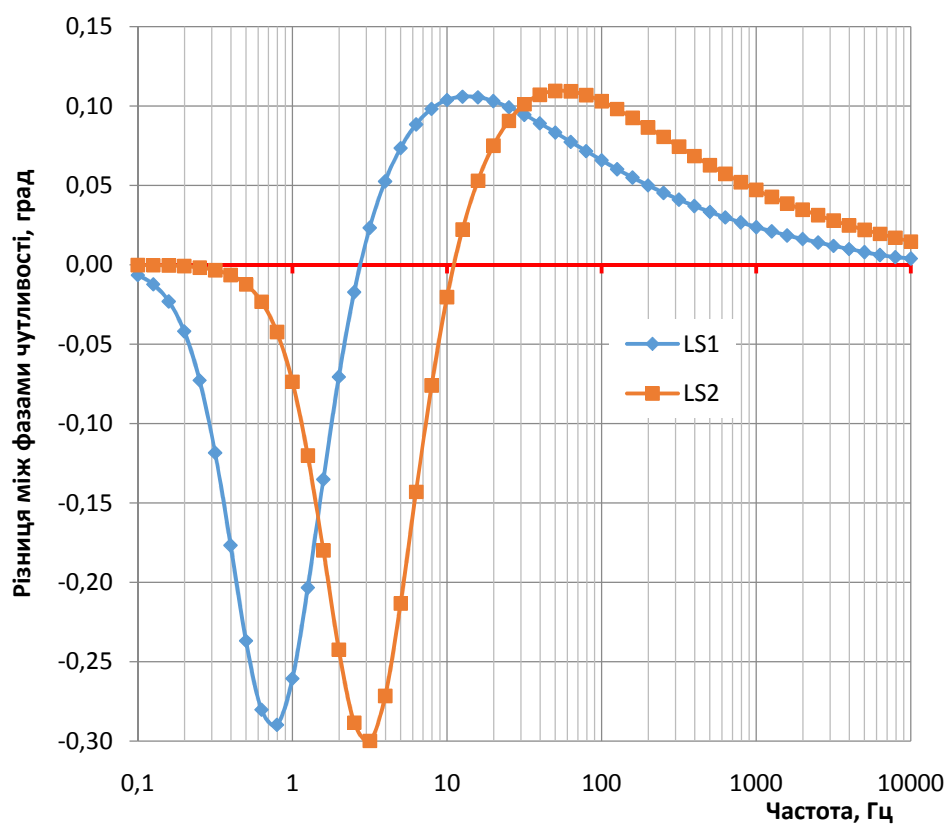
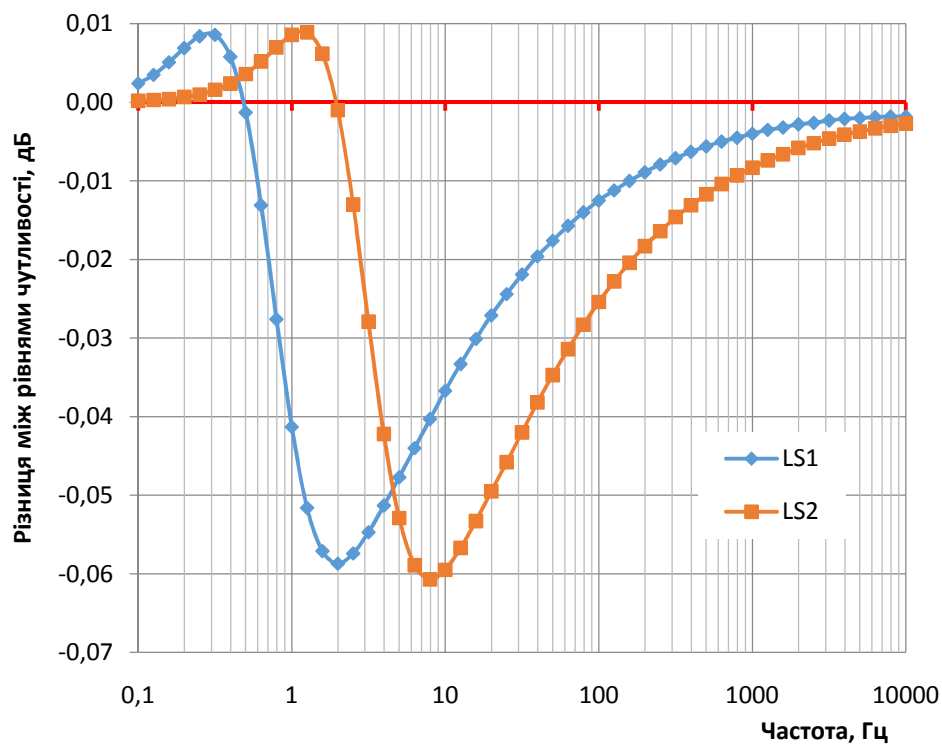


Рисунок 3.7 – Різниця між рівнями та фазами чутливості мікрофонів типу LS1 та LS2 за застосування різних низькочастотних моделей визначання поправки на теплопровідність

3.3 Визначання методу розрахунку поправки на теплопровідність під час калібрування мікрофонів

Із всього вищенаведеного можна зробити наступні висновки стосовно методу розрахунку чутливості мікрофонів за тиском на державному первинному еталоні:

- 1) широкосмугову модель поправки на теплопровідність можна застосовувати на частотах вище 10 – 20 Гц, а на частотах вище 1500 Гц її використання стає обов'язковим. Перехід між моделями розрахунку поправки на теплопровідність, очевидно, слід робити на тій частоті, де результати цих моделей стають рівними між собою;
- 2) спрощені методи розрахунку обох низькочастотних моделей поправки на теплопровідність вносять достатньо велику похибку як в результати визначання рівня чутливості, так і її фази, тому від таких методів необхідно відмовитись;
- 3) хоча результати, які представлено в [43], доволі переконливо свідчать, що так звана альтернативна модель розрахунку поправки на теплопровідність є більш коректною, ніж та модель, яку представлено у стандарті [30], використання альтернативної моделі, на даний момент, призведе до порушення вимог цього стандарту і, як наслідок, появи іще однієї складової непевності вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів на державному еталоні. Як видно із рисунка 3.7, різниця між рівнями чутливості, які отримано за застосування цих моделей, сягає 0.06 дБ, а різниця фаз 0.3°.

3.4 Висновки до розділу

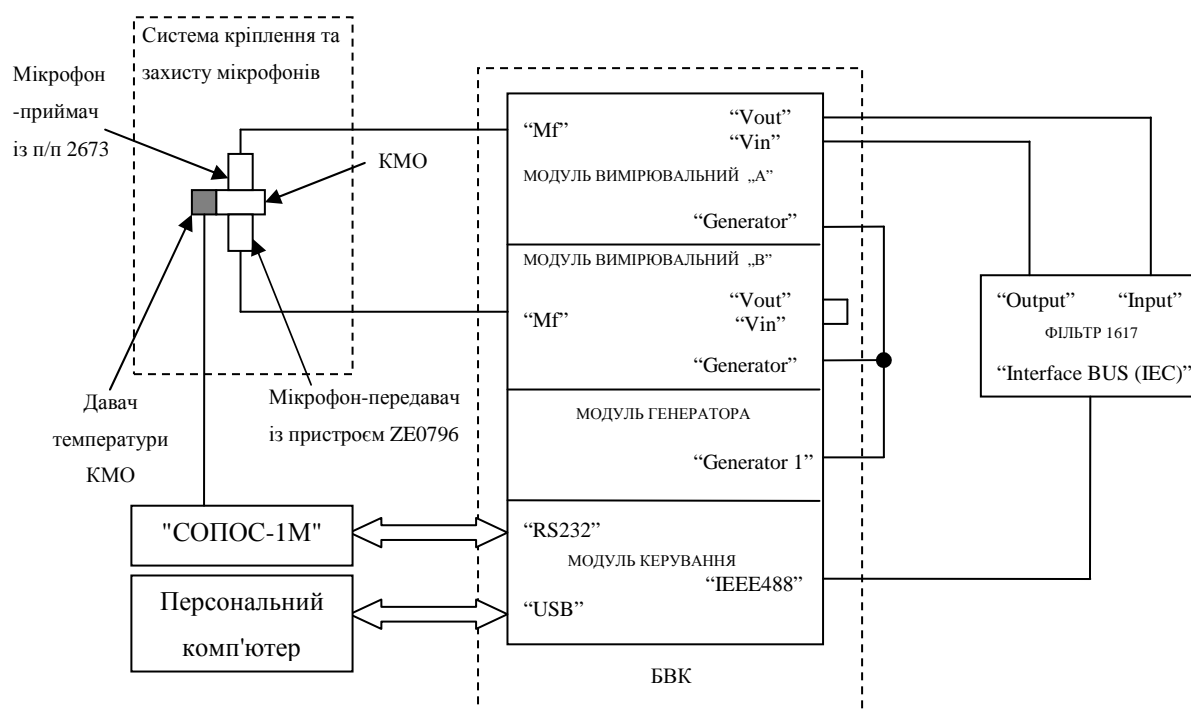
1. Проведено аналіз та оцінення впливу непевності визначання поправки на теплопровідність на результати калібрування мікрофонів;
2. Проаналізовано частотні залежності рівнів чутливості мікрофонів різного типу за застосування низькочастотного та широкосмугового рішень;

3. Розглянуто альтернативну модель розрахунку поправки на теплопровідність;
4. Розглянуто вплив спрощення моделей розрахунку поправки на теплопровідність на непевність калібрування мікрофонів;
5. Встановлено, що широкосмугову модель поправки на теплопровідність можна застосовувати на частотах вищих за 10 – 20 Гц; а частотах вище за 1500 Гц її використання стає обов'язковим.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Опис удосконаленого ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі

На основі проведеного аналізу та дослідження факторів, які впливають на характеристики точності під час калібрування мікрофонів, було створено удосконалену еталонну установку УЕ-2ПУ для калібрування мікрофонів за тиском ДПЕУ ОЗТ, структурна схема якої приведена на рисунку 4.1, а зовнішній вигляд – на рисунку 4.2.



Рисунк 4.1 – Структурна схема удосконаленої еталонної установки УЕ-2ПУ ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі

Удосконалена еталонна установка УЕ-2ПУ ДПЕУ ОЗТ складається з:

- блока вимірювання та контролю (БВК), в який, в свою чергу, входять: модуль вимірювальний каналу «А», модуль вимірювальний каналу «В», модуль генератора та модуль керування;



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд удосконаленої еталонної установки УЕ-2ПУ ДПЕУ ОЗТ в повітряному середовищі

- системи кріплення та захисту мікрофонів, яка дозволяє механічно зафіксувати мікрофони в необхідному положенні та захистити їх від впливу зовнішнього середовища (шуми, повітряні потоки, тощо);
- КМО, під час калібрування однодужових мікрофонів використовують високоточні КМО типу UA1413 та UA1429 виробництва фірми Bruel&Kjaer із сапфіровими кільцями, а під час калібрування півдужових мікрофонів - змінні камери типу ДЕТУ 10.2М;
- попереднього мікрофонного підсилювача типу 2673 для мікрофона приймача;
- пристрою ZE0796, який використовують для під'єднання мікрофона передавача;
- третино-октавного фільтра типу 1617;
- приладу визначення параметрів довкілля типу СОПОС-1М, який дозволяє визначати атмосферний тиск, температуру та відносну вологість повітря, (цей прилад має два датчі температури, що робить можливим визначати температуру повітря в КМО та температуру мікрофонів під час

вимірювань);

- персонального комп'ютера із прикладним програмним забезпеченням, який дозволяє проводити калібрування мікрофонів в автоматичному режимі.

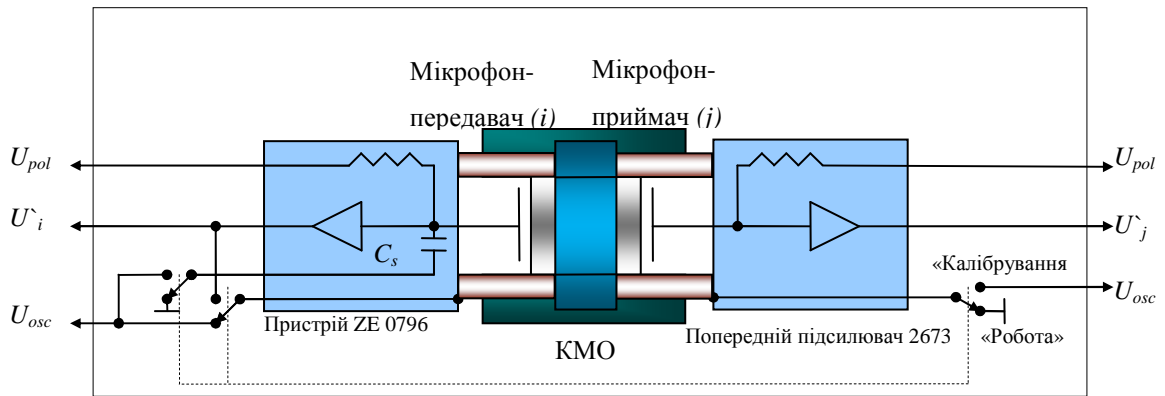
4.2 Аналіз непевності калібрування еталонних мікрофонів на ДПЕУ ОЗТ

Як було показано в п.1.5 джерела непевності вимірювань під час калібрування мікрофонів первинним методом взаємності можна розділити на чотири групи, які створюють головний внесок в загальну непевність вимірювань. Це непевності вимірювань електричного передавального імпедансу, визначання параметрів довкілля, визначання параметрів мікрофонів та визначання геометричних розмірів мікрофонів та КМО.

4.2.1 Оцінення впливу непевності вимірювань електричного передавального імпедансу

На рисунку 4.3 представлена удосконалена схема акустичного з'єднання пари мікрофонів під час вимірювання електричного передавального імпедансу з використанням передавального пристрою ZE0796. Головні переваги такої схеми [56] полягають в тому, що:

- еталонний імпеданс (ємність) знаходиться в безпосередній близькості від мікрофона-передавача, що дозволяє суттєво зменшити паразитні завади;
- відношення імпедансів еталонного конденсатора та мікрофона майже постійне у всьому робочому діапазоні частот, тобто вихідна напруга (струм) також майже постійна;
- сам передавальний пристрій ZE0796 побудований на підсилювачі того самого типу, що і попередній підсилювач 2673, а це дозволяє отримати практично однакові характеристики сигналів в обох каналах.



Позначки

U_{pol} – напруга поляризації мікрофонів;

U_{osc} – напруга збудження/калібрування;

U_j – напруга на виході мікрофона приймача;

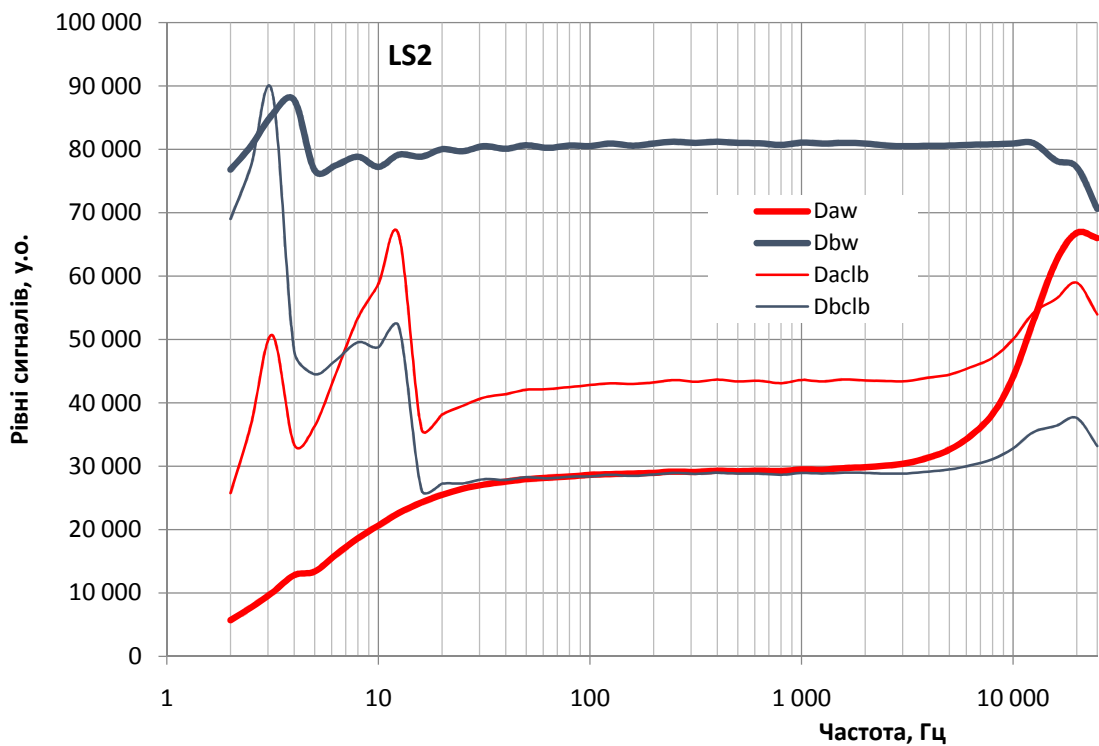
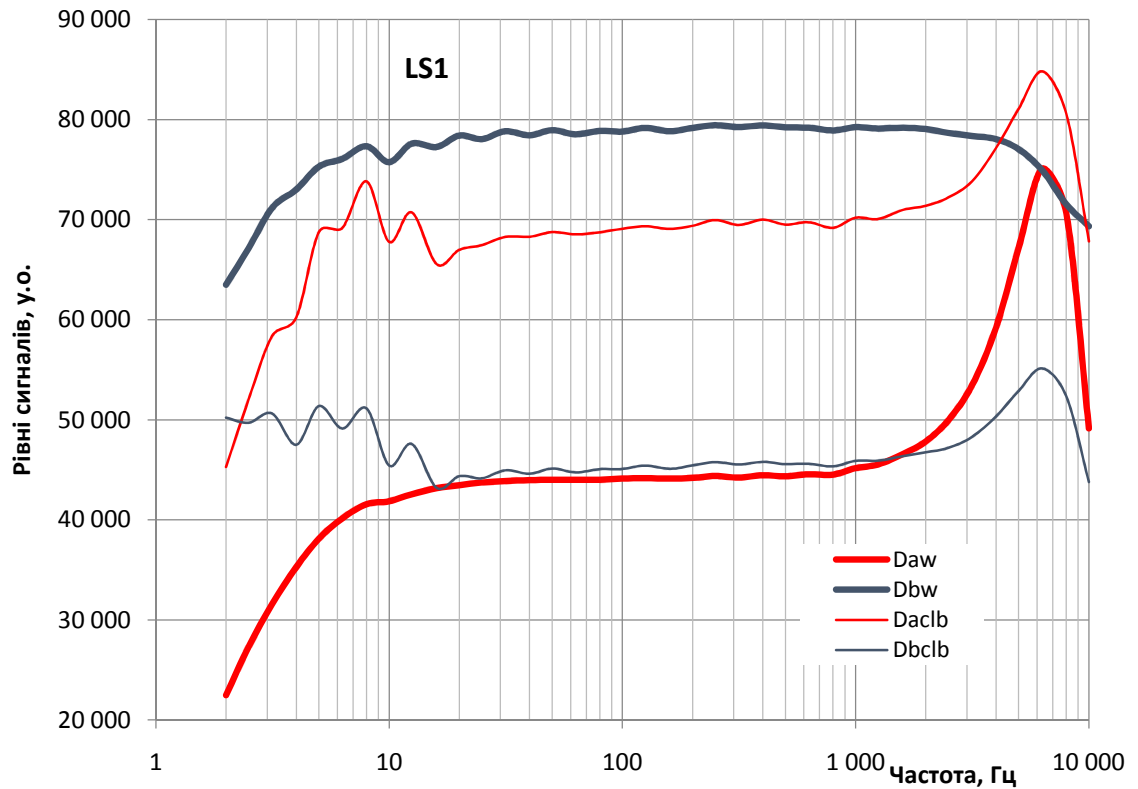
U_i – напруга на еталонній ємності, яку включено послідовно до мікрофона передавача.

Рисунок 4.3 – Схема акустичного з'єднання пари мікрофонів при вимірюванні електричного передавального імпедансу з використанням передавального пристрою ZE0796

Вимірювання електричного передавального імпедансу на удосконаленій еталонній установці УЕ-2ПУ також (як і на еталоні ДЕТУ 10-01-00) проводять у два етапи: на першому (етап "робота") визначають рівні сигналів в вимірювальних каналах разом із коефіцієнтами підсилення каналів; на другому (етап "калібрування") визначають відношення коефіцієнтів підсилення у вимірювальних каналах. Типові частотні залежності рівнів сигналів, які виникають у вимірювальних каналах під час калібрування еталонних мікрофонів, представлено на рисунку 4.4.

Головні джерела непевності для такої схеми вимірювань це:

- шуми вимірювальних каналів;
- перехресні завади між каналами;
- нелінійність вимірювальних каналів;
- часова нестабільність.



Позначки:

Daw, Dbw – рівень сигналу у вимірювальних каналах А та В в режимі «Робота», відповідно;

Daclb, Dbclb – рівень сигналу у вимірювальних каналах А та В в режимі «Калібрування», відповідно.

Рисунок 4.4 – Типові частотні залежності рівнів сигналів у вимірювальних каналах під час калібрування еталонних мікрофонів

4.2.1.1 Визначання впливу шумів та перехресних завад на непевність вимірювання електричного передавального імпедансу під калібрування мікрофонів

Визначення рівня шумів вимірювальних каналів еталонної установки УЕ-2ПУ під час калібрування еталонних мікрофонів проводилось в робочому режимі вимірювань, але із тією різницею, що з мікрофонів була знята напруга поляризації. Таким чином можливо визначити рівні власних електричних шумів та перехресних завад у вимірювальних каналах.

Визначання сумарної непевності визначення відношення напруг у вимірювальних каналах, яка виникає внаслідок впливу шумів, під час калібрування мікрофонів, проводилось за формулою:

$$u_{noise} = \sqrt{u_{Aw}^2 + u_{Bw}^2 + u_{Aclb}^2 + u_{Bclb}^2} \quad (4.1)$$

де: u_{Aw} , u_{Bw} - непевність, яка виникає внаслідок впливу шумів, у вимірювальних каналах А та В у робочому режимі, відповідно;

u_{Aclb} , u_{Bclb} - непевність, яка виникає внаслідок впливу шумів, у вимірювальних каналах А та В у режимі калібрування, відповідно.

В свою чергу, непевності, які виникають у вимірювальних каналах за різних режимів роботи, розраховували за формулою:

$$u_{im} = 20 \log \left(\frac{D_{Sim} + D_{Nim}}{D_{Sim}} \right), \text{ у дБ} \quad (4.2)$$

де: u_{im} - непевність у вимірювальному каналі i ($i=A,B$) за режиму роботи m ($m=w,clb$);

D_{Sim} - значення сигналу у i -вимірювальному каналі за режиму роботи m ;

D_{Nim} - значення шуму у i -вимірювальному каналі за режиму роботи m .

Результати визначання рівнів шумів у вимірювальних каналах та стандартної непевності, яка виникає внаслідок їх впливу, під час калібрування мікрофонів типу LS1 та LS2 подано у таблицях 4.2 та 4.3, відповідно, та у графічному вигляді – на рисунку 4.5.

Таблиця 4.2 – Результати визначання рівнів шумів у вимірювальних каналах та стандартної непевності, яка виникає внаслідок їх впливу, під час калібрування мікрофонів типу LS1

Частота, Гц	Вимірювальний канал «А»				Вимірювальний канал «В»				Стандартна непевність, u_{noise} дБ
	Режим «Вимірювання»		Режим «Калібрування»		Режим «Вимірювання»		Режим «Калібрування»		
	D_{SAw}	D_{NAw}	D_{SAclb}	D_{NAclb}	D_{SBw}	D_{NBw}	D_{SBclb}	D_{NBclb}	
1,9953	22488	33	45289	22	63496	5	50231	8	0,014
2,5119	27350	27	52051	55	67144	5	49711	8	0,013
3,1623	31578	21	58367	28	71166	5	50643	8	0,007
3,9811	35283	16	60222	11	73009	5	47519	8	0,005
5,0119	38124	15	68747	33	75294	5	51381	8	0,006
6,3096	40160	5	69161	1	76064	5	49143	8	0,002
7,9433	41574	10	73826	7	77331	5	51155	9	0,003
10,000	41867	7	67780	38	75738	5	45447	8	0,005
12,589	42571	5	70730	46	77588	5	47601	8	0,006
15,849	43179	5	65548	37	77261	5	43210	9	0,005
19,953	43484	5	66 978	31	78389	5	44384	9	0,005
25,119	43744	6	67458	15	78045	5	44170	9	0,003
31,623	43891	7	68274	24	78820	5	44960	10	0,004
39,811	43971	9	68290	18	78418	5	44622	10	0,004
50,119	44025	17	68752	18	78937	5	45141	7	0,004
63,096	44012	5	68536	15	78521	5	44753	10	0,003
79,433	44009	8	68742	23	78861	5	45078	14	0,004
100,00	44141	6	69085	11	78792	4	45100	18	0,004
125,89	44177	6	69336	26	79162	6	45438	14	0,004
158,49	44136	5	69080	4	78828	6	45114	16	0,003
199,53	44193	5	69387	7	79162	5	45453	11	0,003
251,19	44402	6	69962	26	79424	7	45781	14	0,004
316,23	44234	7	69468	13	79246	6	45556	7	0,003
398,11	44474	6	69997	23	79408	6	45799	15	0,004
501,19	44357	6	69513	19	79220	6	45581	0	0,003
630,96	44570	5	69738	19	79172	5	45618	12	0,003
794,33	44533	6	69188	21	78907	6	45356	0	0,003
1000,0	45178	6	70193	1	79234	6	45907	12	0,003
1258,9	45554	6	70070	17	79102	6	45926	0	0,002
1584,9	46611	6	70983	16	79170	6	46392	0	0,002
1995,3	47850	6	71381	17	79048	6	46757	12	0,003
2511,9	49988	5	72222	20	78656	6	47214	13	0,004
3162,3	53428	5	73813	18	78361	6	48294	15	0,004
3981,1	59942	5	77173	25	78037	7	50358	16	0,004
5011,9	67198	5	81082	28	77032	8	52916	19	0,004
6309,6	75096	7	84828	32	74938	8	55150	22	0,005
7943,3	70630	5	80567	43	71530	18	52352	28	0,007
10000,0	49148	16	67830	55	69348	22	43788	35	0,011

Таблиця 4.3 – Результати визначання рівнів шумів у вимірювальних каналах та стандартної непевності, яка виникає внаслідок їх впливу, під час калібрування мікрофонів типу LS2

Частота, Гц	Вимірювальний канал «А»				Вимірювальний канал «В»				Стандартна непевність, u_{noise} дБ
	Режим «Вимірювання»		Режим «Калібрування»		Режим «Вимірювання»		Режим «Калібрування»		
	D_{SAw}	D_{NAw}	D_{SAclb}	D_{NAclb}	D_{SBw}	D_{NBw}	D_{SBclb}	D_{NBclb}	
1,9953	5681	25	25767	16	76813	5	69012	24	0,039
2,5119	7693	30	36577	18	80528	6	77379	18	0,034
3,1623	10014	7	50692	19	85475	6	89009	25	0,007
3,9811	12786	19	33430	11	87777	5	48136	23	0,014
5,0119	13354	19	36354	38	76661	5	44497	23	0,016
6,3096	16010	5	44640	1	77491	5	46732	27	0,006
7,9433	18603	21	53386	7	78834	5	49557	5	0,010
10,000	20621	19	58786	33	77234	5	48764	5	0,009
12,589	22612	27	66407	32	79167	5	52009	26	0,012
15,849	24262	6	35836	29	78847	5	26229	5	0,008
19,953	25479	19	38146	27	80030	5	27247	5	0,009
25,119	26417	25	39518	22	79688	5	27288	5	0,010
31,623	27080	31	40832	17	80497	5	27951	5	0,011
39,811	27561	15	41369	13	80099	5	27837	5	0,006
50,119	27930	8	42060	16	80643	5	28263	5	0,004
63,096	28164	11	42164	18	80232	5	28075	5	0,005
79,433	28347	18	42485	24	80586	5	28341	5	0,008
100,00	28615	18	42807	17	80518	4	28396	20	0,009
125,89	28736	19	43077	13	80912	6	28647	6	0,007
158,49	28819	17	42973	4	80578	5	28463	6	0,006
199,53	28942	31	43220	7	80925	5	28706	5	0,010
251,19	29130	12	43596	24	81195	7	28925	17	0,008
316,23	29072	14	43334	20	81026	6	28806	18	0,008
398,11	29262	9	43665	19	81195	6	28962	6	0,005
501,19	29188	7	43375	18	81006	6	28833	0	0,004
630,96	29295	7	43482	19	80964	6	28835	6	0,005
794,33	29200	7	43101	18	80700	6	28650	0	0,004
1000,0	29473	6	43607	1	81049	6	28931	6	0,003
1258,9	29445	7	43375	10	80918	6	28850	0	0,003
1584,9	29700	6	43686	15	81014	6	28978	0	0,004
1995,3	29812	7	43557	18	80932	6	28957	6	0,005
2511,9	30062	7	43439	16	80612	5	28828	5	0,004
3162,3	30467	7	43438	21	80488	5	28860	6	0,005
3981,1	31352	8	43973	18	80580	5	29149	17	0,007
5011,9	32586	9	44447	17	80585	5	29473	6	0,004
6309,6	34788	10	45616	20	80728	5	30146	5	0,005
7943,3	38198	6	47117	21	80797	6	31117	24	0,008
10000,0	44062	18	50021	23	80932	6	32818	16	0,007
12589	52983	25	54192	47	80971	6	35393	6	0,009
15849	62349	38	56425	41	78208	9	36387	28	0,011
19953	66802	7	58951	1	77195	7	37618	7	0,002
25119	65987	62	53952	90	70610	7	33174	7	0,017

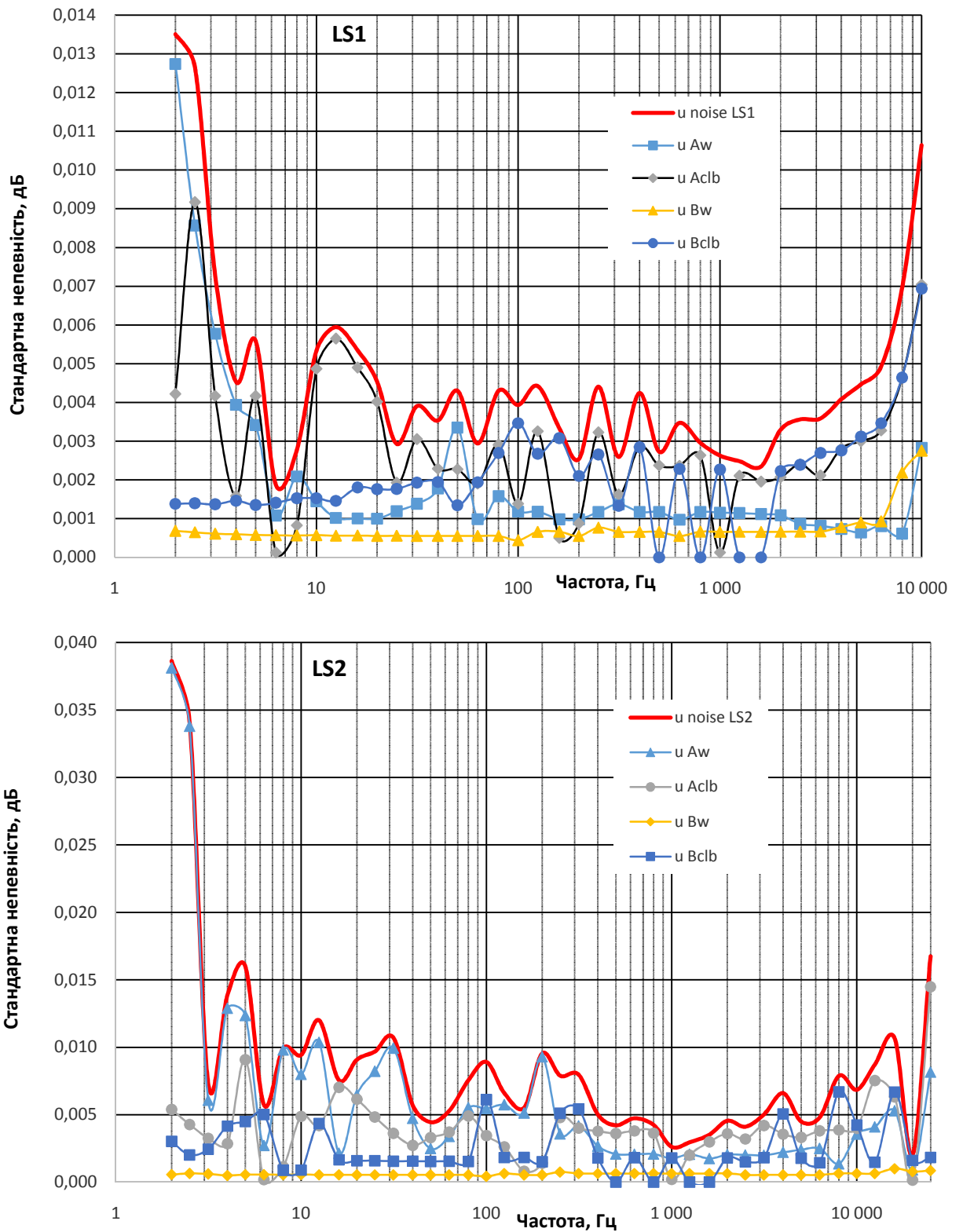


Рисунок 4.5 – Частотні залежності стандартних непевностей, які виникають внаслідок впливу шумів вимірювальних каналів, під час калібрування мікрофонів

4.2.1.2 Визначання впливу нелінійності вимірювальних каналів на непевність вимірювання електричного передавального імпедансу під час калібрування мікрофонів

Як видно із рівнів сигналів у вимірювальних каналах під час калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ, які представлено на рисунку 4.4, вони суттєво відрізняються між собою на етапах «Робота» та «Калібрування», що може призвести до виникнення додаткового джерела непевності під час вимірювань внаслідок нелінійності амплітудно-частотних характеристик каналів.

Нелінійність вимірювальних каналів було оцінено шляхом вимірювання рівня напруги на виходах каналів, коли на їх вхід подавали напругу збудження, яку збільшували із заданим кроком та вимірювали за допомогою вольтметра із достатньою точністю (в якості вольтметра було використано мультиметр типу Keithley 2002 s/n 4129980). Після чого порівнювали зміну напруги на виході вимірювальних каналів із зміною напруги на їх вході за формулою:

$$k_{lin,i} = 20 \log \left(\frac{V_j}{V_{ref}} \frac{D_{i,ref}}{D_{ij}} \right), \text{ у дБ} \quad (4.3)$$

де: $k_{lin,i}$ - коефіцієнт нелінійності i - вимірювального каналу;

V_j, V_{ref} - покази вольтметра на j -кроці зміни вхідної напруги та на опорному значенні, відповідно;

$D_{ij}, D_{i,ref}$ - покази i -вимірювального каналу на j -кроці зміни вхідної напруги та на опорному значенні, відповідно.

За опорне значення було вибрано вхідну напругу із номінальним значенням 4 В, яка створює рівні сигналів, що є близькими до середніх значень сигналів в обох вимірювальних каналах для обох типів мікрофонів. Результати вимірювань та обчислень коефіцієнтів нелінійності вимірювальних каналів представлено в таблиці 4.4. Як видно із представлених результатів, коефіцієнти нелінійності обох вимірювальних каналів знаходяться в межах $\pm 0,004$ дБ.

Таблиця 4.4 - Результати визначання коефіцієнтів нелінійності вимірювальних каналів.

Номінальний рівень вхідної напруги	$k_{lin,A}$, дБ						$k_{lin,B}$, дБ					
	1 В	2 В	3 В	4 В	5 В	6 В	1 В	2 В	3 В	4 В	5 В	6 В
Частота, Гц												
1,9953	-0,003	-0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	-0,003	-0,002	-0,001	0,000	0,001	0,000
2,5119	-0,004	0,002	0,000	0,000	0,000	0,004	-0,003	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001
3,1623	-0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,004	-0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
3,9811	-0,001	-0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
5,0119	-0,002	0,000	0,001	0,000	-0,002	-0,002	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
6,3096	0,001	-0,004	0,002	0,000	0,002	0,003	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7,9433	-0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,003	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10,000	-0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,003	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,001
12,589	-0,001	0,002	0,001	0,000	0,000	0,004	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15,849	-0,001	-0,003	-0,003	0,000	0,001	-0,002	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19,953	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
25,119	-0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
31,623	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
39,811	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
50,119	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
63,096	-0,002	-0,001	-0,001	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
79,433	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100,00	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
125,89	-0,002	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
158,49	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
199,53	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
251,19	-0,002	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
316,23	-0,002	-0,002	0,000	0,000	0,001	0,002	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
398,11	-0,004	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
501,19	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
630,96	-0,001	-0,003	-0,001	0,000	-0,001	0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
794,33	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1000,0	-0,002	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1258,9	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1584,9	-0,002	-0,001	-0,001	0,000	0,001	0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1995,3	-0,003	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2511,9	-0,002	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3162,3	-0,002	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001
3981,1	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001
5011,9	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001
6309,6	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001
7943,3	0,000	0,001	0,000	0,000	-0,003	-0,003	0,000	0,001	0,001	0,000	-0,002	-0,002
10000,0	0,001	0,002	0,002	0,000	-0,001	-0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	-0,001
12589	0,002	0,002	0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	-0,001	-0,001
15849	0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	-0,001
19953	0,002	0,002	0,000	0,000	-0,001	-0,001	0,003	0,002	0,001	0,000	-0,001	-0,002
25119	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,000	-0,001	-0,002

Оскільки рівні вимірюваних сигналів, особливо на низьких частотах та за малих вхідних сигналів, сильно залежать від акустичних завад довкілля, а застосовні схемотехнічні рішення не передбачають частотної залежності нелінійності, то за оцінку нелінійності вимірювальних каналів можна прийняти усередненні за частотою виміряні значення нелінійності каналів установки УЕ-2ПУ.

Непевність отриманих результатів було розраховано за формулою:

$$u_{klin,i} = \sqrt{u_{bV,jref}^2 + u_{aV,jref}^2 + u_{bDi,jref}^2 + u_{aDi,jref}^2} \quad (4.4)$$

де: $u_{bV,jref}$, $u_{aV,jref}$ - непевність вимірювання відношення напруг мультиметром на j -кроці зміни вхідної напруги до опорного значення цієї напруги, за типом В та за типом А, відповідно;

$u_{bDi,jref}$, $u_{aDi,jref}$ - непевність вимірювання відношення напруг i -вимірювальним каналом на j -кроці зміни вхідної напруги до опорного значення цієї напруги, за типом В та за типом А, відповідно.

Результати обчислення непевності визначання коефіцієнтів нелінійності вимірювальних каналів для мінімального рівня вхідної напруги (коли ця непевність має найбільше значення) представлено в таблиці 4.5. На рисунку 4.6 подано усередненні за частотою виміряні значення нелінійності каналів разом із їх відповідною непевністю.

Стандартну непевність, яка виникає внаслідок нелінійності вимірювальних каналів під час калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ, розраховують за формулою:

$$u_{lin} = \sqrt{k_{lin,A}^2 + u_{klin,A}^2 + k_{lin,B}^2 + u_{klin,B}^2} \quad (4.5)$$

Оскільки співвідношення сигналів у вимірювальних каналах залежить від частоти та типу мікрофонів, які калібрують, то під час розрахунку вибирають стандартну непевність нелінійності вимірювальних каналів відповідних рівнів. В таблиці 4.6 приведено результати розрахунку стандартної непевності, яка

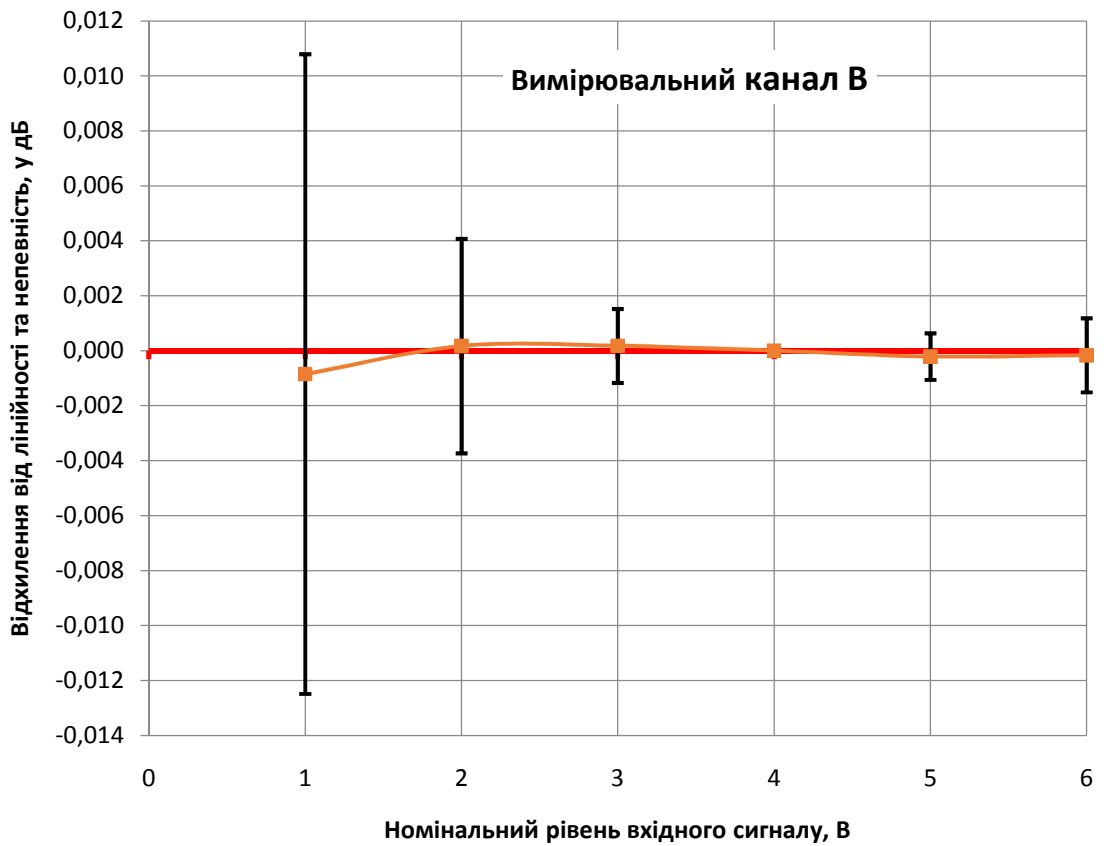
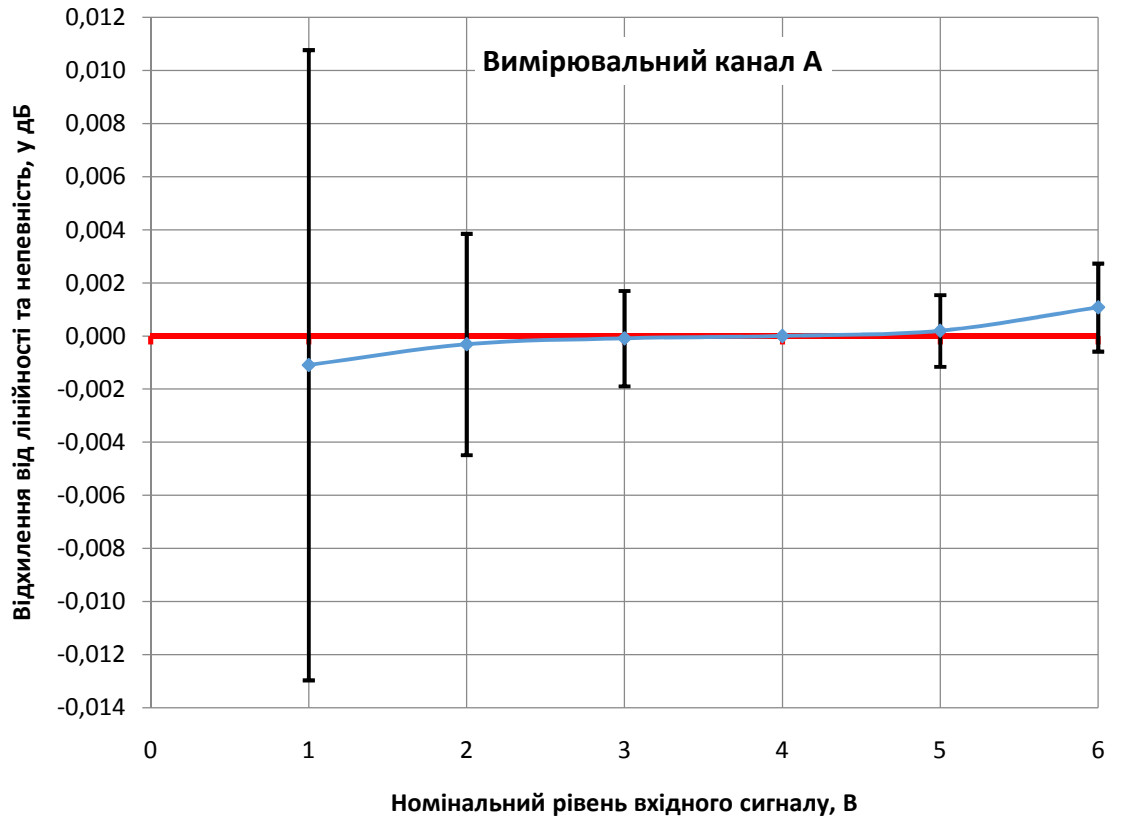


Рисунок 4.6 – Усередненні за частотою виміряні значення нелінійності каналів разом із їх відповідною непевністю

Таблиця 4.5 - Результати оцінки непевності визначання коефіцієнтів нелінійності вимірювальних каналів коли вхідна напруга становить 1 В

Непевність у дБ

Частота, Гц	$U_{bV,1ref}$	$U_{aV,1ref}$	$U_{bDa,1ref}$	$U_{aDa,1ref}$	U_{klinA1}	$U_{bDb,1ref}$	$U_{aDa,1ref}$	U_{klinB1}
1,9953	0,0116	0,0001	0,0025	0,0028	0,012	0,0009	0,0011	0,012
2,5119	0,0116	0,0003	0,0021	0,0025	0,012	0,0009	0,0008	0,012
3,1623	0,0116	0,0002	0,0018	0,0019	0,012	0,0008	0,0003	0,012
3,9811	0,0116	0,0001	0,0016	0,0027	0,012	0,0008	0,0002	0,012
5,0119	0,0116	0,0001	0,0015	0,0022	0,012	0,0008	0,0002	0,012
6,3096	0,0116	0,0002	0,0014	0,0012	0,012	0,0008	0,0001	0,012
7,9433	0,0116	0,0003	0,0014	0,0023	0,012	0,0008	0,0003	0,012
10,000	0,0116	0,0004	0,0014	0,0020	0,012	0,0008	0,0001	0,012
12,589	0,0117	0,0004	0,0013	0,0027	0,012	0,0008	0,0002	0,012
15,849	0,0117	0,0004	0,0013	0,0018	0,012	0,0008	0,0001	0,012
19,953	0,0117	0,0016	0,0013	0,0009	0,012	0,0008	0,0002	0,012
25,119	0,0117	0,0016	0,0013	0,0021	0,012	0,0008	0,0003	0,012
31,623	0,0117	0,0015	0,0013	0,0017	0,012	0,0008	0,0003	0,012
39,811	0,0117	0,0013	0,0013	0,0006	0,012	0,0008	0,0001	0,012
50,119	0,0117	0,0011	0,0013	0,0022	0,012	0,0008	0,0002	0,012
63,096	0,0117	0,0012	0,0013	0,0012	0,012	0,0008	0,0001	0,012
79,433	0,0117	0,0011	0,0013	0,0004	0,012	0,0008	0,0002	0,012
100,00	0,0116	0,0011	0,0013	0,0019	0,012	0,0008	0,0001	0,012
125,89	0,0116	0,0010	0,0013	0,0005	0,012	0,0007	0,0003	0,012
158,49	0,0116	0,0010	0,0013	0,0003	0,012	0,0008	0,0002	0,012
199,53	0,0117	0,0010	0,0013	0,0001	0,012	0,0007	0,0001	0,012
251,19	0,0117	0,0008	0,0013	0,0002	0,012	0,0007	0,0002	0,012
316,23	0,0117	0,0007	0,0013	0,0010	0,012	0,0007	0,0003	0,012
398,11	0,0117	0,0008	0,0013	0,0006	0,012	0,0007	0,0003	0,012
501,19	0,0117	0,0008	0,0013	0,0009	0,012	0,0007	0,0003	0,012
630,96	0,0117	0,0006	0,0013	0,0009	0,012	0,0007	0,0003	0,012
794,33	0,0117	0,0008	0,0013	0,0004	0,012	0,0008	0,0003	0,012
1000,0	0,0116	0,0008	0,0013	0,0002	0,012	0,0007	0,0001	0,012
1258,9	0,0116	0,0007	0,0013	0,0003	0,012	0,0007	0,0000	0,012
1584,9	0,0116	0,0008	0,0012	0,0004	0,012	0,0007	0,0002	0,012
1995,3	0,0116	0,0008	0,0012	0,0005	0,012	0,0007	0,0002	0,012
2511,9	0,0116	0,0008	0,0012	0,0004	0,012	0,0008	0,0002	0,012
3162,3	0,0116	0,0008	0,0011	0,0005	0,012	0,0008	0,0003	0,012
3981,1	0,0116	0,0008	0,0010	0,0002	0,012	0,0008	0,0002	0,012
5011,9	0,0116	0,0008	0,0009	0,0004	0,012	0,0008	0,0003	0,012
6309,6	0,0115	0,0008	0,0008	0,0003	0,012	0,0008	0,0002	0,012
7943,3	0,0115	0,0008	0,0008	0,0008	0,012	0,0008	0,0004	0,012
10000,0	0,0114	0,0008	0,0012	0,0001	0,011	0,0009	0,0001	0,011
12589	0,0112	0,0001	0,0017	0,0003	0,011	0,0008	0,0000	0,011
15849	0,0111	0,0008	0,0007	0,0019	0,011	0,0008	0,0003	0,011
19953	0,0110	0,0002	0,0056	0,0003	0,012	0,0008	0,0002	0,011
25119	0,0110	0,0000	0,0088	0,0013	0,014	0,0009	0,0005	0,011

Таблиця 4.6 – Частотні залежності стандартної непевності, яка виникає внаслідок нелінійності вимірювальних каналів, під час калібрування різних типів мікрофонів та відповідні рівні вхідних сигналів (j_A та j_B)

Непевність у дБ

Частота, Гц	LS1							LS2						
	$k_{lin,A}$	j_A	$u_{lin,A}$	$k_{lin,B}$	j_B	$u_{lin,B}$	u_{lin}	$k_{lin,A}$	j_A	$u_{lin,A}$	$k_{lin,B}$	j_B	$u_{lin,B}$	u_{lin}
1,9953	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0019	0,012	-0,001	1	0,012	0,000	4	0,0000	0,012
2,5119	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0016	0,012	-0,001	1	0,012	0,000	4	0,0000	0,012
3,1623	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0013	0,012	-0,001	1	0,012	0,000	4	0,0000	0,012
3,9811	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0013	0,012	-0,001	1	0,012	0,000	4	0,0000	0,012
5,0119	0,000	2	0,004	0,000	5	0,0013	0,004	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0010	0,012
6,3096	0,000	2	0,004	0,000	5	0,0013	0,005	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0009	0,012
7,9433	0,000	2	0,004	0,000	5	0,0013	0,004	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0008	0,012
10,000	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0008	0,012
12,589	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0013	0,002	-0,001	1	0,012	0,000	5	0,0008	0,012
15,849	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0013	0,002	-0,001	1	0,012	0,000	6	0,0013	0,012
19,953	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,002	0,000	6	0,0013	0,002
25,119	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0014	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0014	0,002
31,623	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0014	0,002	0,000	3	0,002	0,000	6	0,0014	0,002
39,811	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
50,119	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
63,096	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
79,433	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,002	0,000	6	0,0013	0,002
100,00	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
125,89	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
158,49	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
199,53	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
251,19	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
316,23	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,002	0,000	6	0,0013	0,002
398,11	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
501,19	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
630,96	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
794,33	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,002	0,000	6	0,0013	0,002
1000,0	0,001	6	0,002	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,002	0,000	6	0,0013	0,002
1258,9	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
1584,9	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,002	0,000	6	0,0013	0,002
1995,3	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
2511,9	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
3162,3	0,001	6	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
3981,1	0,000	5	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
5011,9	0,001	5	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
6309,6	0,001	5	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
7943,3	0,001	5	0,001	0,000	6	0,0017	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0017	0,002
10000	0,001	5	0,001	0,000	6	0,0013	0,002	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
12589	-	-	-	-	-	-	-	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
15849	-	-	-	-	-	-	-	0,000	3	0,001	0,000	6	0,0013	0,002
19953	-	-	-	-	-	-	-	0,000	3	0,003	0,000	6	0,0013	0,003
25119	-	-	-	-	-	-	-	0,000	3	0,004	0,000	6	0,0013	0,004

виникає внаслідок нелінійності вимірювальних каналів під час калібрування різних типів мікрофонів.

4.2.1.3 Визначання впливу часової нестабільності вимірювальних каналів на непевність вимірювання електричного передавального імпедансу під час калібрування мікрофонів

Оскільки визначання відношення напруг під час калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ відбувається у два етапи, то часова нестабільність вимірювальних каналів може впливати на непевність визначання відношення напруг на мікрофонах.

Часову нестабільність вимірювальних каналів було визначено шляхом визначання зміни відношення показів у вимірювальних каналах в режимі калібрування (це було зроблено із метою зменшення впливу залежності параметрів мікрофонів, а тим самим і їх вихідних сигналів, від умов довкілля) за кілька годин.

Саму часову нестабільність було оцінено як кут нахилу лінійної регресії вимірюваного значення відношення показів вимірювальних каналів за час спостережень, k_{time} , у дБ за годину.

Результати оцінювання часової нестабільності вимірювальних каналів подано у таблиці 4.7.

Як видно із представлених результатів, абсолютне значення зміни відношення показів вимірювальних каналів не перевищує 0.0006 дБ за годину. Оскільки під час калібрування мікрофонів, час між вимірюваннями у режимі «Робота» та у режимі «Калібрування» в найгіршому випадку не перевищує 5 хвилин, то можна зробити висновок, що цією складовою непевності можна знехтувати.

Таблиця 4.7 – Результати оцінювання часової нестабільності вимірювальних каналів еталонної установки УЕ-2ПУ

Частота, Гц	Спостереження (год)						Середнє значення	СКВ, дБ	k_{time} дБ/год
	1	2	3	4	5	6			
1,9953	0,93876	0,93674	0,93714	0,93518	0,93571	0,93553	0,93651	0,012	-0,0006
2,5119	1,08687	1,08950	1,08817	1,08886	1,08754	1,08761	1,08809	0,008	0,0000
3,1623	1,20268	1,20098	1,20154	1,20104	1,20032	1,19961	1,20103	0,008	-0,0005
3,9811	1,28227	1,28062	1,28353	1,28114	1,27920	1,28093	1,28128	0,010	-0,0004
5,0119	1,39244	1,39555	1,39623	1,39430	1,39445	1,39571	1,39478	0,009	0,0003
6,3096	1,46786	1,46686	1,46635	1,46650	1,46681	1,46618	1,46676	0,004	-0,0002
7,9433	1,50463	1,50419	1,50422	1,50404	1,50396	1,50391	1,50416	0,002	-0,0001
10,000	1,55700	1,55575	1,55533	1,55534	1,55425	1,55501	1,55545	0,005	-0,0004
12,589	1,55056	1,55080	1,55094	1,54990	1,55069	1,55043	1,55055	0,002	-0,0001
15,849	1,58242	1,58101	1,58152	1,58130	1,58129	1,58106	1,58143	0,003	-0,0002
19,953	1,57355	1,57349	1,57335	1,57354	1,57327	1,57316	1,57339	0,001	-0,0001
25,119	1,59211	1,59184	1,59144	1,59160	1,59134	1,59075	1,59151	0,003	-0,0002
31,623	1,58295	1,58281	1,58307	1,58251	1,58254	1,58250	1,58273	0,001	-0,0001
39,811	1,59527	1,59460	1,59458	1,59436	1,59428	1,59415	1,59454	0,002	-0,0002
50,119	1,58721	1,58681	1,58692	1,58693	1,58672	1,58667	1,58688	0,001	-0,0001
63,096	1,59605	1,59534	1,59528	1,59520	1,59519	1,59488	1,59532	0,002	-0,0002
79,433	1,58896	1,58874	1,58865	1,58874	1,58845	1,58850	1,58867	0,001	-0,0001
100,00	1,59605	1,59579	1,59533	1,59608	1,59529	1,59521	1,59563	0,002	-0,0001
125,89	1,58983	1,58954	1,58956	1,58955	1,58932	1,58926	1,58951	0,001	-0,0001
158,49	1,59551	1,59502	1,59501	1,59486	1,59466	1,59463	1,59495	0,002	-0,0002
199,53	1,59032	1,59000	1,59005	1,58996	1,58976	1,58974	1,58997	0,001	-0,0001
251,19	1,59128	1,59127	1,59142	1,59151	1,59146	1,59143	1,59139	0,001	0,0000
316,23	1,58841	1,58806	1,58811	1,58805	1,58785	1,58778	1,58804	0,001	-0,0001
398,11	1,59160	1,59147	1,59159	1,59170	1,59156	1,59163	1,59159	0,000	0,0000
501,19	1,58874	1,58831	1,58841	1,58829	1,58805	1,58801	1,58830	0,001	-0,0001
630,96	1,59207	1,59199	1,59213	1,59210	1,59204	1,59200	1,59206	0,000	0,0000
794,33	1,58907	1,58886	1,58887	1,58872	1,58855	1,58853	1,58877	0,001	-0,0001
1000,0	1,59251	1,59234	1,59251	1,59247	1,59231	1,59238	1,59242	0,000	0,0000
1258,9	1,58930	1,58909	1,58908	1,58896	1,58875	1,58875	1,58899	0,001	-0,0001
1584,9	1,59333	1,59325	1,59337	1,59342	1,59325	1,59329	1,59332	0,000	0,0000
1995,3	1,59013	1,58997	1,58996	1,58987	1,58963	1,58961	1,58986	0,001	-0,0001
2511,9	1,59285	1,59285	1,59299	1,59297	1,59285	1,59288	1,59290	0,000	0,0000
3162,3	1,59181	1,59163	1,59158	1,59155	1,59123	1,59127	1,59151	0,001	-0,0001
3981,1	1,59547	1,59566	1,59573	1,59567	1,59543	1,59558	1,59559	0,001	0,0000
5011,9	1,59548	1,59537	1,59544	1,59524	1,59493	1,59498	1,59524	0,001	-0,0001
6309,6	1,60098	1,60093	1,60103	1,60105	1,60067	1,60084	1,60092	0,001	0,0000
7943,3	1,60218	1,60184	1,60200	1,60174	1,60137	1,60135	1,60175	0,002	-0,0002
10000,0	1,61146	1,61112	1,61153	1,61109	1,61089	1,61051	1,61110	0,002	-0,0002
12589	1,61936	1,61837	1,61857	1,61857	1,61747	1,61751	1,61831	0,004	-0,0003
15849	0,93876	0,93674	0,93714	0,93518	0,93571	0,93553	0,93651	0,012	-0,0006
19953	1,08687	1,08950	1,08817	1,08886	1,08754	1,08761	1,08809	0,008	0,0000
25119	1,20268	1,20098	1,20154	1,20104	1,20032	1,19961	1,20103	0,008	-0,0005

4.2.1.4 Оцінення непевності визначання електричного передавального імпедансу пари мікрофонів під час калібрування

Електричний передавальний імпеданс пари мікрофонів під час калібрування визначають за формулою (2.39). Стандартну непевність визначання електричного передавального імпедансу розраховують як:

$$u_{Ze} = \sqrt{u_{noise}^2 + u_{lin}^2 + u_{Cref}^2 + u_f^2} \quad (4.6)$$

де: u_{Cref} - стандартна непевність, яка виникає внаслідок непевності визначання значення еталонного конденсатора;

u_f - стандартна непевність, яка виникає внаслідок непевності встановлення частоти.

Значення еталонного конденсатора було виміряно за допомогою вимірювача R, L, C типу E7-12 із стандартною непевністю 11 пФ. Стандартна непевність встановлення частоти на еталонній установці не перевищує 0.05 %. Внески вхідних величин та результати розрахунку стандартної непевності визначання електричного передавального імпедансу мікрофонів різного типу під час калібрування представлено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Внески вхідних величин та результати розрахунку стандартної непевності визначання електричного передавального імпедансу пари мікрофонів

Непевність у дБ

Частота, Гц	Мікрофони типу LS1					Мікрофони типу LS2				
	u_{noise}	u_{lin}	u_{cref}	u_f	u_{Ze}	u_{noise}	u_{lin}	u_{cref}	u_f	u_{Ze}
1,9953	0,039	0,012	0,0062	0,005	0,0416	0,039	0,012	0,0062	0,005	0,0416
2,5119	0,034	0,012	0,0062	0,005	0,0369	0,034	0,012	0,0062	0,005	0,0369
3,1623	0,007	0,012	0,0062	0,005	0,0160	0,007	0,012	0,0062	0,005	0,0160
3,9811	0,014	0,012	0,0062	0,005	0,0201	0,014	0,012	0,0062	0,005	0,0201
5,0119	0,016	0,004	0,0062	0,005	0,0183	0,016	0,012	0,0062	0,005	0,0215
6,3096	0,006	0,005	0,0062	0,003	0,0104	0,006	0,012	0,0062	0,003	0,0151
7,9433	0,01	0,004	0,0062	0,003	0,0128	0,01	0,012	0,0062	0,003	0,0171
10,000	0,009	0,002	0,0062	0,003	0,0115	0,009	0,012	0,0062	0,003	0,0165
12,589	0,012	0,002	0,0062	0,002	0,0138	0,012	0,012	0,0062	0,002	0,0182
15,849	0,008	0,002	0,0062	0,002	0,0105	0,008	0,012	0,0062	0,002	0,0158
19,953	0,009	0,002	0,0062	0,002	0,0113	0,009	0,002	0,0062	0,002	0,0113
25,119	0,01	0,002	0,0062	0,002	0,0121	0,01	0,002	0,0062	0,002	0,0121
31,623	0,011	0,002	0,0062	0,002	0,0129	0,011	0,002	0,0062	0,002	0,0129
39,811	0,006	0,002	0,0062	0,002	0,0091	0,006	0,002	0,0062	0,002	0,0091
50,119	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077
63,096	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083
79,433	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104
100,00	0,009	0,002	0,0062	0,001	0,0112	0,009	0,002	0,0062	0,001	0,0112
125,89	0,007	0,002	0,0062	0,001	0,0096	0,007	0,002	0,0062	0,001	0,0096
158,49	0,006	0,002	0,0062	0,001	0,0089	0,006	0,002	0,0062	0,001	0,0089
199,53	0,01	0,002	0,0062	0,001	0,0120	0,01	0,002	0,0062	0,001	0,0120
251,19	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104
316,23	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104
398,11	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083
501,19	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077
630,96	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083
794,33	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077
1000,0	0,003	0,002	0,0062	0,001	0,0072	0,003	0,002	0,0062	0,001	0,0072
1258,9	0,003	0,002	0,0062	0,001	0,0072	0,003	0,002	0,0062	0,001	0,0072
1584,9	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077
1995,3	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083
2511,9	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077
3162,3	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083
3981,1	0,007	0,002	0,0062	0,001	0,0096	0,007	0,002	0,0062	0,001	0,0096
5011,9	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077	0,004	0,002	0,0062	0,001	0,0077
6309,6	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083	0,005	0,002	0,0062	0,001	0,0083
7943,3	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104	0,008	0,002	0,0062	0,001	0,0104
10000,0	0,007	0,002	0,0062	0,001	0,0096	0,007	0,002	0,0062	0,001	0,0096
12589	-	-	-	-	-	0,009	0,002	0,0062	0,001	0,0111
15849	-	-	-	-	-	0,011	0,002	0,0062	0,001	0,0128
19953	-	-	-	-	-	0,002	0,003	0,0062	0,001	0,0072
25119	-	-	-	-	-	0,017	0,004	0,0062	0,001	0,0185

4.2.2 Оцінення впливу непевності визначання параметрів довкілля

Параметри довкілля під час калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ визначають за допомогою приладу типу СОПОС-1М, який має два давачі температури, що дозволяє одночасно контролювати температуру мікрофонів та температуру в КМО. Прилад СОПОС-1М має наступні технічні характеристики:

- діапазон вимірювання атмосферного тиску: 90 кПа – 105 кПа із точністю ± 0.1 кПа;
- діапазон вимірювання температури: 0°C – 50°C із точністю $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$;
- діапазон вимірювання відносної вологості повітря: 5% – 95% із точністю $\pm 5\%$.

Складову непевності калібрування мікрофонів, яка виникає внаслідок непевності визначання параметрів довкілля, розраховують за формулою:

$$u_{ambient} = \sqrt{u_p^2 + u_{tKMO}^2 + u_{RH}^2 + u_{\delta p}^2 + u_{pmf}^2 + u_{\delta t}^2 + u_{tmf}^2 + 2r_p u_p u_{pmf} + 2r_t u_{tKMO} u_{tmf}} \quad (4.7)$$

де: u_p - стандартна непевність калібрування, яка виникає внаслідок непевності визначання атмосферного тиску;

u_{tKMO} - стандартна непевність калібрування, яка виникає внаслідок непевності визначання температури повітря в КМО;

u_{RH} - стандартна непевність калібрування, яка виникає внаслідок непевності визначання відносної вологості повітря;

$u_{\delta p}$ - стандартна непевність калібрування, яка виникає внаслідок непевності визначання поліноміальних функцій коефіцієнтів тиску;

u_{pmf} - стандартна непевність калібрування, яка виникає внаслідок непевності визначання впливу атмосферного тиску на властивості мікрофонів;

$u_{\delta t}$ - стандартна непевність калібрування, яка виникає внаслідок непевності визначання поліноміальних функцій коефіцієнтів температури;

u_{tmf} - стандартна непевність калібрування, яка виникає внаслідок непевності визначання впливу температури повітря на властивості мікрофонів;

r_p , r_t - коефіцієнти кореляції між u_p і u_{pmf} , та між u_{tKMO} і u_{tmf} , відповідно. Очевидно, що ці коефіцієнти рівні 1.

Самі значення було оцінено у розділах 2.3.1 та 2.3.2. Результати обчислення непевності калібрування мікрофонів, яка виникає внаслідок непевності визначання параметрів довкілля, подано в таблиці 4.9 (для мікрофонів типу LS1) та в таблиці 4.10 (для мікрофонів типу LS2).

Таблиця 4.9 – Внески вхідних величин та результати розрахунку непевності калібрування мікрофонів, яка виникає внаслідок непевності визначання параметрів довкілля, для мікрофонів типу LS1

Непевності у дБ

Частота, Гц	u_p	u_{tKMO}	u_{RH}	$u_{\delta p}$	u_{pmf}	$u_{\delta t}$	u_{tmf}	$u_{ambient}$
1,9953	0,0025	0,0002	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
2,5119	0,0025	0,0002	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
3,1623	0,0025	0,0002	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
3,9811	0,0025	0,0002	0,0003	0,0024	0,0015	0,0013	0,002	0,005
5,0119	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
6,3096	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
7,9433	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
10,000	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
12,589	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
15,849	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
19,953	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
25,119	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
31,623	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
39,811	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
50,119	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
63,096	0,0025	0,0001	0,0003	0,0024	0,0015	0,0012	0,002	0,005
79,433	0,0025	0,0001	0,0003	0,0025	0,0015	0,0012	0,002	0,005
100,00	0,0025	0,0001	0,0003	0,0025	0,0015	0,0012	0,002	0,005
125,89	0,0025	0,0001	0,0003	0,0025	0,0015	0,0012	0,002	0,005
158,49	0,0025	0,0001	0,0003	0,0025	0,0015	0,0012	0,002	0,005
199,53	0,0025	0,0001	0,0003	0,0025	0,0015	0,0013	0,002	0,005
251,19	0,0025	0,0001	0,0003	0,0025	0,0015	0,0013	0,002	0,005
316,23	0,0025	0,0001	0,0003	0,0025	0,0015	0,0013	0,002	0,005
398,11	0,0025	0,0001	0,0003	0,0026	0,0015	0,0013	0,002	0,005
501,19	0,0025	0,0001	0,0003	0,0026	0,0015	0,0013	0,002	0,005
630,96	0,0025	0,0001	0,0003	0,0026	0,0015	0,0013	0,002	0,005
794,33	0,0025	0,0001	0,0003	0,0027	0,0015	0,0014	0,002	0,006
1000,0	0,0025	0,0001	0,0003	0,0028	0,0015	0,0014	0,003	0,006
1258,9	0,0025	0,0002	0,0004	0,0029	0,0014	0,0015	0,003	0,006
1584,9	0,0025	0,0002	0,0004	0,003	0,0014	0,0016	0,003	0,006
1995,3	0,0025	0,0002	0,0004	0,0032	0,0013	0,0017	0,004	0,007
2511,9	0,0025	0,0003	0,0004	0,0035	0,0012	0,0018	0,005	0,007
3162,3	0,0025	0,0005	0,0005	0,0039	0,001	0,0021	0,006	0,009
3981,1	0,0026	0,0007	0,0006	0,0047	0,0006	0,0025	0,009	0,011
5011,9	0,0026	0,0011	0,0007	0,0061	0,0002	0,0032	0,013	0,016
6309,6	0,0027	0,0017	0,001	0,0094	0,0001	0,00510	0,016	0,021
7943,3	0,0027	0,0027	0,0014	0,0197	0,0004	0,0107	0,014	0,028
10000,0	0,0026	0,0046	0,0021	0,0626	0,0025	0,0335	0,000	0,071

Таблиця 4.10 – Внески вхідних величин та результати розрахунку непевності калібрування мікрофонів, яка виникає внаслідок непевності визначання параметрів довкілля, для мікрофонів типу LS2

Непевності у дБ

Частота, Гц	u_p	u_{tKMO}	u_{RH}	$u_{\delta p}$	u_{pmf}	$u_{\delta t}$	u_{tmf}	$u_{ambient}$
1,9953	0,0027	0,0003	0,0001	0,0021	0,0006	0,0017	0,0003	0,004
2,5119	0,0027	0,0003	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0003	0,004
3,1623	0,0027	0,0003	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0003	0,004
3,9811	0,0027	0,0002	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0002	0,004
5,0119	0,0027	0,0002	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0002	0,004
6,3096	0,0026	0,0002	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0002	0,004
7,9433	0,0026	0,0002	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0002	0,004
10,000	0,0026	0,0002	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0002	0,004
12,589	0,0026	0,0001	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
15,849	0,0026	0,0001	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
19,953	0,0026	0,0001	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
25,119	0,0026	0,0001	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
31,623	0,0026	0,0001	0,0002	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
39,811	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
50,119	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
63,096	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
79,433	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
100,00	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
125,89	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
158,49	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
199,53	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
251,19	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
316,23	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
398,11	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
501,19	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
630,96	0,0026	0,0001	0,0003	0,0021	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
794,33	0,0026	0,0001	0,0003	0,0022	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
1000,0	0,0026	0,0001	0,0003	0,0022	0,0006	0,0016	0,0001	0,004
1258,9	0,0026	0,0001	0,0003	0,0022	0,0006	0,0017	0,0001	0,004
1584,9	0,0026	0,0001	0,0003	0,0022	0,0006	0,0017	0,0001	0,004
1995,3	0,0026	0,0001	0,0003	0,0023	0,0006	0,0017	0,0001	0,004
2511,9	0,0026	0,0001	0,0003	0,0024	0,0005	0,0018	0,0001	0,004
3162,3	0,0026	0,0002	0,0003	0,0024	0,0005	0,0018	0,0002	0,004
3981,1	0,0026	0,0002	0,0003	0,0025	0,0004	0,0019	0,0002	0,004
5011,9	0,0026	0,0003	0,0003	0,0027	0,0003	0,002	0,0003	0,004
6309,6	0,0026	0,0004	0,0004	0,0029	0,0002	0,0022	0,0004	0,005
7943,3	0,0026	0,0007	0,0004	0,0033	0,0001	0,0024	0,0007	0,005
10000,0	0,0026	0,001	0,0006	0,0038	0,0005	0,0028	0,001	0,006
12589	0,0027	0,0017	0,0008	0,0049	0,0007	0,0036	0,0017	0,008
15849	0,0027	0,0028	0,0011	0,0072	0,0001	0,0053	0,0028	0,011
19953	0,0027	0,005	0,0018	0,014	0,0021	0,0103	0,005	0,021
25119	0,0025	0,011	0,0037	0,0406	0,0047	0,0299	0,011	0,056

4.2.3 Оцінення впливу непевності визначення параметрів мікрофонів

Непевність визначання параметрів мікрофонів (фронтального та еквівалентного об'єму та резонансної частоти), має суттєвий вплив на непевність калібрування мікрофонів.

4.2.3.1 Оцінення впливу непевності визначання фронтального та еквівалентного об'ємів мікрофонів

Вимірювання об'ємів мікрофонів проводять за допомогою одного із методів, які подано у [30]. Суть методу полягає в тому, що оскільки чутливість мікрофона не залежить від розмірів КМО, яка акустично зв'язує мікрофони, то при використанні кількох КМО, значення фронтального та еквівалентного об'ємів мікрофона змінюють до тих пір, доки не отримають найбільш близькі між собою значення чутливості мікрофону для вимірювань на всіх КМО.

Але, слід відзначити, що методи, які представлено в [30], дають змогу визначити тільки сумарний об'єм мікрофона, тобто суму фронтального та еквівалентного об'ємів, і не вказують методу його розділення на складові частини.

На частотах нижче частоти резонансу мікрофона обидва об'єми поведуть себе однаково. На рисунку 4.7 представлено частотні залежності зміни рівня чутливості мікрофона типу LS1 при зміні фронтального та еквівалентного об'ємів на один кубічний міліметр для різних типів КМО.

Зазвичай, при визначенні індивідуальних об'ємів мікрофонів вимірювання проводять з використанням від двох до чотирьох КМО. На рисунку 4.8 представлена залежність різниці рівнів чутливості мікрофона типу LS1 між різними КМО при зміні сумарного об'єму мікрофона на деяких частотах.

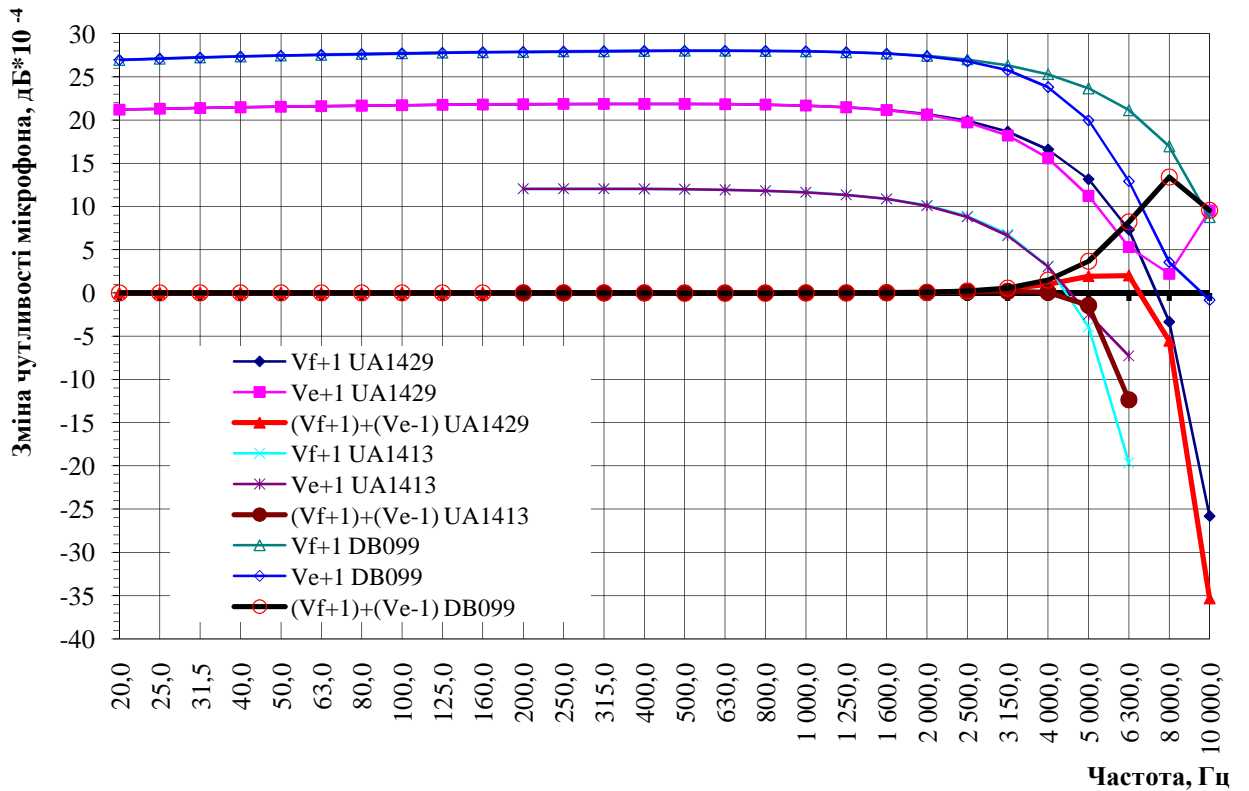


Рисунок 4.7 – Частотні залежності зміни рівня чутливості мікрофона типу LS1 при зміні фронтального та еквівалентного об’ємів на один кубічний міліметр для різних типів КМО.

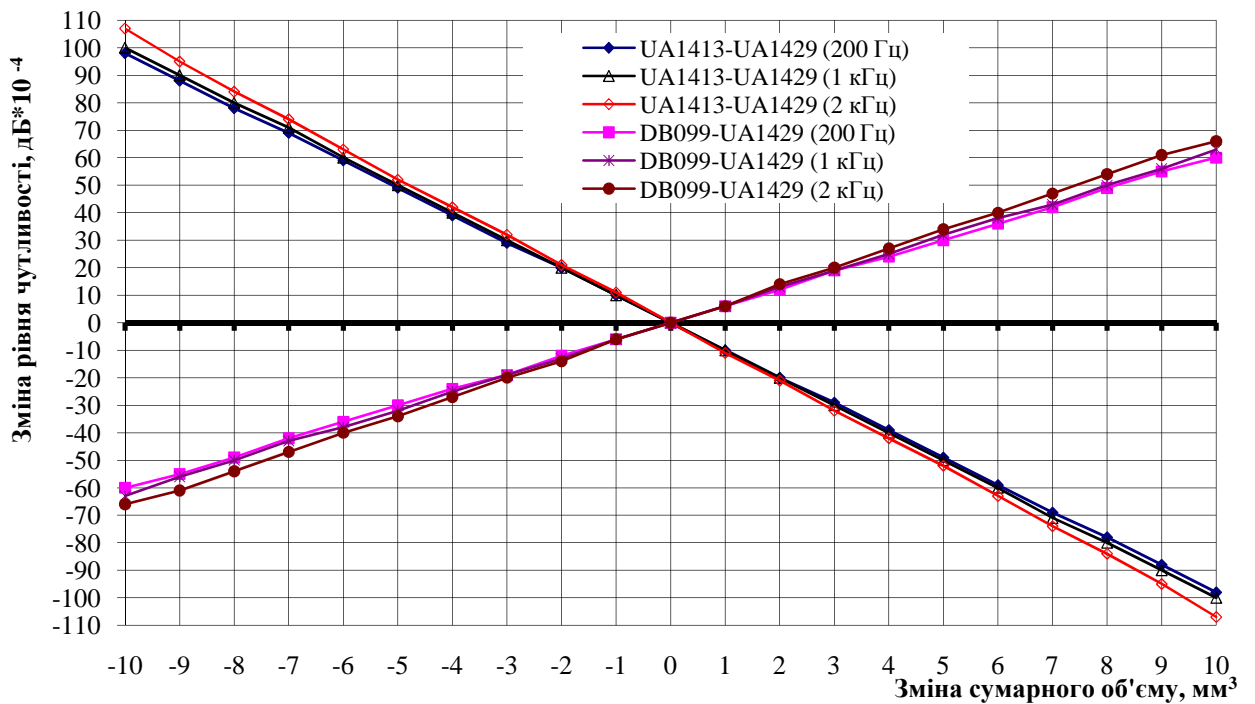


Рисунок 4.8 – Залежність різниці рівнів чутливості мікрофона типу LS1 між різними КМО при зміні сумарного об’єму мікрофона для деяких частот.

Для визначення сумарного об'єму мікрофонів було проведено десять додаткових калібрувань еталонних мікрофонів типу LS1 з використанням КМО типу UA1413 із номінальним об'ємом 5 см³. Таким чином, разом із результатами десятих калібрувань тих самих мікрофонів, які було отримано попередньо за допомогою КМО UA1429 (номінальний об'єм якої становить 3 см³), можна оцінити експериментальну залежність чутливості мікрофонів:

$$M_i = f(\text{coupler}, fr, V_s, N_j) \quad (4.8)$$

Із якої можна визначити функцію зміни чутливості:

$$\Delta M_i(fr, V_s) = \overline{M}(UA_{1413}, fr, V_s) - \overline{M}(UA_{1429}, fr, V_s) \quad (4.9)$$

Вимірювання із КМО типу UA1413 було проведено в діапазоні частот від 20 Гц до 2 кГц. Для кожної частоти F визначено сумарний об'єм мікрофона V_s як такий, при якому значення функції ΔM сягало мінімуму. Таким чином, отримано результати для десяти спостережень V_s , середнє значення яких дало найкращу оцінку V_s , а СКВ – стандартну непевність вимірювання V_s за типом А. На Рисунку 4.9 представлено результати зміни різниці чутливості для різних КМО для мікрофона типу LS1 за номінального та розрахованого значень V_s .

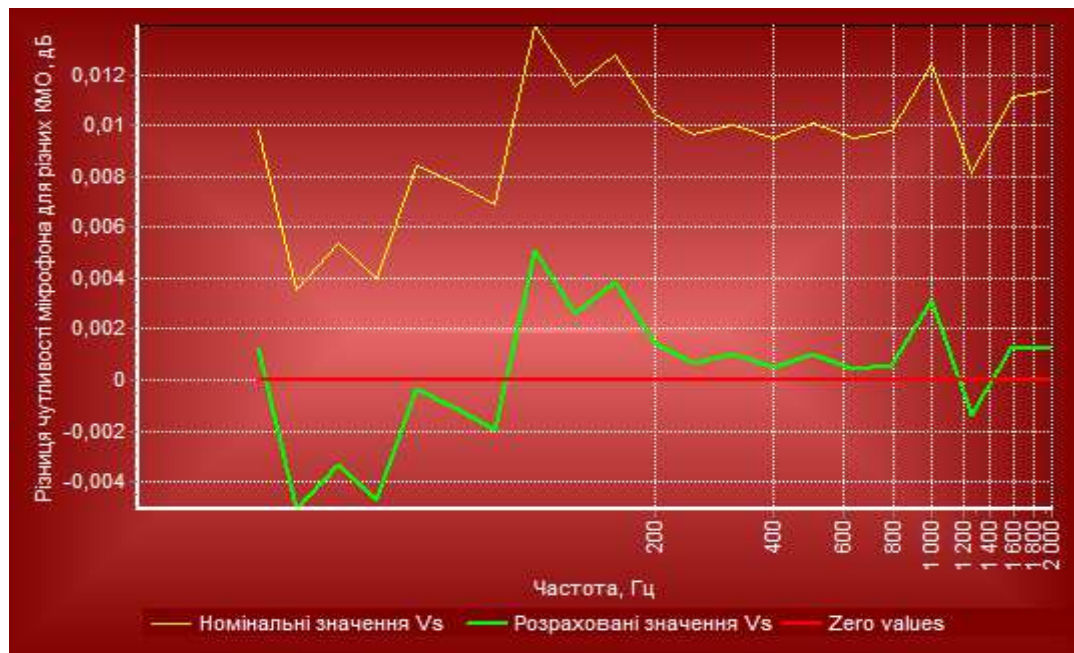


Рисунок 4.9 – Результати зміни різниці чутливості між різними КМО для мікрофона типу LS1 за номінального та розрахованого значень V_s .

Розділення сумарного об'єму на фронтальний та еквівалентний є доволі складною задачею з огляду на те, що фронтальний об'єм, в загальному випадку, складно обчислити за геометрією фронтальної порожнини мікрофона (діаметр порожнини складно визначити стандартними засобами, крім того, існує додатковий об'єм, який пов'язаний із краями діафрагми). Тому фронтальний об'єм визначають через глибину фронтальної порожнини помножену на емпіричний коефіцієнт, k_v (який становить 275 для мікрофонів типу LS1 із стандартною непевністю 1.2 мм³, та 67.7 для мікрофонів типу LS2 із стандартною непевністю 0.4 мм³).

Стандартну непевність визначання фронтального об'єму мікрофонів було розраховано за формулою:

$$u(V_f) = \sqrt{u_{L_f}^2 + u_{K_v}^2} \quad (4.10)$$

де: u_{L_f} - складова стандартної непевності яка виникає внаслідок непевності визначання глибини фронтальної порожнини мікрофона;

u_{K_v} - стандартна непевність емпіричного коефіцієнту розрахунку фронтального об'єму.

Стандартну непевність визначання еквівалентного об'єму мікрофону було розраховано за формулою:

$$u(V_e) = \sqrt{u_{mp1429}^2 + u_{mp1413}^2 + u_{A.V_s}^2 + u_{V_f}^2 + 2r_{mp}u_{mp1429}u_{mp1413}} \quad (4.11)$$

де: u_{mp1429} , u_{mp1413} - стандартна непевність калібрування мікрофонів за використання КМО типу UA1429 та UA1413, відповідно;

$u_{A.V_s}$ - стандартна непевність визначання сумарного об'єму мікрофонів за типом А;

r_{mp} - коефіцієнт кореляції між калібруванням мікрофонів за використання КМО типу UA1429 та UA1413. Очевидно, що у випадку, коли калібрування відбувається за використання того самого обладнання та процедури, цей коефіцієнт дорівнює мінус одиниці.

В таблиці 4.11 приведено результати визначання фронтального та еквівалентного об'ємів об'єму мікрофонів, розрахунку стандартної непевності при вимірюваннях та порівнювання отриманих результатів із паспортними даними, які представив виробник.

Таблиця 4.11 – Результати визначання фронтального та еквівалентного об'ємів мікрофонів, розрахунку стандартної непевності вимірювань та порівнювання отриманих результатів із паспортними даними.

Об'єми та непевності у мм³

Мікрофон	Lf, мм	Vf	u(Vf)	Vf,pas	Vf- Vf,pas	Vs	Ve	u(Ve)	Ve,pas	Ve - Ve,pas
<i>Мікрофони типу LSI</i>										
2973369	1,956	537,9	3,0	539,7	-1,8	674,9	137,0	3,1	137,5	-0,5
2973373	1,963	539,8		540,5	-0,7	672,0	132,2	3,4	134,4	-2,2
2973374	1,956	537,9		537,1	0,8	665,1	127,2	3,8	126,4	0,8
2620594	1,962	539,5		538	1,5	665,4	125,9	3,7	127,2	-1,3
2620596	1,963	539,8		539,8	0,0	672,5	132,7	3,2	132,0	0,7
2620598	1,954	537,3		538,4	-1,1	668,0	130,6	3,2	135,2	-4,6
2620602	1,963	539,8		538,6	1,2	659,3	119,5	3,0	127,4	-7,9
2338720	1,969	541,5		-	-	667,8	126,3	3,6	-	-
1843699	1,955	537,6		-	-	670,8	133,2	3,0	-	-
<i>Мікрофони типу LS2</i>										
2661003	0,49	33,2	0,5	33,2	0,0	42,0	9,9		8,8	1,1
2661004	0,5	33,9		34,0	-0,1	43,2	10,0		9,2	0,8
2661005	0,497	33,7		33,8	-0,1					
2661006	0,496	33,6		33,9	-0,3	43,9	10,9		9,7	1,2
3042183	0,486	32,9		32,7	0,2	40,7	7,8		8,2	-0,4
3042187	0,482	32,7		32,5	0,2	40,5	7,9		8,3	-0,4
3042191	0,503	34,1		33,9	0,2	42,5	8,4		8,2	0,2
1863690	0,496	33,6		-	-					
2412858	0,503	34,1		-	-					

В таблиці 4.12 представлено частотні залежності складових стандартної непевності калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ, що виникають внаслідок розрахованих значень непевності визначання фронтального та еквівалентного об'ємів мікрофонів, які отримано методом числового диференціювання.

Таблиця 4.12 – Частотні залежності складових стандартної непевності калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ, які виникають внаслідок непевності визначання фронтального та еквівалентного об'ємів мікрофонів

Частота, Гц	Мікрофони типу LS1		Мікрофони типу LS2	
	u_{Vf}	u_{Ve}	u_{Vf}	u_{Ve}
1,9953	0,0061	0,0056	0,0028	0,0029
2,5119	0,0062	0,0057	0,0028	0,0029
3,1623	0,0063	0,0058	0,0028	0,003
3,9811	0,0063	0,0058	0,0029	0,0031
5,0119	0,0064	0,0059	0,003	0,0031
6,3096	0,0065	0,0059	0,0031	0,0032
7,9433	0,0065	0,006	0,0031	0,0033
10,000	0,0066	0,006	0,0032	0,0033
12,589	0,0066	0,0061	0,0032	0,0033
15,849	0,0066	0,0061	0,0033	0,0034
19,953	0,0067	0,0061	0,0033	0,0034
25,119	0,0067	0,0061	0,0033	0,0034
31,623	0,0067	0,0062	0,0034	0,0035
39,811	0,0067	0,0062	0,0034	0,0035
50,119	0,0068	0,0062	0,0034	0,0035
63,096	0,0068	0,0062	0,0034	0,0035
79,433	0,0068	0,0062	0,0034	0,0035
100,00	0,0068	0,0062	0,0034	0,0036
125,89	0,0068	0,0063	0,0035	0,0036
158,49	0,0068	0,0063	0,0035	0,0036
199,53	0,0068	0,0063	0,0035	0,0036
251,19	0,0068	0,0063	0,0035	0,0036
316,23	0,0068	0,0063	0,0035	0,0036
398,11	0,0069	0,0063	0,0035	0,0036
501,19	0,0067	0,0063	0,0035	0,0036
630,96	0,0066	0,0063	0,0035	0,0036
794,33	0,0066	0,0062	0,0035	0,0036
1000,0	0,0066	0,0062	0,0035	0,0036
1258,9	0,0065	0,0062	0,0035	0,0036
1584,9	0,0064	0,0061	0,0034	0,0036
1995,3	0,0063	0,006	0,0034	0,0036
2511,9	0,006	0,0057	0,0034	0,0036
3162,3	0,0056	0,0054	0,0033	0,0035
3981,1	0,005	0,0047	0,0032	0,0035
5011,9	0,0039	0,0035	0,0031	0,0033
6309,6	0,0021	0,0018	0,0029	0,0031
7943,3	0,0011	0,0008	0,0026	0,0028
10000,0	0,0077	0,0032	0,0021	0,0022
12589	-	-	0,0011	0,0012
15849	-	-	0,0006	0,0002
19953	-	-	0,0043	0,0002
25119	-	-	0,0148	0,0066

4.2.3.2 Оцінення впливу непевності визначання резонансної частоти мікрофонів

Резонансна частота – це така частота на якій уявна частина акустичного імпедансу мікрофона, Z_a , дорівнює нулю, або фазова характеристика мікрофона становить 90° .

На рисунку 4.10 представлені типові фазові характеристики мікрофонів типу LS1, які отримано під час калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ.

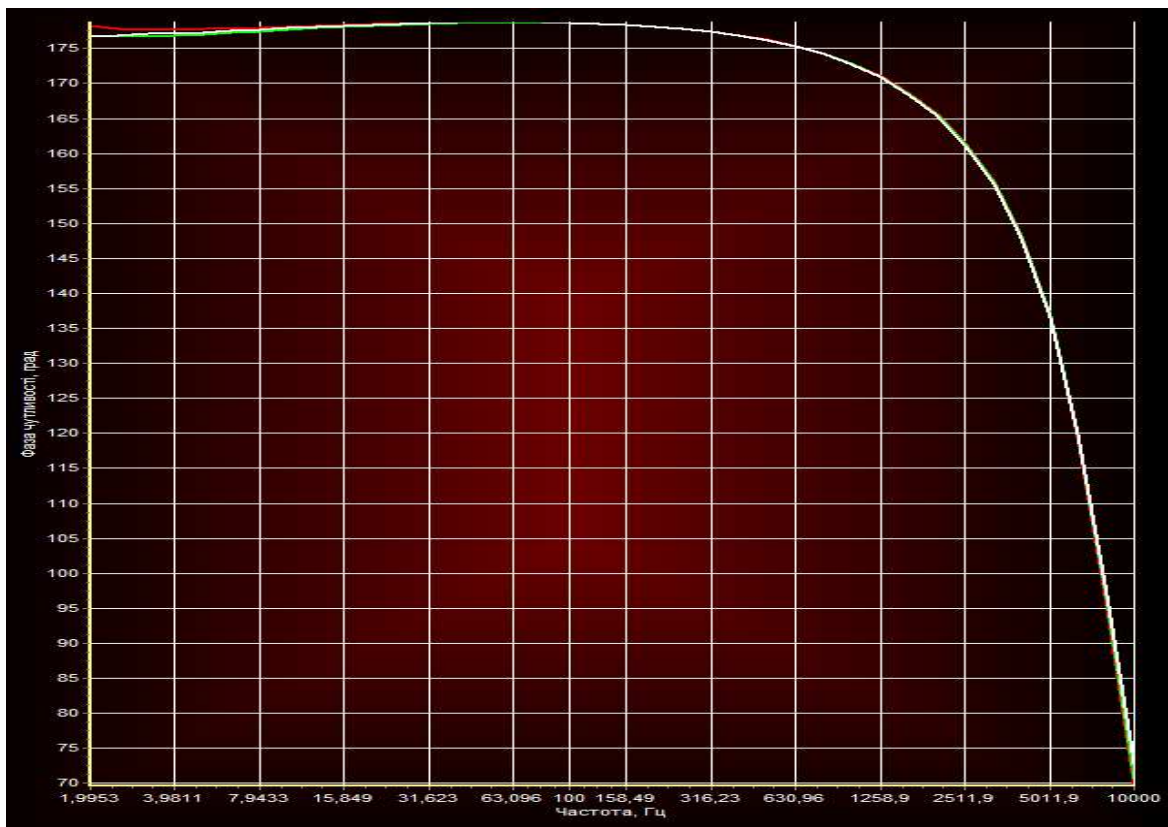


Рисунок 4.10 – Типові фазові характеристики мікрофонів типу LS1, які отримано під час калібрування мікрофонів на еталонній установці УЕ-2ПУ

Резонансну частоту мікрофона розраховують за значеннями фазової характеристики в двох суміжних точках, між якими фазова характеристика перетинає значення 90° . Таким чином, непевність визначання резонансної частоти мікрофонів розраховують за наступною формулою:

$$u(f_0) = \sqrt{u_{ph,90+}^2 + u_{ph,90}^2 + u_{f_0,A}^2 + 2r_{ph}u_{ph,90} u_{ph,90+}} \quad (4.12)$$

де: $u_{ph,90+}$, $u_{ph,90}$ - складова стандартної непевності визначання резонансної частоти мікрофона, яка виникає внаслідок непевності визначання фазової характеристики в точках, де її значення становить більше та менше 90° , відповідно;

$u_{f_0,A}$ - стандартна непевність визначання резонансної частоти мікрофона за типом А;

r_{ph} - коефіцієнт кореляції між непевностями визначання фазової характеристики в точках, де її значення становить більше та менше 90° . Очевидно, що в цьому випадку, цей коефіцієнт дорівнює одиниці.

Результати визначання резонансної частоти та розрахунку непевності за 10 вимірюваннями подано у таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Результати визначання резонансної частоти еталонних мікрофонів, СКВ вимірювань та розрахунку непевності

Результати в Герцах

Мікрофони	f_0	СКВ	$u(f_0)$
Мікрофони типу LS1			
2620594	8374	15	101
2620596	8488	17	101
262098	8556	16	101
2620602	8568	15	101
1843699	8691	14	101
2338720	9128	14	101
Мікрофони типу LS2			
2661003	21754	85	217
2661004	22223	69	212
2661005	21049	85	217
2661006	20861	70	212
1863690	23402	44	205
2412858	21641	38	204

За стандартну непевність визначання резонансної частоти мікрофонів типу LS1 було прийнято значення 200 Гц, а мікрофонів типу LS2 - 250 Гц.

Внески вхідних величин та результати розрахунку стандартної непевності калібрування мікрофонів, які виникають внаслідок непевності визначання параметрів мікрофонів, приведено у таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Внески вхідних величин та результати розрахунку стандартної непевності калібрування мікрофонів, які виникають внаслідок непевності визначання параметрів мікрофонів

Частота, Гц	Мікрофони типу LS1					Мікрофони типу LS2				
	u_{vf}	u_{ve}	u_{f0}	u_D	u_{mf}	u_{vf}	u_{ve}	u_{f0}	u_D	u_{mf}
1,9953	0,0061	0,0056	0,000	0,0000	0,0083	0,0028	0,0029	0,000	0,0000	0,0040
2,5119	0,0062	0,0057	0,000	0,0000	0,0084	0,0028	0,0029	0,000	0,0000	0,0040
3,1623	0,0063	0,0058	0,000	0,0000	0,0086	0,0028	0,003	0,000	0,0000	0,0041
3,9811	0,0063	0,0058	0,000	0,0000	0,0086	0,0029	0,0031	0,000	0,0000	0,0042
5,0119	0,0064	0,0059	0,000	0,0000	0,0087	0,003	0,0031	0,000	0,0000	0,0043
6,3096	0,0065	0,0059	0,000	0,0000	0,0088	0,0031	0,0032	0,000	0,0000	0,0045
7,9433	0,0065	0,006	0,000	0,0000	0,0088	0,0031	0,0033	0,000	0,0000	0,0045
10,000	0,0066	0,006	0,000	0,0000	0,0089	0,0032	0,0033	0,000	0,0000	0,0046
12,589	0,0066	0,0061	0,000	0,0000	0,0090	0,0032	0,0033	0,000	0,0000	0,0046
15,849	0,0066	0,0061	0,000	0,0000	0,0090	0,0033	0,0034	0,000	0,0000	0,0047
19,953	0,0067	0,0061	0,000	0,0000	0,0091	0,0033	0,0034	0,000	0,0000	0,0047
25,119	0,0067	0,0061	0,000	0,0000	0,0091	0,0033	0,0034	0,000	0,0000	0,0047
31,623	0,0067	0,0062	0,000	0,0000	0,0091	0,0034	0,0035	0,000	0,0000	0,0049
39,811	0,0067	0,0062	0,000	0,0000	0,0091	0,0034	0,0035	0,000	0,0000	0,0049
50,119	0,0068	0,0062	0,000	0,0000	0,0092	0,0034	0,0035	0,000	0,0000	0,0049
63,096	0,0068	0,0062	0,000	0,0000	0,0092	0,0034	0,0035	0,000	0,0000	0,0049
79,433	0,0068	0,0062	0,000	0,0000	0,0092	0,0034	0,0035	0,000	0,0000	0,0049
100,00	0,0068	0,0062	0,000	0,0000	0,0092	0,0034	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
125,89	0,0068	0,0063	0,000	0,0000	0,0093	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
158,49	0,0068	0,0063	0,000	0,0000	0,0093	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
199,53	0,0068	0,0063	0,000	0,0000	0,0093	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
251,19	0,0068	0,0063	0,000	0,0000	0,0093	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
316,23	0,0068	0,0063	0,000	0,0000	0,0093	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
398,11	0,0069	0,0063	0,000	0,0001	0,0093	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
501,19	0,0067	0,0063	0,000	0,0001	0,0092	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
630,96	0,0066	0,0063	0,000	0,0002	0,0091	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
794,33	0,0066	0,0062	0,000	0,0003	0,0091	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
1000,0	0,0066	0,0062	0,000	0,0004	0,0091	0,0035	0,0036	0,000	0,0000	0,0050
1258,9	0,0065	0,0062	0,000	0,0007	0,0090	0,0035	0,0036	0,000	0,0001	0,0050
1584,9	0,0064	0,0061	0,000	0,0011	0,0089	0,0034	0,0036	0,000	0,0001	0,0050
1995,3	0,0063	0,006	0,000	0,0017	0,0089	0,0034	0,0036	0,000	0,0001	0,0050
2511,9	0,006	0,0057	0,001	0,0027	0,0088	0,0034	0,0036	0,000	0,0002	0,0050
3162,3	0,0056	0,0054	0,001	0,0041	0,0089	0,0033	0,0035	0,000	0,0003	0,0048
3981,1	0,005	0,0047	0,001	0,0062	0,0093	0,0032	0,0035	0,000	0,0005	0,0048
5011,9	0,0039	0,0035	0,000	0,0079	0,0095	0,0031	0,0033	0,000	0,0009	0,0046
6309,6	0,0021	0,0018	0,003	0,0061	0,0073	0,0029	0,0031	0,000	0,0013	0,0044
7943,3	0,0011	0,0008	0,003	0,0021	0,0039	0,0026	0,0028	0,000	0,0019	0,0043
10000,0	0,0077	0,0032	0,005	0,0132	0,0164	0,0021	0,0022	0,000	0,0026	0,0040
12589	-	-	-	-	-	0,0011	0,0012	0,001	0,0023	0,0030
15849	-	-	-	-	-	0,0006	0,0002	0,001	0,0015	0,0019
19953	-	-	-	-	-	0,0043	0,0002	0,003	0,0036	0,0064
25119	-	-	-	-	-	0,0148	0,0066	0,007	0,0274	0,0326

Непевності у дБ

4.2.4 Оцінення впливу непевності визначання геометричних розмірів мікрофонів та КМО

Для покращення точності визначання геометричних розмірів КМО та мікрофонів було:

- введено до складу еталону високоточні акустичні КМО типу UA1413 та UA1429 виробництва фірми Bruel&Kjaer із сапфіровими кільцями, стандартна непевність встановлення довжини та діаметру яких становить ± 0.006 мм;
- виготовлено змінні камери типу ДЕТУ 10.2М для калібрування півдюймових еталонних мікрофонів, стандартна непевність встановлення довжини та діаметру яких становить ± 0.006 мм;
- було розроблено та впроваджено методику вимірювання глибини фронтальної порожнини еталонних мікрофонів безконтактним оптичним методом за допомогою мікроскопу типу BIOLAM та набору кінцевих мір №1 другого класу, як це представлено на рисунку 4.11. За оцінкою, стандартна непевність визначання глибини фронтальної порожнини мікрофона за таким методом становить 0.01 мм.

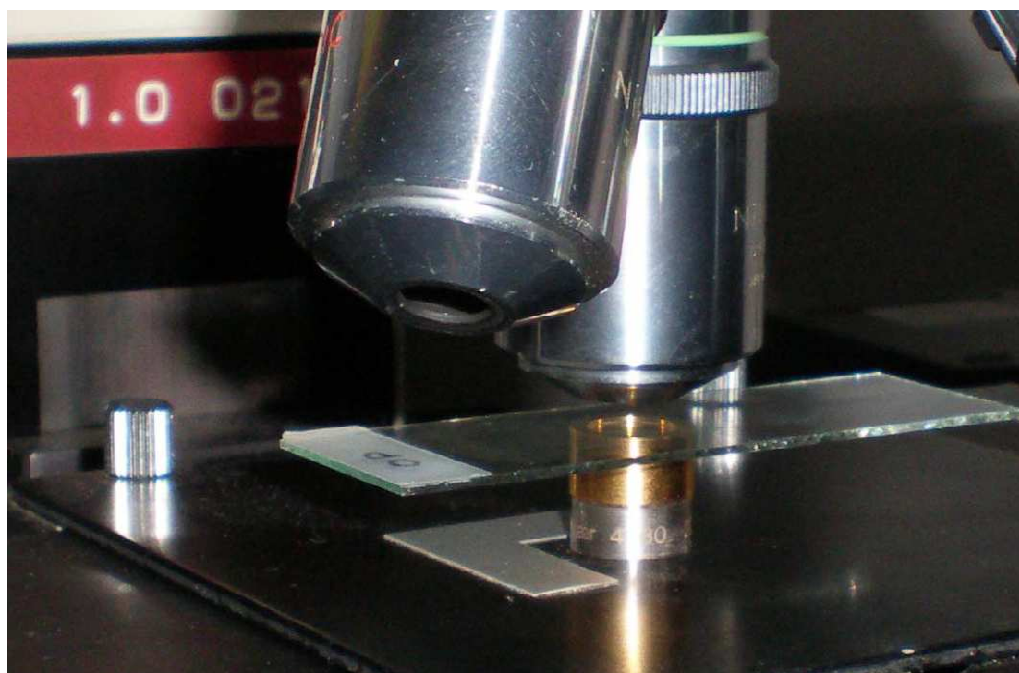


Рисунок 4.11 – Процес визначання глибини фронтальної порожнини мікрофона

Оцінка впливу зазначених непевностей визначання геометричних розмірів КМО та мікрофонів на стандартну непевність калібрування приведена у таблиці 4.15.

Таблиця 4.15 – Частотні залежності внесків непевностей визначання геометричних розмірів КМО та мікрофонів у стандартну непевність калібрування

Непевності у дБ

Частота, Гц	Мікрофони типу LS1				Мікрофони типу LS2			
	u_{Dc}	u_{Lc}	u_{Lr}	u_{geom}	u_{Dc}	u_{Lc}	u_{Lr}	u_{geom}
1,9953	0,002	0,003	0,0005	0,0036	0,005	0,006	0,0017	0,0080
2,5119	0,002	0,003	0,0004	0,0036	0,005	0,006	0,0015	0,0080
3,1623	0,002	0,003	0,0004	0,0036	0,005	0,006	0,0014	0,0079
3,9811	0,002	0,003	0,0004	0,0036	0,005	0,005	0,0012	0,0072
5,0119	0,002	0,003	0,0003	0,0036	0,005	0,005	0,0011	0,0072
6,3096	0,002	0,003	0,0003	0,0036	0,005	0,005	0,0010	0,0071
7,9433	0,002	0,003	0,0003	0,0036	0,005	0,005	0,0009	0,0071
10,000	0,002	0,003	0,0003	0,0036	0,005	0,005	0,0009	0,0071
12,589	0,002	0,003	0,0003	0,0036	0,005	0,005	0,0008	0,0071
15,849	0,002	0,003	0,0002	0,0036	0,005	0,005	0,0007	0,0071
19,953	0,002	0,003	0,0002	0,0036	0,005	0,005	0,0007	0,0071
25,119	0,002	0,003	0,0002	0,0036	0,005	0,005	0,0006	0,0071
31,623	0,002	0,003	0,0002	0,0036	0,005	0,005	0,0006	0,0071
39,811	0,002	0,003	0,0002	0,0036	0,005	0,005	0,0005	0,0071
50,119	0,002	0,003	0,0002	0,0036	0,005	0,005	0,0005	0,0071
63,096	0,002	0,002	0,0002	0,0028	0,005	0,005	0,0005	0,0071
79,433	0,002	0,002	0,0002	0,0028	0,005	0,005	0,0004	0,0071
100,00	0,002	0,002	0,0002	0,0028	0,005	0,005	0,0004	0,0071
125,89	0,002	0,002	0,0002	0,0028	0,005	0,005	0,0004	0,0071
158,49	0,002	0,002	0,0002	0,0028	0,005	0,005	0,0004	0,0071
199,53	0,002	0,002	0,0002	0,0028	0,005	0,005	0,0004	0,0071
251,19	0,002	0,002	0,0002	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
316,23	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
398,11	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
501,19	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
630,96	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
794,33	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
1000,0	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
1258,9	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
1584,9	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0003	0,0071
1995,3	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0002	0,0071
2511,9	0,002	0,002	0,0001	0,0028	0,005	0,005	0,0002	0,0071
3162,3	0,002	0,002	0,0000	0,0028	0,005	0,005	0,0002	0,0071
3981,1	0,002	0,002	0,0000	0,0028	0,005	0,005	0,0002	0,0071
5011,9	0,003	0,001	0,0001	0,0032	0,005	0,005	0,0002	0,0071
6309,6	0,003	0,001	0,0001	0,0032	0,005	0,004	0,0001	0,0064
7943,3	0,003	0,000	0,0001	0,0030	0,006	0,004	0,0001	0,0072
10000,0	0,004	0,003	0,0001	0,0050	0,006	0,003	0,0000	0,0067
12589	-	-	-	-	0,006	0,002	0,0002	0,0063
15849	-	-	-	-	0,007	0,001	0,0004	0,0071
19953	-	-	-	-	0,008	0,006	0,0004	0,0100
25119	-	-	-	-	0,010	0,021	0,0005	0,0233

4.2.4 Оцінення стандартної непевності калібрування мікрофонів на еталонній установці UE-2ПУ

Вхідні величини, які впливають на непевність вимірювань під час калібрування мікрофонів на еталонній установці UE-2ПУ представлено у вигляді таблиці 4.16. В таблиці наводиться перелік джерел непевності, їх позначки, одиниці вимірювань, характеристики точності – стандартна непевність, а також тип функції розподілу густини ймовірності.

До групи вхідних величин, які не було детально розглянуто у цьому розділі, відносяться:

- радіально-хвильовий рух, вплив якого (u_{rwm}) було розглянуто у розділі 2.1;
- напруга поляризації. Оскільки вважають, що чутливість мікрофона прямо пропорційно залежить від рівня напруги поляризації, який визначають під час щорічного калібрування еталонної установки і який знаходиться в межах $200 \text{ В} \pm 0.05$, то вплив цієї складової (u_{pol}) у стандартну непевність вимірювань становить приблизно 0.002 дБ;
- схема захисного заземлення передавача та приймача впливає на їх рівні сигналів. Міжнародний стандарт [30] приводить опорну схему за якої необхідно проводити вимірювання чутливості мікрофонів. Оскільки в еталонній установці UE-2ПУ застосовано власне таку схему включення мікрофонів, то вплив цієї складової можна вважати нехтовно малим;
- акустичні параметри повітря (швидкість звуку в повітрі, відношення питомих теплоємностей, густини та в'язкості повітря) розраховують відповідно до [30], де приведено також стандартні непевності цих величин. Вплив непевностей визначання цих параметрів (u_{vs} - швидкості звуку в повітрі, u_{ksi} - відношення питомих теплоємностей, u_{ρ_0} - густини та u_{ν} - в'язкості повітря) на непевність калібрування мікрофонів було розраховано методом числового диференціювання.

Частотні залежності внесків непевностей визначання цієї групи величин у стандартну непевність калібрування мікрофонів представлено у таблиці 4.17.

Таблиця 4.16 – Характеристики точності вхідних величин під час калібрування мікрофонів за тиском методом взаємності

№	Назва та одиниці вимірювання	Позначка	Стандартна непевність		Закон розподілу
			LS1	LS2	
1	Електричний передавальний імпеданс				
	Перехресні завади та власний шум (дБ)	CNR	var		Нормальний
	Нелінійність каналів				
	Часова нестабільність				
	Еталонний конденсатор (Ф)	Cs	0.015		Нормальний
	Частота				
2	Параметри довкілля				
	Статичний тиск (Па)	Ps	53,3288		Рівномірний
	Температура (гр.С)	Tc	0.5		Рівномірний
	Відносна вологість (%)	RH	3,5		Рівномірний
	Коефіцієнт статичного тиску (дБ/кПа)	δ_p	0,0014		Рівномірний
	Коефіцієнт температури (дБ/гр.С)	δ_t	0,0016		Рівномірний
3	Параметри мікрофона				
	Фронтальний об'єм мікрофона (м ³)	V _F		0,5	Нормальний
	Еквівалентний об'єм мікрофона (м ³)	V _e		3	Нормальний
	Коефіцієнт втрат	D	0,105		Рівномірний
	Резонансна частота (Гц)	F ₀	520		Нормальний
4	Геометричні розміри КМО та мікрофона				
	Глибина порожнини мікрофона (м)	l _F	0,00001		Нормальний
	Довжина КМО (м)	l _C	1,20E-05		Рівномірний
	Діаметр КМО (м)	d _C	1,20E-05		Рівномірний
	Інші величини				
5	Радіально хвильовий рух (дБ)	-		0,2	Рівномірний
6	Напруга поляризації (В)	-	0,05		Рівномірний
7	Захисне заземлення передавача	-	0,0022		Рівномірний
8	Захисне заземлення приймача	-	0,0022		Рівномірний
9	Швидкість звуку (м/с)	v _s		0,0003	Рівномірний
10	Відношення питомих теплємкостей	κ		0,00032	Рівномірний
11	Густина повітря (кг.м-3)	ρ		0,000022	Рівномірний
12	В'язкість повітря (Па.сек)	η		0,01	Рівномірний
13	Похибка заокруглення (дБ)	-	0,0005		Рівномірний
14	СКВ (допустима повторювальність) вимірювань (дБ)	-	var		Нормальний

Таблиця 4.17 – Частотні залежності внесків непевностей визначання деяких параметрів у стандартну непевність калібрування

Частота, Гц	Мікрофони типу LS1							Мікрофони типу LS2						
	u_{rwm}	u_{pol}	u_{vs}	u_{ksi}	u_{ro}	u_{nu}	u_{others}	u_{rwm}	u_{pol}	u_{vs}	u_{ksi}	u_{ro}	u_{nu}	u_{others}
1,9953	0,0000	0,002	0,0024	0,0005	0,0001	0,0000	0,0044	0,0000	0,0020	0,0025	0,0012	0,0001	0,0003	0,0046
2,5119	0,0000	0,002	0,0024	0,0005	0,0001	0,0000	0,0044	0,0000	0,0020	0,0025	0,0011	0,0001	0,0002	0,0045
3,1623	0,0000	0,002	0,0024	0,0004	0,0001	0,0000	0,0044	0,0000	0,0020	0,0025	0,0010	0,0001	0,0001	0,0045
3,9811	0,0000	0,002	0,0024	0,0004	0,0001	0,0000	0,0044	0,0000	0,0020	0,0025	0,0009	0,0001	0,0001	0,0045
5,0119	0,0000	0,002	0,0024	0,0003	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0008	0,0001	0,0001	0,0045
6,3096	0,0000	0,002	0,0024	0,0003	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0007	0,0001	0,0001	0,0044
7,9433	0,0000	0,002	0,0024	0,0002	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0006	0,0001	0,0000	0,0044
10,000	0,0000	0,002	0,0024	0,0002	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0005	0,0001	0,0000	0,0044
12,589	0,0000	0,002	0,0024	0,0002	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0005	0,0001	0,0000	0,0044
15,849	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0004	0,0001	0,0000	0,0044
19,953	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0004	0,0001	0,0000	0,0044
25,119	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0003	0,0001	0,0000	0,0044
31,623	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0003	0,0001	0,0000	0,0044
39,811	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0002	0,0001	0,0000	0,0044
50,119	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0002	0,0001	0,0000	0,0044
63,096	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0002	0,0001	0,0000	0,0044
79,433	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0002	0,0001	0,0000	0,0044
100,00	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0001	0,0001	0,0000	0,0044
125,89	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0001	0,0001	0,0000	0,0044
158,49	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0001	0,0001	0,0000	0,0044
199,53	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0001	0,0001	0,0000	0,0044
251,19	0,0000	0,002	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0001	0,0001	0,0000	0,0044
316,23	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
398,11	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
501,19	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
630,96	0,0000	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0000	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
794,33	0,0001	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0001	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
1000,0	0,0001	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0001	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
1258,9	0,0002	0,002	0,0024	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0002	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
1584,9	0,0003	0,002	0,0023	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0003	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
1995,3	0,0004	0,002	0,0023	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0004	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
2511,9	0,0007	0,002	0,0023	0,0001	0,0001	0,0000	0,0043	0,0007	0,0020	0,0025	0,0000	0,0001	0,0000	0,0044
3162,3	0,0011	0,002	0,0022	0,0001	0,0001	0,0000	0,0044	0,0011	0,0020	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0045
3981,1	0,0017	0,002	0,0021	0,0001	0,0001	0,0000	0,0045	0,0017	0,0020	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0047
5011,9	0,0026	0,002	0,0019	0,0000	0,0001	0,0000	0,0048	0,0026	0,0020	0,0024	0,0000	0,0001	0,0000	0,0051
6309,6	0,0036	0,002	0,0016	0,0000	0,0001	0,0000	0,0053	0,0036	0,0020	0,0023	0,0000	0,0001	0,0000	0,0056
7943,3	0,0044	0,002	0,0011	0,0000	0,0001	0,0000	0,0058	0,0044	0,0020	0,0022	0,0000	0,0001	0,0000	0,0061
10000,0	0,0054	0,002	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0065	0,0054	0,0020	0,0020	0,0000	0,0001	0,0000	0,0068
12589				-	-	-	-	0,0064	0,0020	0,0016	0,0000	0,0001	0,0000	0,0075
15849				-	-	-	-	0,0084	0,0020	0,0010	0,0000	0,0001	0,0000	0,0092
19953				-	-	-	-	0,0114	0,0020	0,0002	0,0000	0,0001	0,0001	0,0120
25119				-	-	-	-	0,0154	0,0020	0,0040	0,0001	0,0001	0,0001	0,0163

Стандартну непевність за типом А, зазвичай, визначають через СКВ результатів вимірювань. Однак, під час проведення міжнародних звірень, за результатами яких в базу даних KCDB VIPM вносять калібрувальні та вимірювальні можливості країни за типом вимірювань (СМС), за стандартну непевність за типом А приймають допустиму повторюваність вимірювань, яка є статистичною характеристикою даного типу вимірювань. На еталонній

установці УЕ-2ПУ за непевність за типом А під час калібрування мікрофонів за тиском приймають подвоєне середнє СКВ результатів вимірювань чутливості.

Бюджети непевностей вимірювань під час калібрування за тиском еталонних мікрофонів на удосконаленому ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі приведено у таблицях 4.18 та 4.19 для мікрофонів типу LS1 та LS2, відповідно. На рисунках 4.12 та 4.13 представлені джерела непевності та розраховані непевності, відповідно. Крім того, на рисунку 4.13 подано, для порівняння, заявлені непевності вимірювань на установці УЕ-2П.

Таблиця 4.18 – Бюджет непевності вимірювань під час калібрування за тиском еталонних мікрофонів типу LS1 на удосконаленому ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі

Непевність у дБ

Частота, Гц	Джерела непевності						Непевність		
	Електричний передавальний імпеданс	Параметри довкілья	Параметри мікрофонів	Геометричні розміри	Інші параметри	Допустима повторюваність	Стандартна	Розширена (k=2)	Заявлена розширена (k=2)
1,9953	0,0416	0,005	0,0083	0,0036	0,0044	0,071	0,0829	0,166	0,18
2,5119	0,0369	0,005	0,0084	0,0036	0,0044	0,053	0,0658	0,132	0,14
3,1623	0,0160	0,005	0,0086	0,0036	0,0044	0,037	0,0421	0,084	0,11
3,9811	0,0201	0,005	0,0086	0,0036	0,0044	0,037	0,0436	0,087	0,09
5,0119	0,0183	0,005	0,0087	0,0036	0,0043	0,027	0,0344	0,069	0,07
6,3096	0,0104	0,005	0,0088	0,0036	0,0043	0,017	0,0229	0,046	0,05
7,9433	0,0128	0,005	0,0088	0,0036	0,0043	0,009	0,0194	0,039	0,04
10,000	0,0115	0,005	0,0089	0,0036	0,0043	0,008	0,0183	0,037	0,04
12,589	0,0138	0,005	0,0090	0,0036	0,0043	0,009	0,0204	0,041	0,04
15,849	0,0105	0,005	0,0090	0,0036	0,0043	0,006	0,0170	0,034	0,04
19,953	0,0113	0,005	0,0091	0,0036	0,0043	0,005	0,0169	0,034	0,04
25,119	0,0121	0,005	0,0091	0,0036	0,0043	0,005	0,0175	0,035	0,03
31,623	0,0129	0,005	0,0091	0,0036	0,0043	0,006	0,0184	0,037	0,03
39,811	0,0091	0,005	0,0091	0,0036	0,0043	0,004	0,0154	0,031	0,03
50,119	0,0077	0,005	0,0092	0,0036	0,0043	0,004	0,0146	0,029	0,03
63,096	0,0083	0,005	0,0092	0,0028	0,0043	0,005	0,0151	0,030	0,03
79,433	0,0104	0,005	0,0092	0,0028	0,0043	0,004	0,0160	0,032	0,03
100,00	0,0112	0,005	0,0092	0,0028	0,0043	0,005	0,0169	0,034	0,03
125,89	0,0096	0,005	0,0093	0,0028	0,0043	0,004	0,0156	0,031	0,03
158,49	0,0089	0,005	0,0093	0,0028	0,0043	0,003	0,0151	0,030	0,03
199,53	0,0120	0,005	0,0093	0,0028	0,0043	0,004	0,0173	0,035	0,03
251,19	0,0104	0,005	0,0093	0,0028	0,0043	0,003	0,0160	0,032	0,03
316,23	0,0104	0,005	0,0093	0,0028	0,0043	0,003	0,0160	0,032	0,03
398,11	0,0083	0,005	0,0093	0,0028	0,0043	0,003	0,0148	0,030	0,03
501,19	0,0077	0,005	0,0092	0,0028	0,0043	0,003	0,0144	0,029	0,03
630,96	0,0083	0,005	0,0091	0,0028	0,0043	0,003	0,0147	0,029	0,03
794,33	0,0077	0,006	0,0091	0,0028	0,0043	0,003	0,0147	0,029	0,03
1000,0	0,0072	0,006	0,0091	0,0028	0,0043	0,003	0,0145	0,029	0,03
1258,9	0,0072	0,006	0,0090	0,0028	0,0043	0,003	0,0144	0,029	0,03
1584,9	0,0077	0,006	0,0089	0,0028	0,0043	0,003	0,0146	0,029	0,03
1995,3	0,0083	0,007	0,0089	0,0028	0,0043	0,004	0,0154	0,031	0,03
2511,9	0,0077	0,007	0,0088	0,0028	0,0043	0,004	0,0152	0,030	0,035
3162,3	0,0083	0,009	0,0089	0,0028	0,0044	0,005	0,0168	0,034	0,04
3981,1	0,0096	0,011	0,0093	0,0028	0,0045	0,007	0,0196	0,039	0,05
5011,9	0,0077	0,016	0,0095	0,0032	0,0048	0,011	0,0234	0,047	0,06
6309,6	0,0083	0,021	0,0073	0,0032	0,0053	0,016	0,0291	0,058	0,08
7943,3	0,0104	0,028	0,0039	0,0030	0,0058	0,015	0,0341	0,068	0,1
10000,0	0,0096	0,071	0,0164	0,0050	0,0065	0,024	0,0777	0,155	0,18

Таблиця 4.19 – Бюджет непевності вимірювань під час калібрування за тиском еталонних мікрофонів типу LS2 на удосконаленому ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі

Непевність у дБ

Частота, Гц	Джерела непевності						Непевність		
	Електричний передавальний імпеданс	Параметри довкілля	Параметри мікрофонів	Геометричні розміри	Інші параметри	Допустима повторюваність	Стандартна	Розширена (k=2)	Заявлена розширена (k=2)
1,9953	0,0416	0,004	0,0040	0,0080	0,0046	0,0655	0,0783	0,157	0,2
2,5119	0,0369	0,004	0,0040	0,0080	0,0045	0,0535	0,0659	0,132	0,16
3,1623	0,0160	0,004	0,0041	0,0079	0,0045	0,0417	0,0460	0,092	0,12
3,9811	0,0201	0,004	0,0042	0,0072	0,0045	0,0391	0,0452	0,090	0,1
5,0119	0,0215	0,004	0,0043	0,0072	0,0045	0,0336	0,0412	0,082	0,09
6,3096	0,0151	0,004	0,0045	0,0071	0,0044	0,0270	0,0326	0,065	0,08
7,9433	0,0171	0,004	0,0045	0,0071	0,0044	0,0221	0,0298	0,060	0,07
10,000	0,0165	0,004	0,0046	0,0071	0,0044	0,0203	0,0281	0,056	0,06
12,589	0,0182	0,004	0,0046	0,0071	0,0044	0,0220	0,0304	0,061	0,06
15,849	0,0158	0,004	0,0047	0,0071	0,0044	0,0152	0,0243	0,049	0,05
19,953	0,0113	0,004	0,0047	0,0071	0,0044	0,0149	0,0214	0,043	0,04
25,119	0,0121	0,004	0,0047	0,0071	0,0044	0,0141	0,0213	0,043	0,04
31,623	0,0129	0,004	0,0049	0,0071	0,0044	0,0118	0,0204	0,041	0,04
39,811	0,0091	0,004	0,0049	0,0071	0,0044	0,0114	0,0179	0,036	0,04
50,119	0,0077	0,004	0,0049	0,0071	0,0044	0,0109	0,0170	0,034	0,04
63,096	0,0083	0,004	0,0049	0,0071	0,0044	0,0101	0,0167	0,033	0,04
79,433	0,0104	0,004	0,0049	0,0071	0,0044	0,0097	0,0176	0,035	0,04
100,00	0,0112	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0101	0,0184	0,037	0,04
125,89	0,0096	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0099	0,0173	0,035	0,04
158,49	0,0089	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0096	0,0168	0,034	0,04
199,53	0,0120	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0106	0,0191	0,038	0,04
251,19	0,0104	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0109	0,0183	0,037	0,04
316,23	0,0104	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0096	0,0176	0,035	0,04
398,11	0,0083	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0095	0,0164	0,033	0,04
501,19	0,0077	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0096	0,0162	0,032	0,04
630,96	0,0083	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0094	0,0164	0,033	0,04
794,33	0,0077	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0091	0,0159	0,032	0,04
1000,0	0,0072	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0090	0,0156	0,031	0,04
1258,9	0,0072	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0090	0,0156	0,031	0,04
1584,9	0,0077	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0103	0,0166	0,033	0,04
1995,3	0,0083	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0101	0,0168	0,034	0,04
2511,9	0,0077	0,004	0,0050	0,0071	0,0044	0,0143	0,0194	0,039	0,04
3162,3	0,0083	0,004	0,0048	0,0071	0,0045	0,0097	0,0165	0,033	0,04
3981,1	0,0096	0,004	0,0048	0,0071	0,0047	0,0097	0,0172	0,034	0,04
5011,9	0,0077	0,004	0,0046	0,0071	0,0051	0,0090	0,0159	0,032	0,04
6309,6	0,0083	0,005	0,0044	0,0064	0,0056	0,0086	0,0161	0,032	0,04
7943,3	0,0104	0,005	0,0043	0,0072	0,0061	0,0089	0,0178	0,036	0,04
10000,0	0,0096	0,006	0,0040	0,0067	0,0068	0,0090	0,0178	0,036	0,05
12589	0,0111	0,008	0,0030	0,0063	0,0075	0,0116	0,0207	0,041	0,07
15849	0,0128	0,011	0,0019	0,0071	0,0092	0,0164	0,0263	0,053	0,1
19953	0,0072	0,021	0,0064	0,0100	0,0120	0,0416	0,0501	0,100	0,17
25119	0,0185	0,056	0,0326	0,0233	0,0163	0,0866	0,1133	0,227	0,25

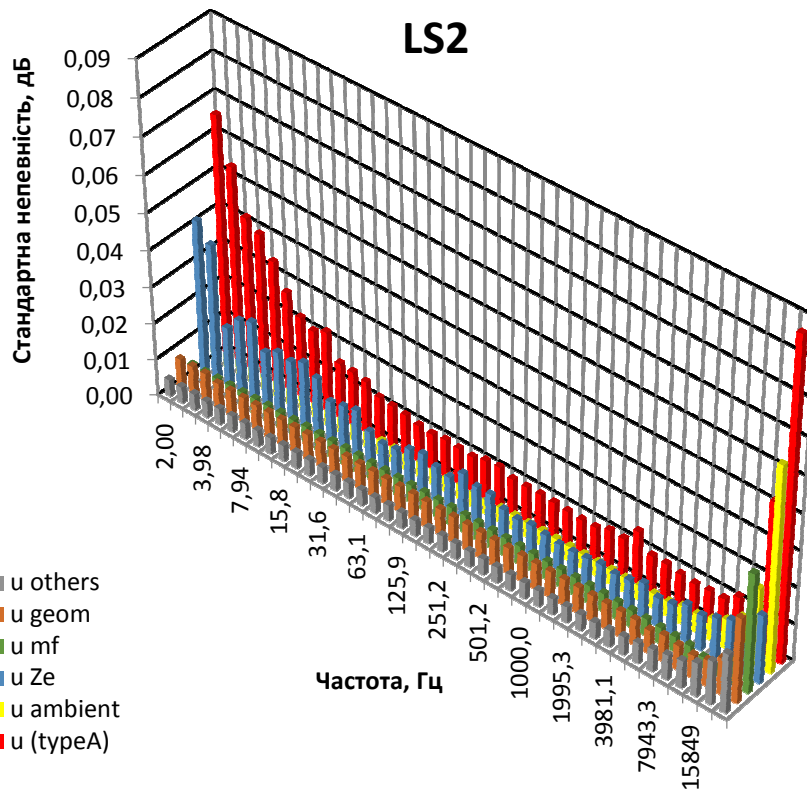
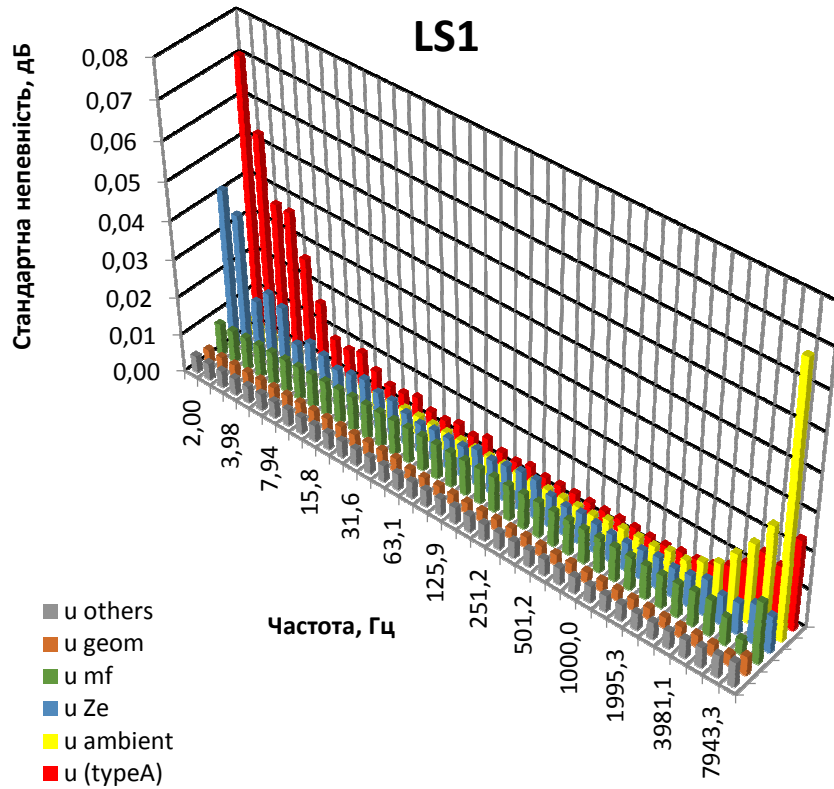


Рисунок 4.12 – Складові стандартної непевності вимірювань під час калібрування за тиском мікрофонів на удосконаленому ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі

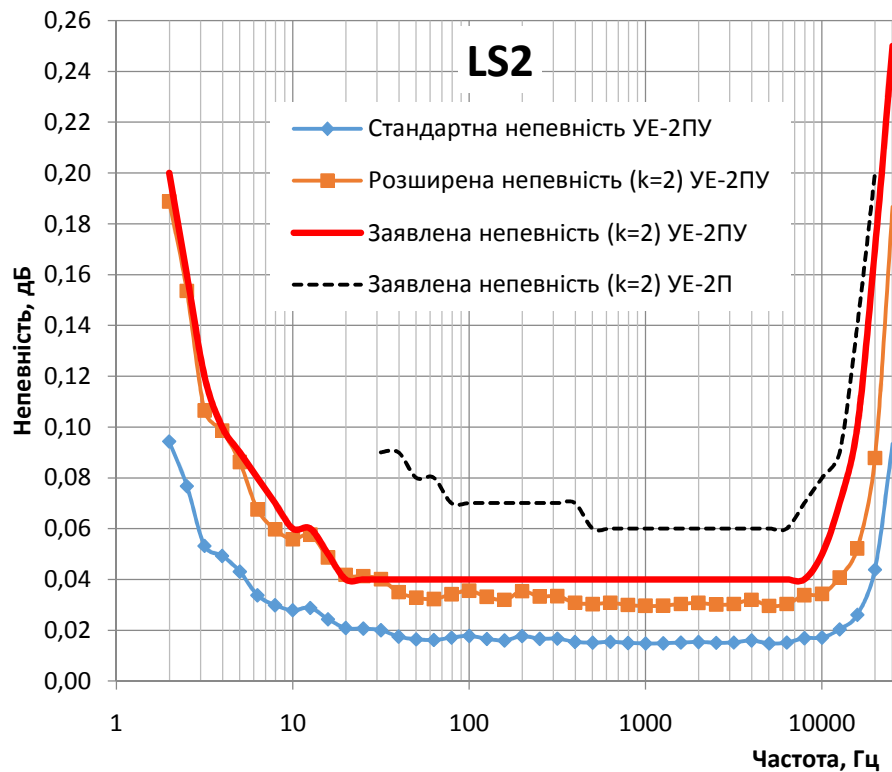
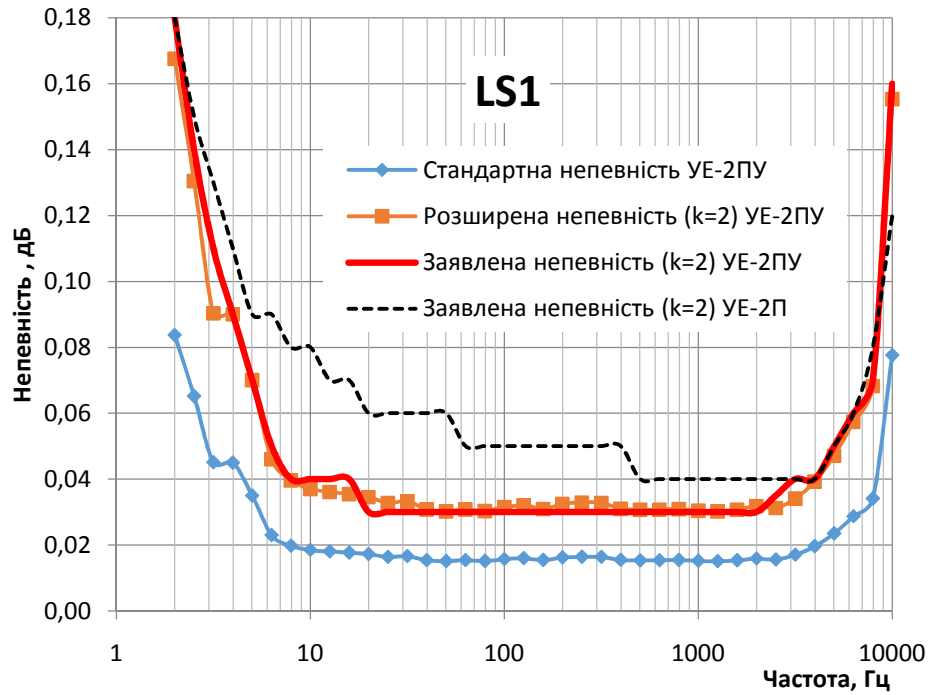


Рисунок 4.13 – Стандартна, розширена (k=2) та заявлені непевності вимірювань під час калібрування за тиском мікрофонів на удосконаленій установці UE-2ПУ та заявлені непевності вимірювань на установці UE-2П

4.3 Проведення міжнародних ключових звірень COOMET.AUV.A-K5

Угода про взаємне визнання CIPM (CIPM MRA) - це система, за допомогою якої Національні метрологічні інститути встановлюють міжнародну еквівалентність своїх національних еталонів та сертифікатів калібрування і вимірювання. Результатами цієї угоди є міжнародно визнані калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС) інститутів-учасників, які є загальнодоступними у базі даних CIPM MRA (KCDB).

Технічна основа CIPM MRA - це ключові звірення, які проводять Консультативні комітети CIPM, BIPM та Регіональні метрологічні організації (RMO), результати яких опубліковані BIPM та внесені в базу даних KCDB.

Таким чином, успішне проведення ключових звірень дає змогу встановити еквівалентність національних еталонів до аналогічних еталонів інших держав та до опорного значення ключових звірень (KCRV), тобто забезпечити єдність та простежуваність для даного виду вимірювань на міжнародному рівні.

Останні завершені міжнародні ключові звірення під егідою консультативного комітету з акустики, ультразвуку та вібрації SSAUV BIPM - SSAUV.A-K5 [47], які проводились з 2010 по 2014 роки, стосувались калібрування за тиском однодуюмових лабораторних еталонних мікрофонів в діапазоні частот від 2 Гц до 10 кГц. За результатами цих звірень було отримано нове значення KCRV, яке є, по суті, міжнародним віртуальним еталоном одиниці звукового тиску у повітряному середовищі. Таким чином, для НМІ України в області акустики (ДП НДІ «Система») виникла необхідність приєднатись до нового значення KCRV та актуалізувати заявлені раніше СМС можливості України у цій області. Було прийняте рішення про проведення двосторонніх ключових регіональних звірень із національним метрологічним інститутом Польщі (GUM), який приймав участь у звірнях SSAUV.A-K5, і який міг виконати функцію лабораторії, яка дозволить приєднати отримані результати до значення KCRV та оцінити ступень еквівалентності результатів ДП НДІ «Система» до інших учасників звірень SSAUV.A-K5. Ці нові звірення було зареєстровано в SSAUV BIPM під назвою COOMET.AUV.A-K.5.

Перед початком звірень було розроблено, затверджено та зареєстровано в ССАUV технічний протокол [57], вимоги якого є аналогічними до вимог технічного протоколу звірень ССАUV.А-К5. Відповідно до цього протоколу кожен із учасників повинен був відкалібрувати один однодуюмовий еталонний лабораторний мікрофон типу LS1p первинним методом взаємності згідно із міжнародним стандартом [30], та визначити рівень та фазу його чутливості за тиском для третинооктавного ряду частот в діапазоні від 2 Гц до 10 кГц. Пілотною лабораторією в цих звіреннях виступила акустична лабораторія GUM.

Калібрування однодуюмового еталонного лабораторного мікрофона типу LS1p (мікрофон типу 4160 виробництва фірми Bruel&Kjaer, Данія), який виступив в якості еталона переносника в цих звіреннях, було проведено в акустичній лабораторії ДП НДІ «Система» на удосконаленій еталонній установці УЕ-2ПУ ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі. Під час калібрування були виконані наступні операції:

- визначено глибину фронтальної порожнини мікрофона еталона переносника;
- визначено комплексний електричний передавальний імпеданс пар мікрофонів, які приймали участь у вимірюваннях;
- визначено резонансну частоту мікрофонів;
- визначено фронтальний та еквівалентний об'єми мікрофонів;
- розраховано рівень та фазу чутливості за тиском мікрофона еталона переносника;
- оцінено непевність вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів.

Обидві лабораторії представили результати калібрування, які подано в таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 - Результати калібрування еталона переносника, разом із відповідними заявленими розширеними непевностями вимірювань, представлені учасниками звірень COOMET.AUV.A-K5.

Частота, Гц	GUM, Польща				ДП НДІ «Система», Україна			
	Рівень чутливості	Розширена непевність вимірювань рівня чутливості (к=2)	Фаза чутливості	Розширена непевність вимірювань фази чутливості (к=2)	Рівень чутливості	Розширена непевність вимірювань рівня чутливості (к=2)	Фаза чутливості	Розширена непевність вимірювань фази чутливості (к=2)
	дБ відн. 1В/Па		градус		дБ відн. 1В/Па		градус	
1,995	-26,18	0,27	176,08	2,8	-26,348	0,09	176,4	2,5
2,512	-26,47	0,27	176,68	2,8	-26,465	0,085	176,5	2,2
3,162	-26,50	0,27	176,39	2,8	-26,579	0,08	176,6	1,9
3,981	-26,61	0,13	176,55	2,2	-26,677	0,075	176,7	1,6
5,012	-26,71	0,13	176,71	2,2	-26,768	0,07	177,1	1,3
6,310	-26,81	0,13	176,85	2,2	-26,846	0,065	177,4	1,0
7,943	-26,88	0,12	177,10	1,9	-26,912	0,06	177,6	0,7
10,000	-26,95	0,12	177,38	1,9	-26,966	0,055	177,8	0,6
12,589	-27,00	0,12	177,66	1,9	-27,012	0,05	178,0	0,5
15,849	-27,05	0,12	177,89	1,7	-27,050	0,045	178,2	0,4
19,953	-27,07	0,12	178,15	1,5	-27,078	0,04	178,4	0,4
25,119	-27,10	0,12	178,31	1,5	-27,104	0,035	178,5	0,4
31,623	-27,13	0,03	178,46	1,5	-27,126	0,03	178,6	0,4
39,811	-27,15	0,03	178,55	1,5	-27,144	0,03	178,7	0,4
50,119	-27,17	0,03	178,62	1,5	-27,161	0,03	178,8	0,4
63,096	-27,19	0,03	178,68	1,1	-27,174	0,03	178,8	0,4
79,433	-27,20	0,03	178,67	1,1	-27,186	0,03	178,8	0,4
100,00	-27,21	0,03	178,62	1,1	-27,197	0,03	178,7	0,4
125,89	-27,23	0,03	178,54	0,9	-27,207	0,03	178,6	0,4
158,49	-27,23	0,03	178,41	0,9	-27,214	0,03	178,5	0,4
199,53	-27,24	0,03	178,20	0,9	-27,220	0,03	178,2	0,4
251,19	-27,25	0,03	177,91	0,9	-27,225	0,03	177,9	0,4
316,23	-27,25	0,03	177,55	0,9	-27,229	0,03	177,6	0,4
398,11	-27,26	0,03	177,03	0,9	-27,231	0,03	177,1	0,4
501,19	-27,26	0,03	176,43	0,7	-27,229	0,03	176,4	0,4
630,96	-27,25	0,03	175,64	0,7	-27,224	0,03	175,5	0,4
794,33	-27,24	0,03	174,66	0,7	-27,213	0,03	174,5	0,4
1000,0	-27,22	0,03	173,23	0,7	-27,193	0,03	173,1	0,4
1258,9	-27,19	0,03	171,50	1,1	-27,159	0,03	171,3	0,4
1584,9	-27,14	0,03	169,27	1,1	-27,107	0,03	169,0	0,4
1995,3	-27,05	0,03	166,35	1,1	-27,023	0,03	166,1	0,4
2511,9	-26,92	0,03	162,44	0,9	-26,892	0,04	162,1	0,4
3162,3	-26,72	0,04	157,17	1,0	-26,698	0,05	156,8	0,4
3981,1	-26,44	0,05	149,62	1,2	-26,427	0,06	149,2	0,4
5011,9	-26,13	0,06	138,25	1,0	-26,125	0,07	137,9	0,7
6309,6	-26,04	0,06	120,87	1,0	-26,051	0,08	120,8	1
7943,3	-26,99	0,06	96,21	1,2	-27,000	0,09	96,5	1,3
10000	-30,00	0,11	69,88	1,4	-29,992	0,1	70,7	1,6

Головною метою цього звірення було визначення ступенів еквівалентності результатів, які отримані в ДП НДІ «Система», до значення KCRV через зв'язуючу лабораторію GUM.

Процедура приєднання результатів звірень COOMET.AUV.A-K5 до результатів, які отримано під час CCAUV.A-K5, ґрунтувалась на методиці, яку наведено в [58, 59]. А саме, було розраховано поправку Δ , як різницю між

результатами, отриманими GUM у звіреннях SSAUV.A-K5 та COOMET.AUV.A-K5, і яку було використано для перетворення результатів ДП НДІ «Система» в COOMET.AUV.A-K5 для їх безпосереднього порівняння із результатами SSAUV.A-K5. Значення цієї поправки та відповідні непевності було розраховано відповідно до формул 4.13 – 4.15:

$$\Delta = x_{PL} - y_{PL} \quad (4.13)$$

$$u^2(\Delta) = u^2(x_{PL}) + u^2(y_{PL}) - 2 \cdot cov(x_{PL}, y_{PL}) \quad (4.14)$$

$$u^2(\Delta) = 2 \cdot u_A^2(x_{PL}), \text{ за припущення, що } u(x_{PL}) = u(y_{PL}) = \frac{U(x_{PL})}{2} \quad (4.15)$$

де:

Δ - поправка, яку розраховано для кожної частоти як різницю між результатами GUM під час SSAUV.A-K5 та COOMET.AUV.A-K5, відповідно;

x_{PL} , y_{PL} - результати GUM під час SSAUV.A-K5 та COOMET.AUV.A-K5, відповідно;

$u(x_{PL})$, $u(y_{PL})$ - стандартна непевність, заявлена GUM під час SSAUV.A-K5 та COOMET.AUV.A-K5, відповідно;

$U(x_{PL})$ - розширена непевність із коефіцієнтом охоплення $k = 2$, заявлена GUM;

$u_A(x_{PL})$ - стандартна непевність типу А, заявлена GUM;

$u(\Delta)$ - стандартна непевність поправки.

Односторонні ступені еквівалентності (DoE), визначені як різниця між перетвореними результатами ДП НДІ «Система», $y_{UA} + \Delta$, та KCRV, було розраховано на кожній частоті, як для модуля чутливості мікрофона, так і для її фази, згідно із формулою 4.16. Відповідна розширена непевність ($k=2$) була розрахована за формулами 4.17 – 4.19:

$$d_{UA} = y_{UA} + \Delta - x_{ref} \quad (4.16)$$

$$u^2(d_{UA}) = u^2(y_{UA}) + u^2(\Delta) + u^2(x_{ref}) - 2 \cdot cov(\Delta, x_{ref}) \quad (4.17)$$

$$u^2(d_{UA}) = u^2(y_{UA}) + u^2(\Delta) + u^2(x_{ref}) - \frac{u^2(\Delta) \cdot u^2(x_{ref})}{u^2(x_{PL})} \quad (4.18)$$

$$U(d_{UA}) = 2 \cdot u(d_{UA}) \quad (4.19)$$

де:

x_{ref} – KCRV, які визначено під час ССАUV.А-К5;

$u^2(x_{ref})$ - стандартна непевність KCRV;

y_{UA} - результати ДП НДІ «Система» в звіреннях СООМЕТ.АUV.А-К5;

d_{UA} - DoE результатів ДП НДІ «Система» по відношенню до KCRV;

$u(y_{UA})$ - стандартна непевність, заявлена ДП НДІ «Система»;

$u(d_{UA})$ - стандартна непевність DoE результатів ДП НДІ «Система»;

$U(d_{UA})$ - розширена (k=2) непевність DoE результатів ДП НДІ «Система»;

Результати розрахунку DoE ДП НДІ «Система» по відношенню до KCRV разом із розширеною непевністю, представлено в таблиці 4.21 та, у графічному вигляді, на рисунках 4.14 та 4.15 для рівня та фази чутливості, відповідно.

Таблиця 4.21 - ДоЕ результатів ДП НДІ «Система» по відношенню до KCRV
ССАUV.A-K5

Частота, Гц	ДоЕ для рівня чутливості, дБ відн. 1В/Па		ДоЕ для фази чутливості, градуси	
	d_{UA}	$U(d_{UA})$	d_{UA}	$U(d_{UA})$
1,995	-0,120	0,351	-0,888	4,210
2,512	0,019	0,350	-0,944	4,040
3,162	-0,060	0,349	-0,682	3,886
3,981	-0,055	0,104	-0,597	3,246
5,012	-0,047	0,100	-0,211	3,110
6,310	-0,027	0,097	-0,157	2,998
7,943	-0,027	0,075	-0,004	2,639
10,000	-0,019	0,071	0,007	2,614
12,589	-0,024	0,067	0,032	2,594
15,849	-0,008	0,055	0,057	2,297
19,953	-0,020	0,050	0,011	2,019
25,119	-0,014	0,047	-0,048	2,019
31,623	0,000	0,043	0,082	1,743
39,811	0,007	0,043	0,078	1,743
50,119	0,000	0,043	0,105	1,743
63,096	0,014	0,043	0,063	1,469
79,433	0,009	0,043	0,074	1,470
100,00	0,011	0,043	0,075	1,470
125,89	0,015	0,043	0,073	1,200
158,49	0,007	0,043	0,065	1,200
199,53	0,011	0,043	0,022	1,200
251,19	0,023	0,043	-0,036	0,938
316,23	0,014	0,043	-0,001	0,938
398,11	0,026	0,043	-0,041	0,938
501,19	0,026	0,043	-0,033	0,693
630,96	0,017	0,043	-0,138	0,693
794,33	0,018	0,043	-0,319	0,693
1000,0	0,017	0,043	-0,252	0,693
1258,9	0,018	0,043	-0,224	0,693
1584,9	0,021	0,043	-0,331	0,693
1995,3	0,007	0,042	-0,397	0,693
2511,9	0,008	0,050	-0,454	0,693
3162,3	-0,014	0,058	-0,544	0,693
3981,1	-0,027	0,067	-0,520	0,693
5011,9	-0,046	0,079	-0,360	1,100
6309,6	-0,034	0,091	0,057	1,312
7943,3	-0,002	0,103	0,379	1,723
10000	-0,054	0,113	0,826	2,135

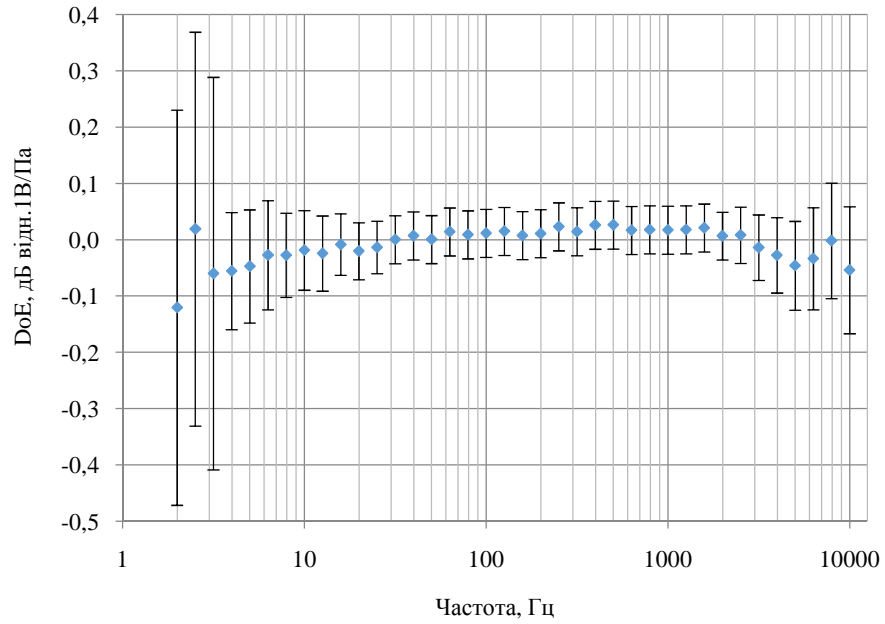


Рисунок 4.14 - DoE результатів визначення рівня чутливості ДП НДІ «Система» відносно KCRV CCAUV.A-K5

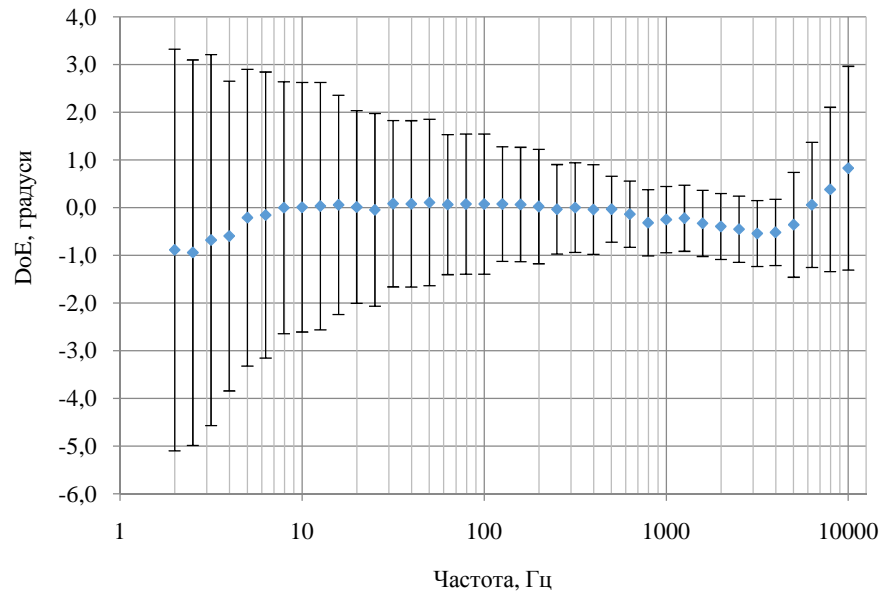


Рисунок 4.15 - DoE результатів визначення фази чутливості ДП НДІ «Система» відносно KCRV CCAUV.A-K5

На основі наведених вище результатів, можна зробити висновок, що ступені еквівалентності, розраховані на підставі даних, які подали учасники звірень COOMET.AUV.A-K5, підтвердили відповідність результатів ДП НДІ «Система», як для визначення рівня чутливості за тиском еталонних мікрофонів, так і для їх фази, значенням KCRV, які отримано в CCAUV.A-K5 в усьому діапазоні частот від 2 Гц до 10 кГц.

Однак, під час проведення міжнародної експертизи результатів цих звірень було зроблено кілька зауважень, головними із яких були наступні:

- непевність вимірювань, заявлена пілотною лабораторією (GUM), на деяких частотах, як для рівня чутливості, так і для фази, суттєво перевищує непевність, заявлену ДП НДІ «Система», що видно із даних, представлених в таблиці 4.20. А це не дозволяє однозначно стверджувати, що результати, отримані ДП НДІ «Система», повністю узгоджуються із KCRV, оскільки отримана непевність DoE, в якій домінує непевність пілотної лабораторії, суттєво впливає на значення самих DoE. Якщо із розрахунку непевності DoE виключити непевність, заявлену пілотною лабораторією, і обмежитись тільки непевністю, яку заявила ДП НДІ «Система», то отримані скориговані результати, які позначено як DoE', представлено на рисунках 4.16 та 4.17 для рівня та фази чутливості, відповідно.

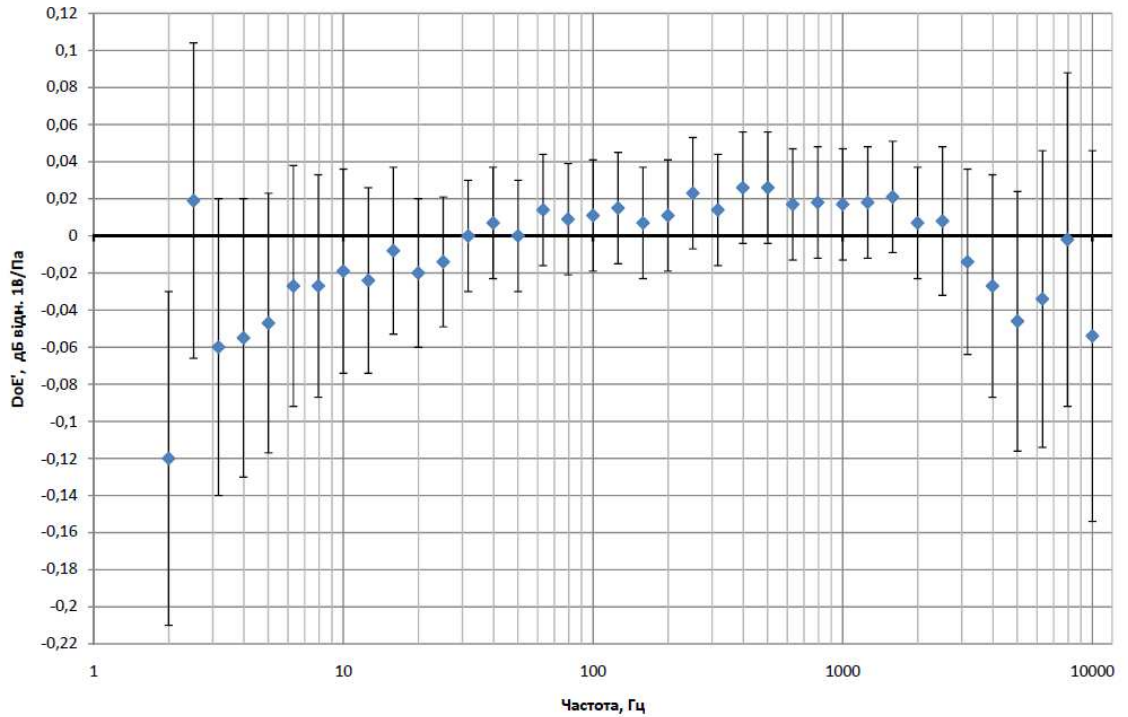


Рисунок 4.16 – Скориговані DoE' результатів визначення рівня чутливості ДП
НДІ «Система» відносно KCRV SSAUV.A-K5

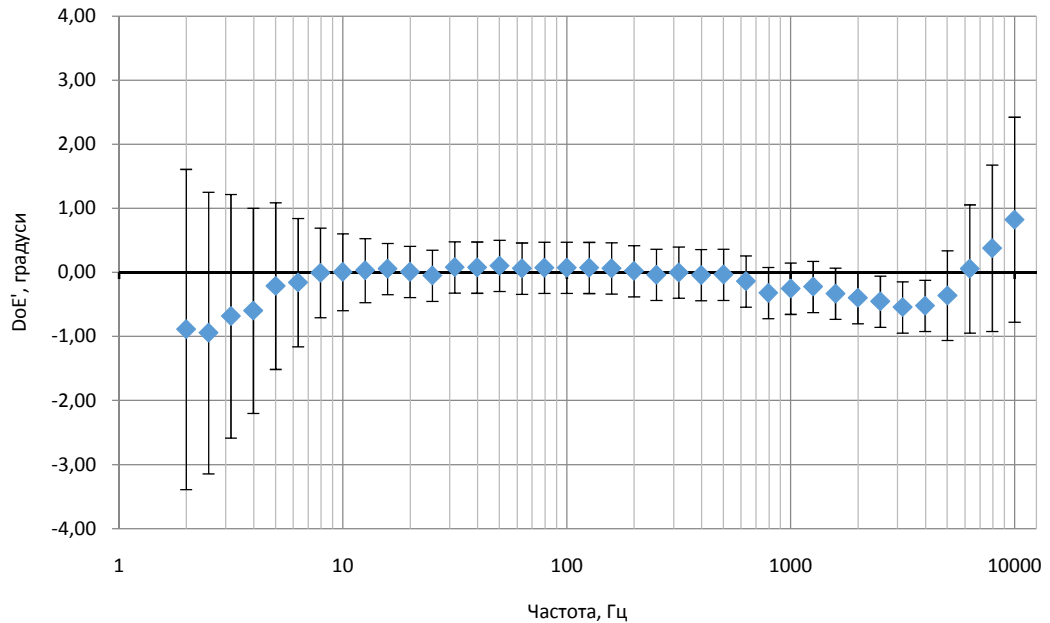


Рисунок 4.17 – Скориговані DoE' результатів визначення фази чутливості ДП
НДІ «Система» відносно KCRV SSAUV.A-K5

Як видно із представлених результатів, скориговані DoE' для рівня чутливості на частоті 2 Гц та для фази чутливості на частотах від 2 кГц до

4 кГц, можливо, не є еквівалентними до результатів KCRV SSAUV.A-K5. Отримані результати не дають змоги дійти однозначного висновку щодо еквівалентності результатів ДП НДІ «Система» до KCRV SSAUV.A-K5 на вказаних частотах, тому їх було вилучено із подання нових СМС можливостей України. Крім того, SSAUV рекомендувало звернути увагу на ситуацію, яка виникла, та не допустити її повторення у майбутніх звіреннях.

- другим, суттєвим зауваженням, яке було висунуто міжнародними експертами за результатами звірень COOMET.AUV.A-K5, було те, що DoE' визначення рівня чутливості в околі частоти 400 Гц, з однієї сторони, доволі близько наближаються до значень розширеної непевності вимірювань ДП НДІ «Система», а з іншої, носять достатньо хаотичний характер внаслідок доволі великого значення непевності вимірювань за типом А пілотної лабораторії, а це може бути свідченням того, що, в дійсності, отримані результати ДП НДІ «Система» в цьому діапазоні частот не є еквівалентними до KCRV SSAUV.A-K5. Однак, до результатів вимірювань рівня чутливості, які представила пілотна лабораторія, можна застосувати процедуру зменшення випадкової складової (було застосовано апроксимацію поліномом п'ятого порядку), та оцінити отримані результати. На рисунку 4.18 представлено порівняння отриманих «згладжених» ступенів еквівалентності результатів ДП НДІ «Система» вимірювання рівня чутливості мікрофонів у цьому діапазоні, які позначено як DoE'', із DoE'. Як видно із представлених результатів, після застосування процедури згладжування до результатів пілотної лабораторії, значення DoE'' ДП НДІ «Система» перестають носити хаотичний характер, а найбільше відхилення від KCRV в цьому діапазоні частот не перевищує 0,021 дБ (розширена непевність вимірювань ДП НДІ «Система» становить при цьому 0,03 дБ). Таким чином, можна стверджувати, що результати ДП НДІ «Система» визначення рівня чутливості в околі частоти 400 Гц є еквівалентними до KCRV SSAUV.A-K5.

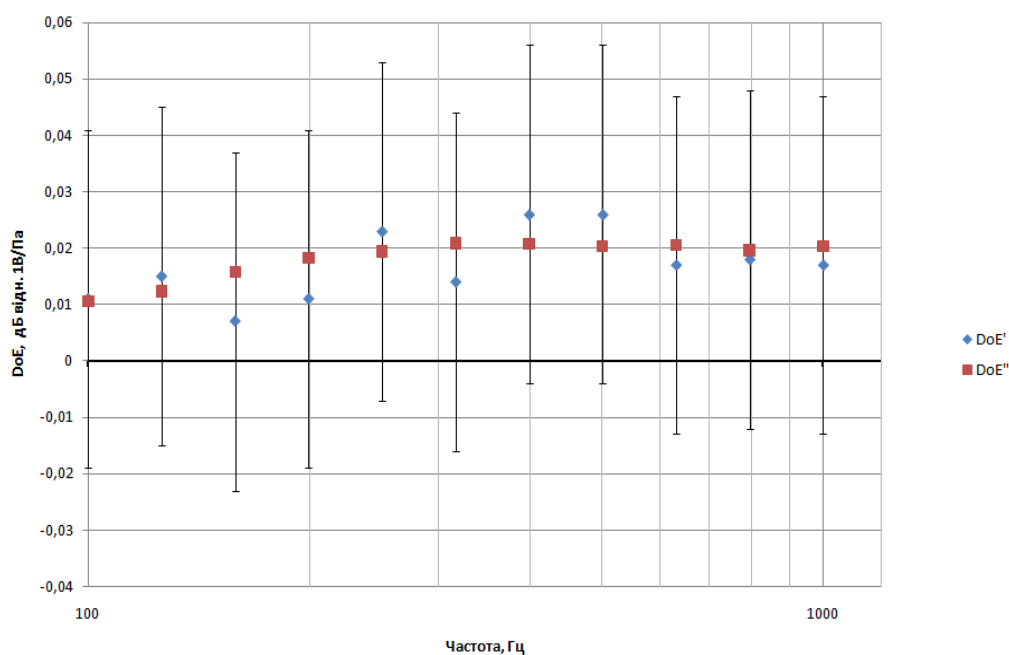


Рисунок 4.18 – Порівняння значень DoE' та DoE'' результатів визначення рівня чутливості ДП НДІ «Система» відносно KCRV SSAUV.A-K5

Проведене звірення повністю відповідало вимогам ВІРМ та СООМЕТ до регіональних ключових звірень. Звіт за результатами звірень СООМЕТ.AUV.A-K5 було представлено в ССАУВ. Після обговорення, його було затверджено та опубліковано [11].

Отримані результати дали змогу ДП НДІ «Система» представити в ССАУВ оновлені СМС можливості України в галузі акустичних вимірювань, які було опубліковано в базі даних KCDB ВІРМ [60]. Крім того, результати проведених звірень дають можливість порівняти заявлені непевності калібрування лабораторних мікрофонів типу LS1 в ДП НДІ «Система» із іншими учасниками звірень ССАУВ.A-K5. Результати порівняння представлено на рисунку 4.19.

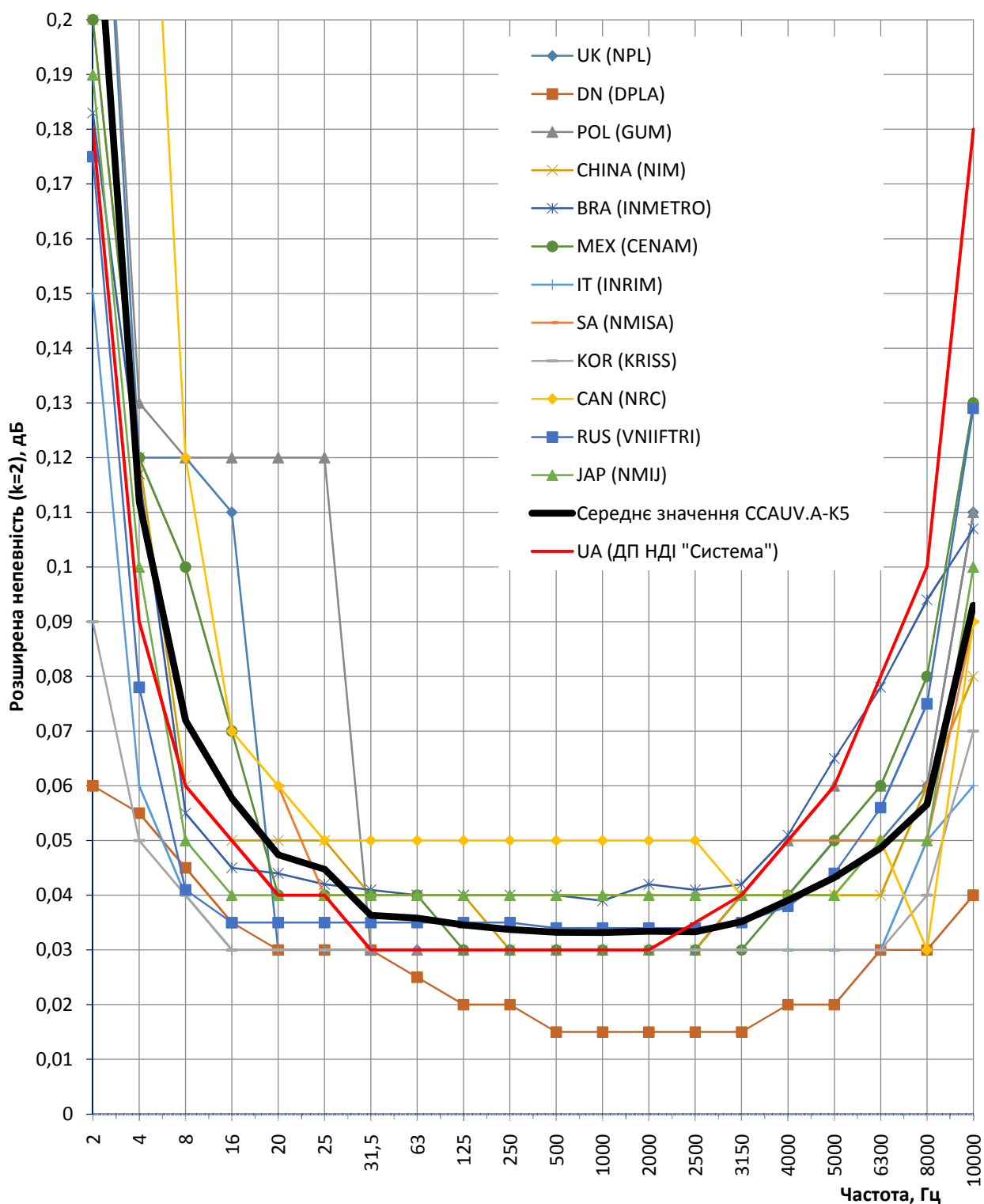


Рисунок 4.19 – Заявлені непевності калібрування мікрофонів типу LS1 учасниками міжнародних звірень CCAUV.A-K5 та ДП НДІ «Система»

Як видно із представлених результатів, непевності калібрування мікрофонів типу LS1 в ДП НДІ «Система», загалом, відповідають середньому світовому рівню подібних значень.

4.4 Напрямки подальшого удосконалення Національного державного первинного еталона ОЗТ

Для забезпечення єдності вимірювань в Україні та у світі державний первинний еталон повинен відповідати останнім досягненням науки у своїй галузі та враховувати перспективи подальшого розвитку даної області метрології. Напевно найкращу оцінку наявних потреб та перспектив у галузі метрології вимірювань у повітряній акустиці можна знайти у стратегії розвитку на 2019 – 2029 роки, яку підготував ССАУВ ВІРМ [55].

Відповідно до цього документа, подальший розвиток вимірювань у повітряній акустиці охоплює чотири основні напрямки:

- а) удосконалення відповідної метрологічної інфраструктури, створення нових давачів та приладів;
- б) оцінювання та збереження слуху людини;
- в) вимірювання шуму від приладів та машин;
- г) оцінювання шуму навколишнього середовища.

Для всіх цих сфер спільним знаменником є покращення оцінення та пом'якшення впливу шуму на людину та середовище, що її оточує. Ці завдання вимагають створення нових типів давачів, які дозволяють розробляти недорогі надійні сенсорні системи, здатні здійснювати бездротову, автономну та інтелектуальну роботу, можливо, із поєднанням багатофакторного зондування в межах одного пристрою або мережі пристроїв. Все це потребує проведення вимірювань у розширених діапазонах, створення нових типів давачів та методик їх калібрування.

Еталони одиниць звукового тиску у повітряному середовищі, засновані на принципі електроакустичної взаємності, є основним джерелом простежуваності для вимірювань звуку у повітрі. Не очікується, що найближчим часом їх замінять еталони, які побудовано на інших принципах, однак зараз є реальністю розширення частотного діапазону та рівнів калібрування в сторону низьких (калібрування мікрофонів за тиском) та високих (калібрування у вільному полі) частот. Однак, існує також необхідність дослідження нових принципів

калібрування, наприклад, первинного калібрування мікрофонів оптичними методами.

Все це знайшло своє відбиття у запланованих ССАУВ ВІРМ міжнародних звіреннях на 2019 -2029 роки, перелік яких представлено у таблиці 4.22.

Таблиця 4.22 – Перелік запланованих ССАУВ ВІРМ міжнародних звірень у галузі повітряної акустики на 2019 -2029 роки

№	Опис	Підстава	Діапазон вимірювань	Тип	Очікуваний початок
1	Звірення лабораторних еталонних мікрофонів типу LS2	Повторення ССАУВ.А-К4	Чутливість у вільному полі в діапазоні 1 кГц – 30 кГц	ключові	2020
2	Звірення лабораторних еталонних мікрофонів типу LS1	Повторення ССАУВ.А-К5	Чутливість за тиском в діапазоні 2 Гц – 20 кГц	ключові	2022
3	Звірення робочих еталонних мікрофонів типу WS3	Розширення частотного діапазону до 150 кГц	Чутливість у вільному полі в діапазоні 10 кГц – 150 кГц	пілотні	2020
4	Звірення лабораторних еталонних мікрофонів типу LS1 та LS2	Калібрування у дифузному полі	Чутливість у дифузному полі в діапазоні 2 Гц – 20 кГц	пілотні	2020
5	Калібрування мікрофонів типу LS1, LS2 та WS3	Калібрування за допомогою оптичних методів	Чутливість за тиском та у вільному полі в діапазоні 1 Гц – 200 кГц	пілотні	2022

ДП НДІ «Система», як НМІ України в галузі акустики, планує прийняти участь у всіх відповідних ключових звіреннях, або під егідою ССАУВ, або КООМЕТ. Крім того, найближчих часом ДП НДІ «Система» планує також прийняти участь у кількох додаткових міжнародних звіреннях КООМЕТ:

- із калібрування робочих еталонних мікрофонів типу WS2 методом порівняння в діапазоні частот від 2 Гц до 250 Гц (учасники – Білорусь, Китай, Туреччина, Росія та Україна;

- із калібрування калібраторів звуку та пістонфонів (учасники – Туреччина, Україна, Ірландія, Білорусь, Литва, Саудівська Аравія та Росія);
- із визначання акустичного імпедансу штучного вуха.

З урахуванням аналізу складових стандартної непевності вимірювань під час калібрування мікрофонів можна зробити висновок, що напрямки подальшого удосконалення ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі лежать у зменшенні непевності визначання електричного передавального імпедансу та непевності за типом А (низькі частоти) і непевності визначання параметрів довкілля (високі частоти).

4.5 Висновки до розділу

1. Представлено структурну схему удосконаленої еталонної установки ДПЕУ ОЗТ для калібрування мікрофонів за тиском;
2. Визначено метрологічні характеристики удосконаленої еталонної установки ДПЕУ ОЗТ для калібрування мікрофонів за тиском;
3. Представлено аналіз результатів двосторонніх ключових регіональних звірень із національним метрологічним інститутом Польщі (GUM) – COOMET.AUV.A-K5;
4. Заявлено, що отримані результати дали змогу представити в ССАUV оновлені калібрувальні та вимірювальні можливості України в галузі акустичних вимірювань (15 СМС-рядків), які було опубліковано в KCDB ВІРМ.

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе наукове завдання щодо удосконалення ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі і отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Із проведеного порівняльного аналізу існуючих методів та засобів відтворення ОЗТ виявлено, що первинний метод взаємності калібрування мікрофонів за тиском є фактично єдиним первинним методом калібрування мікрофонів, який використовують всі провідні акустичні лабораторії світу для відтворення ОЗТ оскільки він дозволяє досягти найвищого рівня точності.

Проведено порівняльний аналіз калібрувальних та вимірювальних можливостей в галузі акустичних вимірювань в Україні та в провідних закордонних акустичних лабораторіях світу та встановлено, що характеристики ДПЕУ ОЗТ ДЕТУ 10-01-00 вже не відповідають сучасному стану вимірювань;

2. Проведено аналіз структури ДЕТУ 10-01-00 та встановлено, що головними джерелами непевності вимірювань під час калібрування мікрофонів на цьому еталоні є непевності визначання: електричного передавального імпедансу, параметрів довкілля, параметрів мікрофонів, геометричних розмірів мікрофонів та КМО, а також повторювальність вимірювань під час калібрування. На основі проведеного аналізу визначено теоретичні засади удосконалення існуючого ДПЕУ ОЗТ у повітряному середовищі;
3. Представлено детальну математичну модель процесу калібрування мікрофонів методом взаємності. Проведено оцінення впливу шумів вимірювальних каналів на непевність результатів калібрування мікрофонів за допомогою моделювання методом Монте-Карло. Оцінено вплив часової нестабільності, нелінійності, розрядності АЦП, паразитного імпедансу та перехресних завад у вимірювальних каналах. Крім того методом числового диференціювання оцінено вплив параметрів довкілля на акустичний передавальний імпеданс системи «мікрофони-КМО», зазначено, що

найбільший вплив на непевність результатів калібрування мікрофонів має непевність визначання температури повітря в КМО;

4. Проаналізовано різні моделі врахування ефекту теплопровідності під час калібрування мікрофонів та зроблено висновки стосовно методики розрахунку поправки на теплопровідність під час калібрування мікрофонів за тиском на державному первинному еталоні;
5. Представлено структурну схему удосконаленої еталонної установки ДПЕУ ОЗТ для калібрування мікрофонів за тиском, яку розроблено на основі проведеного аналізу факторів, що впливають на непевність вимірювань під час калібрування мікрофонів;
6. Створено методику визначання метрологічних характеристик удосконаленого ДПЕУ ОЗТ та проведено його калібрування. Складено бюджет непевності калібрування мікрофонів за тиском на удосконаленому ДПЕУ ОЗТ;
7. Проведено міжнародні ключові звірення із калібрування мікрофонів типу LS1 за тиском які підтвердили, що результати отримані на удосконаленому ДПЕУ ОЗТ є еквівалентними до значень KCRV, які отримано в SSAUV.A-K5, в усьому діапазоні частот. За результатами цих звірень було оновлено 15 СМС-рядків України в галузі акустичних вимірювань в KCDB VIPM.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Estimating the uncertainty of a primary acoustic standard by numerical methods / V. P. Chalyi, V. V. Parakuda, A. A. Kosterov, N. V. Gaiduk, A. M. Faida // Measurement Techniques. 2005. Vol. 48, iss. 5. P. 438–444
2. Гайдук Н.В., Костеров А.А., Файда А.М., Чалый В.П. Два численных метода оценки неопределенности измерений // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ' 2005). – Том VII. Международная конференция «Метрология и измерительная техника» (МК МИТ' 2005). – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2005. – С.68-71
3. Чалий В.П., Костеров О.О., Файда А.М. Сучасні методи розрахунку невизначеності у вимірюваннях // III Міжнародний науково-практичний семінар “Проблеми якості та стандартизації в автоматизованих технологіях”. – Збірник доповідей. – Східниця: ЛФІХФ ДП “УкрНДНЦ”. – 2005. – С.50-62
4. Чалий В. П., Паракуда В. В., Гайдук М. В., Костеров О. О., Файда А. М. Оцінювання характеристик точності первинного акустичного еталона методом Монте-Карло / Збірник праць IV Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія-2004). – Харків: ННЦ “Інститут метрології”. – 2004. – Том 2 С.133-135
5. Ключові зв'язки державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі / В. Паракуда, В. Чалий, Е. Пасько, О. Костеров, В. Борис // Метрологія та прилади. 2007. №1. С.20–25
6. Чалый В.П., Костеров А.А. Оценивание неопределенности в измерениях методом Монте-Карло и методом численного дифференцирования // Сборник доклады XVII-ти Национален научен симпозиум с международно участие “Метрология и метрологично осигуряване”. – Созопол. – Технический университет София. – Изд. “СОФТТРЕЙД”. – Бългрия. – 2007. – С.36-41. (10-14 септември 2007 г.)

7. В.П.Чалий, О.О.Костеров. Метод Монте-Карло та метод числового диференціювання для оцінювання характеристик точності результатів вимірювання // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація. Матеріали науково-технічної конференції, 30-31 жовтня 2008 р., Львів, ДП НДІ «Система» 2008. – С. 139-148
8. Е.В.Пасько, В.П.Чалий, О.О.Костеров, І.Г.Кізілівський, С.В.Кузнецов. Результати пілотного звірення національних акустичних еталонів України та Росії в інфразвуковому діапазоні частот // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація. Матеріали науково-технічної конференції, 30-31 жовтня 2008 р., Львів, ДП НДІ «Система» 2008. – С. 194-198
9. Ключові звірення державного первинного акустичного еталона в інфразвуковому діапазоні частот / В. Чалий, Е. Пасько, О. Костеров, І. Кізілівський. // Метрологія та прилади. 2012. №1. С. 17–22
10. Ильницкая Т. М., Чалый В. П., Костеров А. А. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности ультразвукового эталона // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 1 (99). – С. 108–112
11. D.Dobrowolska, A.Kosterov / Report on key comparison COOMET.AUV.A-K5: Pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz / Metrologia, Volume 53, Technical Supplement, 2016. pp. 22. doi:10.1088/0026-1394/53/1A/09003 [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://www.bipm.org/utls/common/pdf/final_reports/AUV/A-K5/COOMET.AUV.A-K5.pdf
12. Костеров О.О., Паракуда В.В. / Особливості звірень державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі з національними еталонами інших держав та міжнародними еталонами / III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2017», 24-27 січня 2017 року: тези доповідей / Відп. за вип. Володарський Є.Т. – Київ: Академія метрології України, 2017. – С. 87-88. ISBN 978-617-397-133-0

13. Костеров О.О., Кізілівський І.Г., Шпак О.В. / Стан еталонної бази України в галузі акустичних та ультразвукових вимірювань / Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку технічного регулювання у сферах виробництва, послуг і торгівлі згідно з вимогами ЄС», 6-8 вересня 2017 року: матеріали конференції – Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2017. С. 109-112
14. Nikolaenko A., Pozdeeva V., Kosterov O. Final Report "The comparison of national standards of the sound pressure unit in air through calibration of working standard microphones" // Metrologia. 2018. Vol. 55, iss. 1 A. P. 09001-1–09001-21. 0 doi:10.1088/0026-1394/55/1A/09001 [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://www.bipm.org/utils/common/pdf/final_reports/AUV/A-S2/COOMET.AUV.A-S2.pdf
15. Костеров О. О. Визначення напрямків вдосконалення Державного первинного еталону одиниці звукового тиску для підвищення точності калібрування мікрофонів у вільному полі // Technical Using of Measurement-2018 : тези доповідей IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології (Славське, 13–18 лютого 2018 р.). – 2018. – С. 137–138
16. Костеров О. О. Розвиток еталона одиниці звукового тиску у повітряному середовищі // Метрологія та вимірювальна техніка : тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 9–11 жовтня 2018 р.). – 2018. – С. 24–25 [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/news/M-2018/MVT2018_Tezisy.pdf
17. Костеров О. О. Стратегія 2017-2027 ССАУВ ВІРМ та вдосконалення національного акустичного еталону України ДЕТУ 10-01-11 // Системи-2018 : тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 22–23 листопада 2018 р.). – 2018. – С. 29–30
18. Бугайцова П. В., Яцук В. А., Костеров А. А. Анормальность закона распределения при оценивании неопределенности эталона звукового

давления в воздушной среде, при определенных неопределенностях температуры // Системи обробки інформації. 2008. Вип. 4(71). С. 63-65

19. Костеров О. О., Паракуда В. В., Шпак О. В. Удосконалення державного первинного еталона України дету 40-01-11 для калібрування мікрофонів у вільному полі // Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019 (XXIII міжнародний семінар метрологів МСМ'2019) : тези доповідей, до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій (Львів, 10–12 вересня 2019 р.). – 2019. – С. 124–125
20. Костеров О. О., Паракуда В. В., Бубела І. В. Оцінення впливу теплопровідності на непевність вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів // Technical using of measurement-2020 : тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4–7 лютого 2020 р., Славське. – 2020. – С. 73–76
21. Malcolm J. Crocker, Encyclopedia of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc. 1997 ISBN:9780471177678
22. Bruel & Kjaer, Nerum, Denmark. Technical documentation - Microphone handbook for the Falcon Range of Microphone Products, February 1995. Online documentation BE 5105-12 [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.bksv.com>
23. ДСТУ EN 61094-1:2018 Мікрофони вимірювальні. Частина 1. Технічні характеристики лабораторних еталонних мікрофонів
24. E. Frederiksen, Acoustic metrology – an overview of calibration methods and their uncertainties Int. J. Metrol. Qual. Eng. **4**, 97–107 (2013) EDP Sciences 2013 DOI: 10.1051/ijmqe/2013045
25. T. den Volde, Reciprocity measurements in acoustical and mechano-acoustical systems. Review of theory and applications. [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://pub.dega-akustik.de/NAG_DAGA_2009/data/articles/000590.pdf
26. M. Lampton and J.R. Burke, “Time reversal and reciprocity”, Acustica, vol. 56, pp.23-28, 1984

27. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Allan B. Coppens, James V. Sanders, “Fundamentals of Acoustics”, 4-th ed. John Wiley & Sons Inc., NY, 2000
28. R.K. Cook, “Absolute pressure calibration of microphones”, J. Res. Natl. Bur. Stand. 25, 489–505 (1940)
29. R.K. Cook, “Absolute pressure calibration of microphones”, J. Acoust. Soc. Am. 12, 415–420 (1941)
30. ДСТУ ІЕС 61094-2:2009 Електроакустика. Мікрофони вимірювальні. Частина 2. Первинне калібрування за тиском лабораторних еталонних мікрофонів методом взаємності
31. W. R. MacLean, “Absolute measurement of sound without a primary standard”, J. Acoust. Soc. Am. 12, pp.140-146, 1940
32. L.L. Beranek, *Acoustic Measurements* (John Wiley & Sons, Inc., New York, London, 1949), p. 113
33. T.F.W. Embleton, I.R. Dagg: Accurate coupler pressure calibration of condenser microphones at middle frequencies, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 320–326 (1960)
34. A.C. Corney: Capacitor microphone reciprocity calibration, Metrologia **11**, pp. 25–32 (1975)
35. G.S.K. Wong, T.F.W. Embleton: Arrangement for precision reciprocity calibration of condenser microphones, J. Acoust. Soc. Am. **66**(5), pp. 1275–1280 (1979)
36. D.L.H. Gibbings, A.V. Gibson: Contributions to the reciprocity calibration of microphones, Metrologia **17**, pp. 7–15 (1981)
37. G. S. K. Wong, T. F. W. Embleton: *AIP Handbook of Condenser Microphones. Theory, Calibration, and Measurements* (American Institute of Physics, New York 1995)
38. K. Rasmussen: The static pressure and temperature coefficients of laboratory standard microphones, Metrologia, Volume 36, 1998. pp. 267-273
39. L. Wu, G.S.K. Wong, P. Hanes, W. Ohm: Measurement of sensitivity level pressure corrections for LS2P laboratory standard microphones, Metrologia **42**, pp. 45–48 (2005)

- 40.C. Guianvarc'h, J.-N.Durocher, M. Bruneau, A.-M.Bruneau, "Acoustic transfer admittance of cylindrical cavities", *J. Sound Vib.* **292**, pp. 595-603 (2006)
- 41.R. Jackett, "The Effect of Heat Conduction on the Realisation of the Primary Standard for Sound Pressure", *Metrologia* **51**, pp. 423-430 (2014)
- 42.Richard Jackett, Janine Avison, "Realizing the primary standard for sound pressure: The trouble with IEC 61094-2", *InterNoise 2015*, San Francisco, California, USA [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/281280925>
[Realizing the primary standard for sound pressure The trouble with IEC 61094-2](#)]
- 43.P Vincent, D Rodrigues, F Larssonier, C Guianvarc'h and S Durand, «Acoustic transfer admittance of cylindrical cavities in infrasonic frequency range» *Metrologia* **56** (2019) 015003 (16pp) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aace28>
- 44.IEC Publication 327 Precision method for pressure calibration of one-inch standard condenser microphones by the reciprocity technique (International Electrical Commission, Geneva, 1971)
- 45.IEC 61094-2:1992-03 Measurement Microphones - Part 2: Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique (IEC, Geneva 1992)
- 46.Dominique Rodrigues, Technical protocol for key comparison CCAUV.A-K6, Issue 2 December 2018, Laboratoire National de métrologie et d'Essais, Trappes, France [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.bipm.org/kcdb/comparison/doc/download/1215/ccauv.a-k6_technical_protocol.pdf
- 47.J. Avison and R. G. Barham, Final report on key comparison CCAUV.A-K5: pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz, *Metrologia*, 51, Technical Supplement, 2014

48. Joint Report of Activities from DFM and BKSU-DPLA [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://www.bipm.org/cc/CCAUV/Allowed/12/DFM+BKSU-DPLA_Report_to_CCAUV_2019.pdf
49. ДСТУ EN 61094-3:2019 Електроакустика. Вимірювальні мікрофони. Частина 3. Первинний метод калібрування лабораторних еталонних мікрофонів у вільному полі методом взаємності
50. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018 Невизначеність у вимірюваннях. Частина 3. Настанови з подання невизначеності у вимірюваннях (GUM:1995)
51. S. Barrera-Figueroa, ‘‘New methods for transducer calibration: Free-field reciprocity calibration of condenser microphones’’, Ph.D. thesis, Technical university of Denmark, 2003
52. K. Rasmussen, Radial wave-motion in cylindrical plane-wave couplers, Acta Acustica. 1993. №1. pp. 145-151
53. Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д. Цифровая обработка сигналов — М.: Радио и связь, 1985
54. K. Rasmussen: *The Influence of Environmental Conditions on the Pressure Sensitivity of Measurement Microphones*, Brüel Kjør Tech. Rev. 1 (Brüel Kjør, Noerum 2001)
55. BIPM 2017 Strategy 2017–2027, Consultative committee for acoustics, ultrasound, and vibration (CCAUV) *Technical report* BIPM
56. Reciprocity Calibration System — Type 9699, Product Data, Brüel Kjør, Noerum, BP 1697–12, p12
57. D. Dobrowolska, Technical protocol for COOMET comparison, COOMET.AUV.A-K5, CCAUV, 2015, <http://kcdb.bipm.org/>;
58. I. A. Kharitonov and A. G. Chunovkina, Evaluation of regional key comparison data: two approaches for data processing, Metrologia, 43, (2006), pp. 470 - 476
59. COOMET R/GM/14:2006 Recommendation, Guidelines for data evaluation of COOMET key comparison, <http://www.coomet.org>
60. BIPM.org Results for: Acoustics, Ultrasound, Vibration > Sound in air > "ukraine": [Електронний ресурс] // Режим доступу:

https://www.bipm.org/kcdb/cmc/search?domain=PHYSICS&areaId=1&keywords=ukraine&specificPart.branch=1&specificPart.service=-1&specificPart.subService=-1&specificPart.individualService=-1&_countries=1&publicDateFrom=&publicDateTo=&unit=-1&minValue=&maxValue=&minUncertainty=&maxUncertainty=