

# ДЕТЕКТУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЕХО- ІМПУЛЬСІВ У КРИСТАЛАХ ПРИ НИЗЬКИХ РІВНЯХ ЗБУДЖЕННЯ

**В.О. Хандожко**

Аспірант\*

Контактний тел.: (03722) 4-24-36

E-mail: khand@chv.ukrpack.net

**М.Д. Раранський**

Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри\*\*

Контактний тел.: (0372) 54-44-00

E-mail: ftt2010@bigmir.net

**Л.Ф. Політанський**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри\*

Контактний тел.: (03722) 4-24-36

E-mail: rt-dpt@chnu.cv.ua

**В.Н. Балазюк**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*\*

\*\*Кафедра фізики твердого тіла\*\*\*

Контактний тел.: (03722) 4-48-34

E-mail: EM.MEL@bigmir.net

**А.П. Саміла**

Кандидат технічних наук, асистент\*

Контактний тел.: (03722) 4-24-36

E-mail: asound@ukr.net

\*Кафедра радіотехніки та інформаційної безпеки\*\*\*

\*\*\*Чернівецький національний університет

ім. Юрія Федьковича

вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012

*Розроблена та реалізована автоматизована експериментальна установка для вимірювання швидкостей поширення та згасання пружних хвиль в монокристалах. Прецизійні вимірювання зміни швидкостей поширення ультразвукових хвиль в кристалах реалізуються зсувом фази заповнюючих високочастотних коливань між зондувальним та відбитим імпульсами.*

*Наведені приклади реалізації поширення пружних хвиль в монокристалах GdSb, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, GaSe*

*Ключові слова: ехо-імпульсний метод, автоматизовані виміри, пружність, монокристали, зсув фази*

*Разработана и реализована автоматизированная экспериментальная установка для измерения скоростей распространения и затухания упругих волн в монокристаллах. Прецизионные измерения изменения скоростей распространения ультразвуковых волн в кристаллах реализуются сдвигом фазы заполняющих высокочастотных колебаний между зондирующим и отраженным импульсами*

*Приведены примеры реализации распространения упругих волн в монокристаллах GdSb, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, GaSe*

*Ключевые слова: эхо-импульсный метод, автоматизированные измерения, упругость, монокристаллы, сдвиг фазы*

## 1. Вступ

Генерація пружних хвиль в шаруватих кристалах імпульсним ультразвуковим (УЗ) методом потребує відносно високих рівнів робочих напруг випромінювача (порядку 150÷300 В) [1].

Однією із проблем ультразвукового збудження механічних коливань в зразках є необхідність забезпечення високої крутизни фронтів зондувального імпульсу та зменшення залишкового «дзвону» перетворювача. Використання імпульсів збудження високої потужності вимагає застосування складних схемотехнічних рішень. У випадку проведення ультразвукових вимірювань при низьких температурах, кількість тепла, що виділяється на зразку в процесі вимірювань повинна бути мінімальною. В ехо-імпульсному методі середня теплова потужність визначається виразом  $P=Q_1F$  [2], де  $Q_1$  - кількість тепла, що виділяється за один імпульс збудження, а  $F$  - частота повторення імпульсів. При цифровому накопиченні сигналу зменшення серед-

ньої теплової потужності  $P$ , шляхом зниження  $F$ , є недоцільним, оскільки покращення відношення сигнал/шум досягається збільшенням числа вимірів за один і той же проміжок часу. У даному випадку найбільш доцільним шляхом зниження розсіювальної потужності є забезпечення зменшення потужності імпульсу.

Зменшення рівня шумів на вході підсилювача дає можливість більше ніж на порядок понизити рівень збудження ультразвуку. Тобто, послаблення потужності ультразвукових імпульсів зондування значно компенсується зменшенням рівня шумів на вході підсилювача, що досягається застосуванням сучасної електронної бази та техніки цифрового оброблення сигналів.

## 2. Функціональна схема

Функціональна схема розробленої нами установки, що приведена на рис. 1, базується на застосуванні

класичного методу поширення УЗ хвиль в твердому тілі - генерація ультразвукових імпульсів та їх реєстрація після проходження при багатократному відбиванні у досліджуваному кристалі [3]. При цьому використовується однокристальна схема, в якій перетворювач ультразвуку в радіоімпульси - (п'єзокристал) одночасно використовується як для випромінювання збуджуючих імпульсів, так і для приймання ехо-сигналів у кристалі. Максимальна ефективна напруга збудження на перетворювачі становить не більше 1 В.

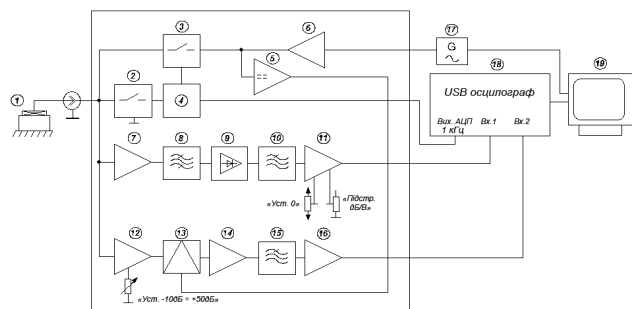


Рис. 1. Структурна схема установки для дослідження ультразвукових імпульсів у кристалах

Запропонована схема складається з трьох функціональних вузлів, а саме: передавач високочастотних імпульсів (блоки 2-6) та двох каналів приймання відбитих сигналів (блоки 7-11 і 12-16); периферійного пристрою (синтезатор частоти G (17), пристрій реєстрації - цифровий осцилограф (18)); персонального комп'ютера (19).

### 3. Передавач УЗ імпульсів

Передавач УЗ імпульсів включає в себе: вихідний підсилювач (6); електронні ключі (2) і (3); формувач імпульсів стробування (4), компаратор високочастотної напруги (5).

Вихідний підсилювач (6) виконаний на мікросхемі AD8056, що є здвоєним операційним підсилювачем з підвищеною навантажувальною здатністю і максимальним підсиленням за напругою  $K_U = 10$  дБ. Підсилювач навантажений на п'єзоелектричний випромінювач-давач кристалу ніобату літію (1), виконаного із стандартною орієнтацією зрізу «x +36о», що відповідає поздовжній звуковій хвилі. Вихідна напруга високої частоти на п'єзовипромінювачеві в імпульсі становить +10 дБВ.

Частота основного резонансу для застосованого давача-перетворювача становить 9,75 МГц. Давач приклеюється до площини досліджуваного кристала. Заземлення кристалічного зразка забезпечує ослаблення наведень та поліпшує співвідношення сигнал/шум, що суттєво для зразків електропровідних матеріалів.

Випромінювач-давач з'єднаний з приймальною схемою коротким ( $\leq 10$  см) коаксіальним кабелем. Високочастотне заповнення імпульсів забезпечується синтезатором частоти (17), що генерує частоти в діапазоні  $4,5 \div 80$  МГц. Встановлення частоти синтезатора з кроком  $\pm 1$  Гц здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Формування

радіочастотних імпульсів зондування здійснюється за допомогою швидкодіючих електронних ключів (2) і (3). Для керування ключами застосовуються імпульси стробування, що надходять зі схеми (4). Частота повторення імпульсів зондування залежить від тривалості циклу загасання відбитих імпульсів, що може задаватися довільно. У даному випадку, встановлення частоти вихідних імпульсів здійснюється через інтерфейс цифрового осцилографа BORDO 421 (18). Роль електронних ключів (2), (3) полягає не тільки у формуванні пакетів високочастотних коливань ультразвукового імпульсу збудження, але і в послабленні перехідного процесу після відключення імпульсу, т.з. залишкового «дзвону» (рис. 2). Для швидкодіючих ключів використовували мікросхеми 74LVC1G66, що мають час перемикання 1,9 нс. Після завершення імпульсу зондування схема (3) шунтує п'єзовипромінювач на короткий час, пригнічує залишковий «дзвін». Час пригнічення перехідного процесу задається формувачем імпульсу стробування (4).

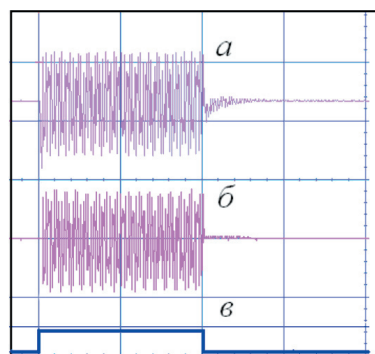


Рис. 2. Пригнічення «дзвону» радіочастотного імпульсу: а - пригнічений перехідний процес; б - залишковий «дзвін» після ультразвукового імпульсу збудження; в - стробуючий імпульс керування

Компаратор (5), що функціонально входить до схеми передавача, призначений для формування опорної напруги з несучої частоти ( $F_H$ ), на яку налаштований випромінювач (1). Опорна напруга прямокутної форми використовується для роботи синхронного детектора, що функціонально належить до блоку приймача (13).

### 4. Приймач УЗ імпульсів

У приймальну частину вимірювального комплексу входять два канали оброблення сигналу - блоки 7-11 і 12-16. Виходи підсилювачів (11) і (16) під'єднані до реєструючого осцилографу Bordo 421 (Вхід 1, Вхід 2). Приймальний канал (блоки 7-11) зорієнтований на вимірювання загасання звуку в кристалі. При вимірюванні загасання важливо знати відносний рівень напруги відбитих імпульсів у максимально можливому діапазоні підсилення, оскільки це суттєво впливає на точність отриманого результату. Тому з метою розширення динамічного діапазону підсилення і лінеаризації візуальної графічної інформації на дисплеї монітора в каналі застосований логарифмічний підсилювач-детектор (9). Логарифмічний детектор виконаний на спеціалізованій мікросхемі AD8310 [4] з діапазоном

робочих частот 0 – 440 МГц. Інтервал вхідних напруг високої частоти складає від -91дБВ до +4 дБВ (95дБ). На рис. 3 приведена серія ультразвукових імпульсів в металевій міді (2) у порівнянні з недемульованими ехо-імпульсами (1).

Для узгодження вхідного і вихідного опорів каналу застосовані узгоджувальний (7) і масштабний (11) підсилювачі. Встановлення рівня «0» і корекція візуального відображення діапазону (Db / V) здійснюється відповідно регулюванням «Уст.0» і «Підстр. Db/V». З метою послаблення наведень і шумів застосовано смуговий (5-50 МГц) (8) та низькочастотний (5 МГц) (10) фільтри.

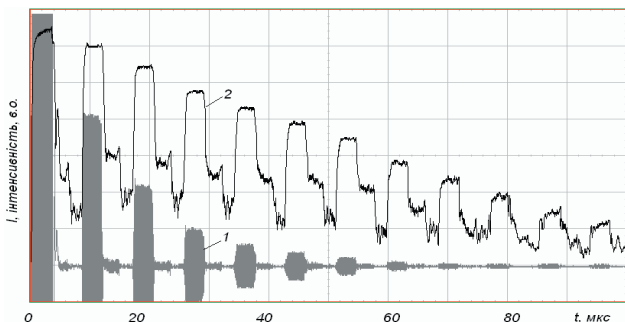


Рис. 3. Серія відбитих (1) та приведених в логарифмічному масштабі (2) імпульсів ультразвуку в зразку металевій міді

Другий канал оброблення відбитих сигналів (12-16) розрахований на вимірювання швидкості поширення звуку в досліджуваному зразку. Наявність синхронного детектора (13) в каналі дозволяє підвищити точність визначення відстані, пройденій ультразвуковим імпульсом. Це реалізується за рахунок зсуву фази високочастотних коливань заповнення між зондувальним та відбитим імпульсами. При цьому фаза n - го відбитого імпульсу запізнюється щодо фази опорного сигналу на величину  $\varphi_n = 2\pi f t_n$  [5]. Тут  $t_n$  - час проходження ультразвуку через кристал, враховуючи склейку кристалічного зразка з випромінювачем, f - частота заповнення імпульсу високочастотним сигналом. Якщо знехтувати втратами на акустичну розв'язку та зсувом фаз, що обумовлені склеюванням та проходженням сигналу в електронних схемах, то достатньо знайти  $\varphi_n$  або безпосередньо визначити  $t_n$  при відомому номері відбитого сигналу n [6]. Відлік названих параметрів коливань f здійснюється візуально за допомогою цифрового осцилографа з попередньо відкаліброваною часовою шкалою. Синхронний детектор зібраний за симетричною схемою на подвійному балансовому змішувачі SA612 [7].

Забезпечення роботи синхронного детектора в лінійній області підсилення здійснюють за допомогою регульованого підсилювача з діапазоном регулювання -10 дБ + +50 дБ (12). Для придушення складових детектованого сигналу частотою вище 5 МГц використовується фільтр (15), що є аналогічним фільтру (10). Узгодження вхідних опорів між схемами здійснюється за допомогою узгоджувального (14) і вихідного (16) підсилювачів. Індикація даних вимірювань для двох роздільних приймальних каналів виконується на дисплеї персонального комп'ютера (рис. 4) з використанням програмного забезпечення цифрового

осцилографа Bordo 421 [8], що забезпечує збереження та подальше оброблення отриманих результатів.

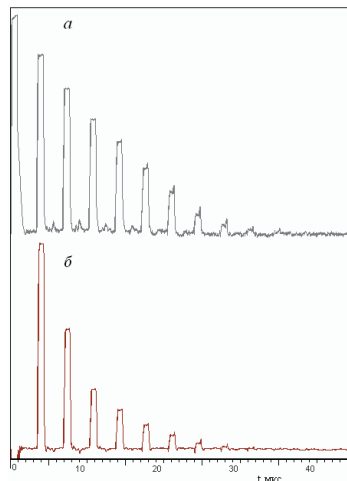


Рис. 4. Зіставлення двох сигналів, продетектованих одночасно логарифмічним (а) і синхронним детекторами (б) в металевій міді з частотою заповнення збуджуваного імпульсу 9,75 МГц

### 5. Результати спостереження УЗ імпульсів у CdSb, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, GaSe

Для зручності керування процесом експериментального дослідження параметрів ультразвукових сигналів необхідна інформація виводиться на дисплей персонального комп'ютера. На рис. 5 зображено інтерфейс програм цифрового осцилографа Bordo 421 та синтезатора частот, що забезпечує фіксацію рівнів сигналів та їх часових масштабів.

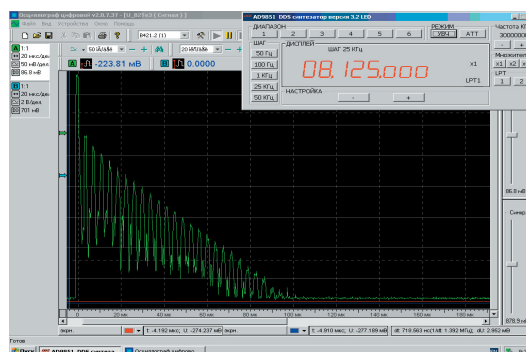


Рис. 5. Вигляд робочої панелі ультразвукового вимірювального комплексу з інтерфейсами програм цифрового осцилографа Bordo 421 і синтезатора частот

На екрані крім зображення відбитих ультразвукових імпульсів відображається значення встановленої частоти синтезатора. Індикація шкали синтезатора вмикається в моменти встановлення резонансної частоти п'єзоперетворювача або налаштування передавача на одну з його гармонік.

На рис. 6-9 приведені експериментальні результати дослідження проходження ультразвуку у деяких напівпровідникових матеріалах.

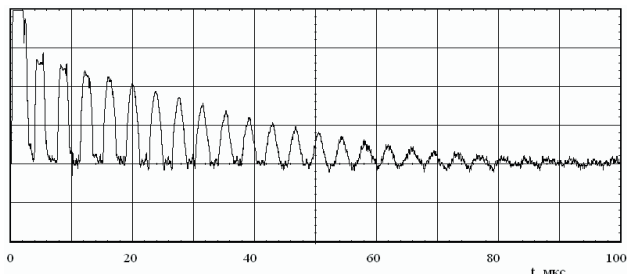


Рис. 6. Серія відбитих ультразвукових імпульсів в монокристалі CdSb. Результат представлений в логарифмічному масштабі. Максимальна амплітуда високочастотної напруги імпульсів на випромінювачі 1В, частота заповнення 29,6 МГц, що відповідає 3-ї гармоніці п'єзовипромінювача

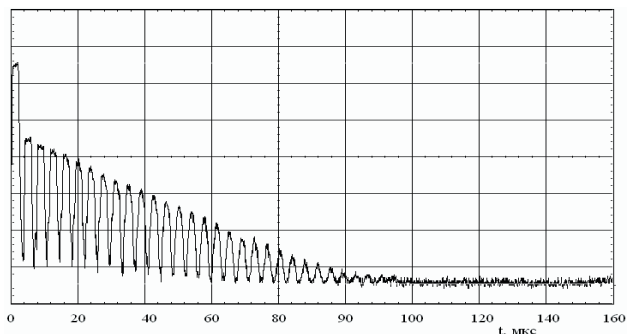


Рис. 7. Серія відбитих імпульсів в  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  на частоті випромінювача – 8,192 МГц. Спрямованість випромінювання вздовж атомних шарів

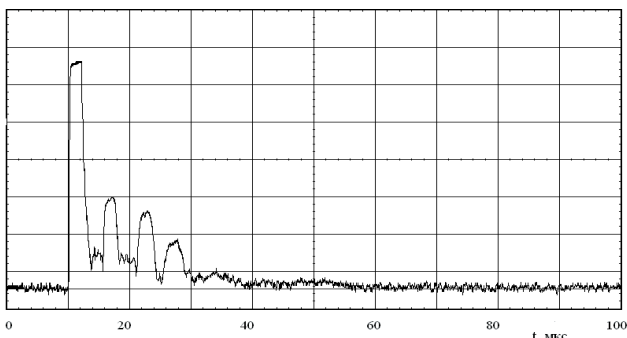


Рис. 8. Серія відбитих імпульсів в  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  на частоті випромінювача 8,192 МГц. Спрямованість випромінювання нормально до атомних шарів

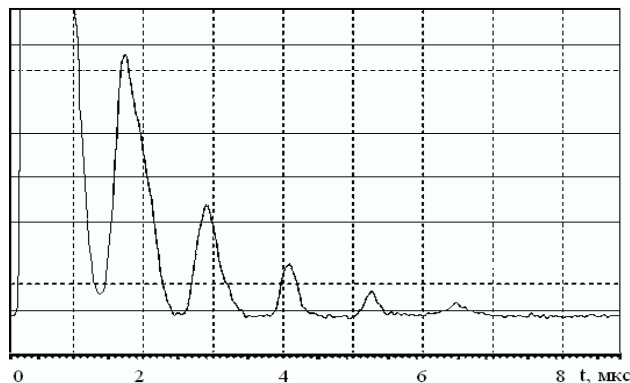


Рис. 9. Серія відбитих сигналів в шаруватій сполуці GaSe. УЗ хвиля розповсюджувалась в напрямку [001]

## 6. Висновки

Результати експериментального дослідження напівпровідникових кристалів актуального застосування показали добре узгодження з відомими в науковій літературі. Використання цифрового осцилографа «Bordo-421» та його програмного забезпечення дало значні переваги експерименту за рахунок часткової автоматизації вимірювань. Можливість усереднення широкосмугових сигналів - серії відбитих імпульсів забезпечила збільшення чутливості установки більш ніж на порядок. При несприятливих умовах прийому ультразвукових імпульсів, наприклад, в  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (рис. 8), де спостерігається сильне загасання, є можливість збільшити рівень вихідної напруги на перетворювачі до 50 В. Сильне затухання спостерігається і в GaSe (рис. 9), де випромінювання направлено вздовж оптичної вісі С, тобто перпендикулярно до атомної поверхні шаруватої структури []. Тут для підвищення інтенсивності ехо-сигналу вихідну напругу передавача було збільшено до 10 В.

## Література

1. Криштал, М. А. Электронная аппаратура ультразвуковых установок для исследования свойств твердого тела [Текст] / М. А. Криштал, Б. Е. Пестов, В. В. Давыдов, И. В. Троицкий – М.: Энергия, 1974. – 224 с.
2. Iwasa I., Koizumi H., Suzuki T. Automatic ultrasonic measuring system using phase-sensitive detection. Rev. Sci. Instrum., 1988, V.59, №2, pp. 356-361.
3. Труэлл, Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела [Текст] / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, В. Чик – М.: Мир, 1972. – 307 с.
4. Балазюк, В.Н. Застосування логарифмічного підсилювача в експериментах з акустичного загасання [Текст] / В.Н. Балазюк, М.Д. Раранський, А.П. Саміла, В.О. Хандожко // Матеріали 1-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», 13–15 жовтня 2011р. – Чернівці, – С. 59-61.
5. Toulouse J., Launay C. Automated system for relative sound velocity and ultrasonic attenuation measurements. Rev. Sci. Instrum., 1988, V.59, №3, pp. 492-495.

6. Турчин, П.П. Импульсные автоматизированные измерения скоростей упругих волн в кристаллах [Текст] / П.П.Турчинов, А.А. Парфенов, Н.А. Токарев, А.Е. Нестеров, А.Ю. Тарасова, К.С. Александров. Ползуновский вестник, Барнаул, № 3/1, 2011, С.143-147.
7. [www.stanford.edu/class/ee133/datasheets/SA612A.pdf](http://www.stanford.edu/class/ee133/datasheets/SA612A.pdf).
8. [www.cims.bsu.by/files/B-421.pdf](http://www.cims.bsu.by/files/B-421.pdf).

**Abstract**

*On the basis of the echo-pulse method an automated experimental device was designed for measuring the velocity of the propagation and attenuation of the elastic waves of small amplitude in single crystals in wide temperature ranges. The method of reducing the level of excitation of ultrasonic vibrations of voltage up to 1V with simultaneous increase of sensitivity of the receiving channel by reducing the residual circuit vibration was designed. The high-frequency filling of the pulses is provided by a frequency synthesizer, which generates the electric oscillations in the range 4,5-80 MHz. The main resonance frequency for a given transducer constitutes 9.75 MHz. The measurement of the attenuation of ultrasound in crystals is carried out by the logarithmic intensifier-detector, assembled on the microcircuit AD 8310, which retains the necessary characteristics in the range of operating frequencies 0-440 MHz. The precision measurement of the change of the propagation velocities of ultrasonic waves in crystals is realized by a phase shift of the filling high-frequency oscillations between the probe and reflected pulses.*

*The examples of the ultrasound propagation experiment of such semiconductor materials as CdSb, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, GaSe are given*

**Keywords:** *echo-pulse method, automated measurements, elasticity, single crystals, phase shift*

**В даній роботі запропоновано спосіб, який дозволяє на етапі вхідного та вихідного контролю за рівнем низькочастотного шуму, додатково проводити оцінку шумових характеристик біполярних транзисторів в області середніх частот**

**Ключові слова:** *біполярний транзистор, контроль, власні шуми*

**В данной работе предложен способ, позволяющий на этапе входного и выходного контроля по уровню низкочастотного шума, дополнительно проводить оценку шумовых характеристик биполярных транзисторов в области средних частот**

**Ключевые слова:** *биполярный транзистор, контроль, собственные шумы*

УДК 621.315.592

# ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В ОБЛАСТІ СЕРЕДНІХ ЧАСТОТ

**Д.В. Михалевський**  
Старший викладач, кандидат технічних наук  
Кафедра телекомунікаційних систем і телебачення  
Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021  
Контактний тел.: 096-303-06-02  
E-mail: adotq@ukr.net

## 1. Вступ

При проектуванні та виготовленні нових виробів електронної техніки (ВЕТ), а також пристроїв на їх базі потрібно враховувати різні фактори: шумові параметри, електричні характеристики, вплив паразитних зв'язків, температурні характеристики і т. ін. Визначення шумових характеристик може надати певну інформацію про стан того чи іншого електронного виробу. Наприклад, ВЕТ, що використовуються у високо-

якісній приймально-передавальній апаратурі повинні мати якомога нижчий коефіцієнт власних шумів.

## 2. Аналіз останніх досліджень

В роботах [1,2] проводились дослідження інформативного параметра виробів електронної техніки (ВЕТ) для операцій вхідного та вихідного контролю за рівнем низькочастотного шуму, для біполярних структур.