

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ЛІТВІНОВ КОСТЯНТИН АНАТОЛІЙОВИЧ**

**УДК 681.128.82**



**УЛЬТРАЗВУКОВИЙ РІВНЕМІР РІДИНИ З ОДНОРАЗОВИМ  
ПОШИРЕННЯМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ІМПУЛЬСУ В ГАЗОВОМУ  
СЕРЕДОВИЩІ**

Спеціальність: 05.11.13 – Прилади та методи контролю та  
визначення складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Східноукраїнському національному університеті ім. Володимира Даля Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Стенцель Йосип Іванович**,  
Східноукраїнський національний університет  
ім. Володимира Даля,  
завідувач кафедри  
комп'ютерно-інтегрованих систем управління.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Сахацький Віталій Дмитрович**,  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, м. Харків,  
професор кафедри метрології та безпеки  
життєдіяльності;

доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник

**Лопатін Валерій Володимирович**,  
інститут геотехнічної механіки  
ім. М. С. Полякова Національної  
академії наук України, м. Дніпро,  
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться « 19 » квітня 2018 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий « 19 » березня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Костюков І. О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблема створення досконалих методів і засобів контролю технологічних параметрів, котрі володіють високою точністю, чутливістю і вірогідністю є важливою при вирішенні задач поточного контролю, сигналізації, а також захисту обладнання при критичних їх значеннях. До таких параметрів відноситься рівень рідини, наприклад, у збірниках готової продукції, промислових стоків, а також в ємностях закритих і відкритих складських майданчиків хімічної, нафтопереробної, енергетичної та інших галузей народного господарства. Ефективність роботи кожної ємності залежить як від максимального її завантаження рідиною так і вивантаження. Основною вимірювальною величиною в таких ємностях є її рівень. Для поточного та критичного контролю рівня рідини в ємностях використовуються різні методи, серед яких особливе місце займають ультразвукові, так як вони характеризуються достатньо високою точністю, швидкодією, простотою та можливістю вимірювати рівень у широкому діапазоні його зміни. У розвиток ультразвукових методів та засобів контролю значний вклад нести такі вчені як Р. І. Мооре, К-Е. Фройса, В. К. Жданкін, О. І. Бабіков, А. Б., Жмильов, О. Е. Колесніков, А. В. Томсон, В. Б. Большаков, Д. П. Лагода, Й. І. Стенцель.

Незважаючи на зазначені переваги методу, сучасні ультразвукові рівнеміри мають низку недоліків, до яких можна віднести достатньо малий діапазон вимірювання, велику зону нечутливості, значну зведену похибку вимірювання, та багато інших, як, наприклад, наявність механічного реперного пристрою. Достовірність контролю таких ультразвукових рівнемірів не перевищує 0,95. Тому задача розробки ультразвукових рівнемірів з малою зоною нечутливості, широким діапазоном і точністю вимірювання та вірогідністю контролю є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих систем управління СНУ ім. В. Даля у рамках завдань фундаментальної держбюджетної НДР МОН України «Розробка теоретичних основ явищ переносу на основі реологічних переходів і методу нульового градієнта» (ДР № 0109U000071) та госпдоговірних НДР: «Теоретичні та експериментальні дослідження ультразвукового рівнеміра з адаптивним випромінюючим сигналом» (ДР № 0107U001415), «Теоретичні та експериментальні дослідження ультразвукового рівнеміра з компенсуючим вхідним сигналом» (ДР № 0108U001818), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – розробка ультразвукового рівнеміра рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, що дозволяє збільшити точність та розширити діапазон вимірювання за рахунок зменшення часу поширення ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.

Для досягнення мети в роботі поставлені наступні задачі:

1° розробити ультразвуковий метод та рівнемір рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, який дозволить значно збільшити діапазон вимірювання, зменшити похибки, а також зменшити зону нечутливості, що дозволить підвищити ефективність використання ємності;

2° розробити фізичні та математичні моделі перетворень в ультразвуковому рівнемірі на основі теорії реологічних переходів і методу нульового градієнта та отримати аналітичну математичну модель запропонованого рівнеміра;

3° виконати теоретичні та експериментальні дослідження запропонованого ультразвукового рівнеміра з метою визначення його метрологічних характеристик;

4° розробити реперний алгоритм, який дозволить замінити механічний реперний пристрій і зменшити похибки вимірювання, та матричний метод дослідження похибок вимірювання, котрий дозволить оцінювати одночасну дію впливових факторів на результат вимірювання.

*Об'єкт дослідження* - процес взаємодії імпульсу ультразвукового випромінювання з рівнем рідини, яка перебуває в ємності.

*Предмет дослідження* – ультразвуковий рівнемір рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.

**Методи дослідження** базуються на використанні: теорії вимірювального перетворення неелектричних величин і теорії реологічного перенесення імпульсу маси, енергії та кількості руху для розробки математичних моделей ультразвукового вимірювального перетворювача; методів математичного та комп'ютерного моделювання при дослідженні ультразвукового рівнеміра рідини; основи теорії ймовірності та випадкових процесів для дослідження вірогідності контролю рівня; методів математичної статистики при обробці результатів вимірювань під час дослідження повторюваності результату; основ теорії вимірювань похибок для оцінювання метрологічних характеристик запропонованого рівнеміра.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

- вперше розроблено метод і рівнемір рідини, в якому ультразвуковий імпульс проходить товщину газового середовища один раз, за рахунок чого діапазон вимірювання збільшується в два рази та зменшуються додаткові похибки, які зумовлені зміною параметрів газу, до двох разів;

- вперше розроблено реперний алгоритм, в якому реперним сигналом є коефіцієнт співвідношення часу прямого та прямого і зворотного поширення ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, що дозволяє зменшити зону нечутливості до 3-х разів (з 0,6 м до 0,2 м) і підвищити точність вимірювання в 1,66 рази (з 0,25 до 0,15);

- удосконалено матричний метод для дослідження додаткових похибок вимірювання, який дозволяє оцінити одночасний вплив внутрішніх і зовнішніх факторів на роботу рівнеміра, що зменшує похибки вимірювання при їх розподіленні за діапазоном вимірювання.

- удосконалено математичні моделі процесів перенесення ультразвукового імпульсу, які враховують зміщення фази переднього фронту ультразвукового імпульсу, що дозволило установити додаткову похибку вимірювання і підвищити точність рівнеміра на 5 відсотків.

**Практичне значення отриманих результатів** для приладобудування полягає в тому, що:

- розроблено та впроваджено на науково-виробничому підприємстві «Мікротерм» (акт впровадження від 16. 03. 2017р.) макет ультразвукового рівнеміра рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі (захищений патентом України на винахід № 110220), алгоритмічні та програмні засоби, який стан основою для розробки технічного завдання ультразвукового рівнеміра, який дозволяє проводити вимірювання рівня рідин до 15 метрів, зменшити зону нечутливості до 0,2 м, зведену похибку вимірювання до 0,15 % і збільшити вірогідність контролю до 0,987 у ємностях хімічних, нафтопереробних та інших підприємств;

- розроблено та впроваджено реперний алгоритм (захищений патентом України на корисну модель № 103916), який дозволяє замінити механічні реперні пристрої в ультразвукових рівнемірах на реперний алгоритм і підвищити їх точність вимірювання;

- випробувана та впроваджена методика градуювання ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, що дозволяє виконувати градуювання рівнеміра в діапазоні від 0,2 до 15 метрів з точністю 0,5 мм;

- випробувані та впроваджені алгоритми обробки вимірювальної інформації та програмне забезпечення ультразвукового рівнеміра рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, що дозволило розраховувати та вносити поправки до результату вимірювання;

- розроблені та впроваджені рекомендації щодо проектування ультразвукових рівнемірів рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, які включають вибір ультразвукових випромінювачів і приймачів, реперного алгоритму та електричної вимірювальної схеми, що дозволило уніфікувати та зменшити затрати на процес їх виготовлення;

- результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля у вигляді віртуального комп'ютерного стенду по курсу «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади» для студентів напряму підготовки 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (акт впровадження від 17. 03. 2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно, що підтверджується публікаціями з ключових аспектів задачі. У роботах, які опубліковані у співавторстві, дисертанту належить: аналіз сучасних ультразвукових методів і засобів контролю рівня рідин; визначення та дослідження фізичних процесів

електромеханічних ультразвукових перетворювачів та розробка їх математичних моделей; постановка задачі та розробка математичних моделей ультразвукового рівнеміра рідин з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі; математичні моделі та експериментальні дослідження впливу параметрів п'єзокерамічного перетворювача на роботу ультразвукового рівнеміра рідин; теоретичні та експериментальні дослідження процесів перетворення в ультразвуковому рівнемірі з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі; постановка задачі математичного моделювання ультразвукового рівнеміра рідин з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі і використання теорії реологічних перетворень для описання нелінійних процесів перенесення електричної та ультразвукової енергії; математичне описання похибок вимірювання рівня рідини ультразвуковим рівнеміром рідин з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі та їх дослідження, яке базується на методі інтегрального функціоналу та інтегральної матриці; структура та алгоритм роботи ультразвукового рівнеміра рідин з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та окремі результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Технологія-2011 - 2016». Северодонецьк, 2011 – 2016 р.р.; «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». Вінниця, 2011; «The development of scientific researches' 2012»: The materials of eighth international scientific and practical conference, Poltava, 2012; «Technical Using of Measurement-2015». Славське, 2015; Summer InfoCom Advanced Solutions. Kyiv, 2016; «Електроніка та інформаційні технології» (ЕЛІТ-2016). Львів, Чинадієво, 2016.

Результати роботи доповідалися на щорічних наукових семінарах кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

**Публікації.** Основні наукові та практичні результати досліджень опубліковані в 31 роботах, серед яких: 18 статей у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у закордонному виданні; 9 статей входять до міжнародних наукометричних баз: SCOPUS - 3 статті, – INDEX COPERNICUS - 6 статей, 4 статті опубліковано одноосібно; 10 – у матеріалах конференцій; 3 патенти України, з них 2 патенти на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації 2-ма мовами, вступу, 4-х розділів, висновку, списку використаної джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 253 сторінки, з них 86 рисунків та 7 таблиць за текстом; основний зміст викладено на 151 сторінках друкованого тексту, список використаних джерел з 160 найменувань на 19 сторінках, 7 додатків на 57 сторінках.



де  $\varphi(\mathbf{r}, \theta)$  - потенціал перенесення електричного збуджуючого імпульсу (ЕЗІ);  $\bar{r}$  - вектор направленості руху потенціалу;  $\theta$  - час перенесення;  $\bar{v}$  - вектор швидкості перенесення електричної енергії;  $\bar{q}$  - вектор потоку перенесення;  $\gamma_M, \gamma_E$  - швидкість стоку потенціалу перенесення механічної та електричної енергії відповідно.

Виконано аналіз фізичних процесів, котрі протікають в ПКЕ при його збудженні напругою  $U$ . Згідно з теорією незворотних реологічних переходів (НРП) в ПКЕ мають місце наступні послідовні перетворення: енергія ЕЗІ перетворюється в напруженість електричного поля; остання збуджує електродинамічне зусилля, котре приводить до механічного руху ПКЕ, переміщаючи його на деяку відстань  $x$ ; вільний механічний рух ПКЕ, який жорстко закріплений за периметром до захисної металевої мембрани ультразвукового випромінювача (УЗВ), створює УЗІ, котрий направляє в газове середовище. Після проходження товщини газу УЗІ за рахунок звукового зусилля діє на мембрану приймача, коливання котрої приводить до руху ПКЕ. У результаті чого в ПКЕ створюється електрорушійна сила (ЕРС) з такою ж ультразвуковою частотою. Вихідна напруга ультразвукового приймача (УЗП) порівнюється з опорною напругою і при їх рівності визначається час поширення УЗІ у газовому середовищі. Якщо перенесення потенціалу відбувається в деякому напрямку  $x$ , то згідно з законом зберігання енергії, маси чи кількості руху маємо

$$\frac{\partial \varphi_i(\mathbf{r}, \theta)}{\partial \theta} + D_i \frac{\partial^2 \varphi_i(\mathbf{r}, \theta)}{\partial x^2} = k_i \left[ \tau_{2i}^2 \frac{d^3 \beta_i(\mathbf{r}, t)}{dt^3} + \tau_{1i} \frac{d^2 \beta_i(\mathbf{r}, t)}{dt^2} + \frac{d\beta_i(\mathbf{r}, t)}{dt} \right], \quad (1)$$

де  $\varphi_i(\mathbf{r}, \theta)$  - вхідна величина  $i$ -го перетворення, яка поступає в зону перетворення у напрямку  $x$  за час  $\theta$ ;  $\beta_i(\mathbf{r}, t)$  - вихідна величина, яка є результатом перетворення вхідної величини і накопичується в часі  $t$ ;  $\tau_{1i}, \tau_{2i}$  - сталі часу стоку результату перетворення;  $k_i = \varphi_0/\beta_0$  - коефіцієнт перетворення.

Інтегральна імпульсна дельта-функція Дірака, яка відповідає рівнянню (1), показана на рис. 2. Кожний перехід описується нелінійним диференціальним рівнянням, для розв'язку якого використано метод нульового градієнта, що дозволило отримати математичну модель УЗР у наступній аналітичній формі

$$E_{\Pi}(\mathbf{r}, t) = K_0 \frac{UL_B}{H} \left\{ \exp(-\alpha_{\Pi} t) \cos(\omega_{\Pi} t + \varphi_{\Sigma}) \right\} \exp \left[ -k_z \frac{x_0 L_B}{2\sqrt{D_B \zeta} H} \right] * \left[ -\exp(-t_{\Gamma}/\varepsilon_{\lambda}) \left( H - L_B \right) \sqrt{k M_C R T_C P_A} \right]$$

де  $E_{\Pi}(\mathbf{r}, t)$  - ЕРС на виході УЗП;  $K_0$  - коефіцієнт перетворення;  $U$  - напруга ЕЗІ;  $L_B$  - рівень рідини в ємності;  $H$  - висота ємності;  $\alpha_{\Pi}$  - ступінь загасання УЗІ;  $\omega_{\Pi}$  - частота власних коливань УЗІ;  $\varphi_{\Sigma}$  - сумарний кут зміщення фази УЗІ;  $k_z$  - коефіцієнт;  $x_0$  - максимальне відхилення мембрани УЗВ;  $D_B$  - ефективний



коефіцієнт перенесення ЕЗІ за час  $\zeta$ ;  $t_T$  - час перенесення УЗІ через газове середовище;  $\varepsilon_\lambda$  - коефіцієнт поглинання газом ультразвукової енергії;  $M_C$  - молекулярний склад газу;  $k$  - стала;  $R$  - універсальна газова стала;  $T_C$  - температура газу;  $P_A$  - тиск газу.

Встановлено, що УЗІ при проходженні через газове середовище, деформується, у результаті чого змінюється початкова фаза УЗІ, що приводить до появи додаткової похибки вимірювання. Дослідження показали, що статична характеристика запропонованого рівнеміра є достатньо близькою до лінійної. Відносне відхилення між теоретичною та експериментальною статичними характеристиками при нормальних умовах не перевищує 0,75% для діапазону вимірювання до 15 метрів, що дозволяє зробити висновок, що математична модель є адекватною (рис. 3). Нелінійність статичної характеристики не перевищує 2% (рис. 4).

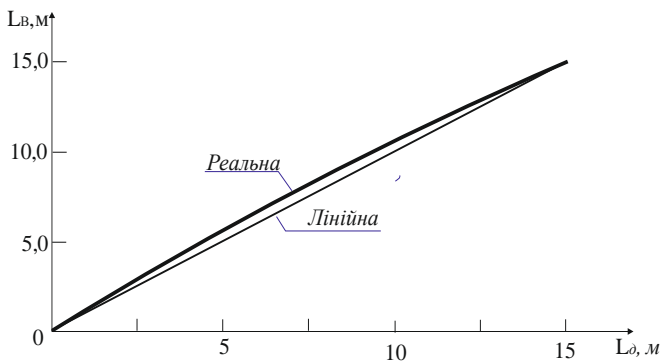


Рисунок 3 – Теоретична статична характеристика запропонованого рівнеміра:  $L_B, L_D$  - виміряне та дійсне значення рівня рідини

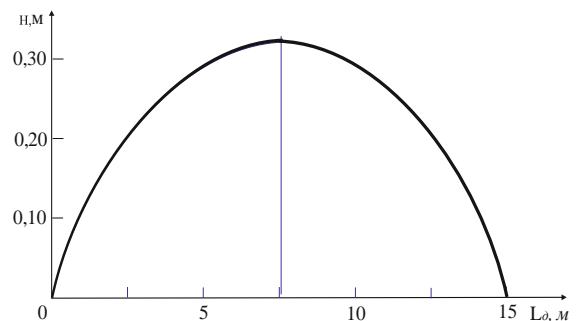


Рисунок 4 – Графік нелінійності статичної характеристики

**Третій розділ присвячений** розробці ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі, наведені способи отримання статичних характеристик та його метрологічний аналіз. Структурна схема запропонованого рівнеміра наведена на рис 5. На рис. 5 показано: БОВІ - блок обробки вимірювальної інформації; БУ – блок управління; УЗВ, УЗП – ультразвуковий випромінювач і приймач; УЗПП – ультразвуковий прийомо-передавач; 1, 6 – мікроконтролери БОВІ та БУ відповідно; 2, 5 - блоки перетворення сигналу; 3 - блок пам'яті; 4 - блок індикації; 7 - регульоване джерело ЕЗІ; 8 - джерело опорної напруги; 9 – компаратор; 10 - блок визначення амплітуди сигналу; 11 – підсилювач. Розглядається принцип роботи реперного алгоритму, суть роботи якого полягає в тому, що відношення часу  $t_1$  прямого і часу  $t_2$  зворотного ходу УЗІ має сталий коефіцієнт  $k_0 = 2$ , який служить реперним числом. Відношення  $t_2/t_1 = 1 + N_2/N_1 = 2 \pm \Delta N/N_1$ , де  $\Delta N = N_1 - N_2$ ,  $N_1, N_2$  - коефіцієнти перетворення для прямого та зворотного ходу УЗІ відповідно.

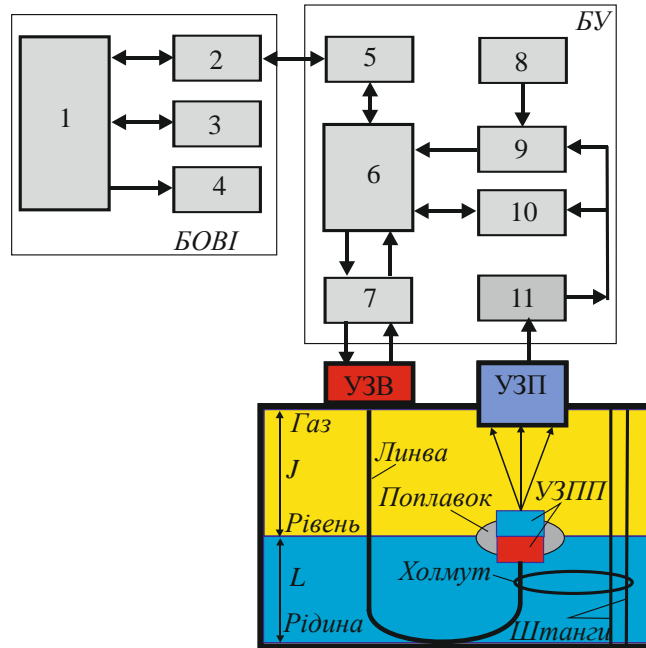


Рисунок 5 – Структурна схема ультразвукового рівнеміра рідини з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі

Оскільки час  $t_1$  і  $t_2$  завжди вимірюється електричною вимірювальною схемою (ЕВС), то їх різниця  $\Delta t = \Delta k_t t_1 = t_2 - 2t_1$ , де  $\Delta k_t$  - зміна коефіцієнтів перетворення, що викликає похибку вимірювання. Застосування реперного аналогу дозволяє: зменшити нечутливості рівнеміра до 0,2 метра та зменшити похибку вимірювання практично у 1,5 рази. Показано, що статичні характеристики запропонованого рівнеміра є нелінійними, а їх математична модель може бути записана у наступній формі:

$$L_B = K_0 \left[ k_H B_1 (H - L_0) + B_2 + B_3 (H - L_0) \right],$$

де  $L_B$  - розраховане значення рівня рідини;  $K_0$  - коефіцієнт перетворення;  $k_H$  - коефіцієнт нелінійності;  $L_0$  - дійсне значення рівня рідини в ємності;

$$B_1 = \frac{K_{B_1} v_{\Gamma} \varepsilon_{\lambda} M_C}{\sqrt{M_C P_A / RT_C}}, \quad B_2 = \ln \left( \frac{u_0 N_0 \ln \left( \frac{u_0 t_0}{\omega_0} + \varphi_i \right)}{K_{B_2} S_M \rho v_M \omega_0 x_0} \right), \quad B_3 = \frac{K_{B_3}}{2\sqrt{D_{y10} \mathcal{G}_1}} \quad \text{і}$$

$$N_0 = \exp \left( \frac{k_z l_x}{\sqrt{D_{yB} \zeta}} - 2\delta_{\beta} t \right) - \text{узагальнюючі змінні параметри; } K_{B_1}, K_{B_3} - \text{коефіцієнти;}$$

$v_{\Gamma}$  - швидкість УЗІ в газі;  $u_0$  - опорна напруга;  $S_M$  - площа мембрани;  $\rho$  - щільність матеріалу ПМЕ;  $v_M$  - швидкість руху мембрани;  $\omega_0$  - частота власних коливань мембрани;  $x_0$  - відхилення мембрани від свого початкового положення при дії на ПМЕ ЕЗІ;  $t_0$  - час коливання УЗІ;  $\varphi_i$  - зміщення фази УЗІ;  $D_{y10}$  - ефективний коефіцієнт деформації мембрани;  $\mathcal{G}_1$  - час перенесення УЗІ.

Коефіцієнт  $K_0$  є налагоджувальним параметром і установлюється при технологічній операції розгонки діапазону вимірювання за рахунок зміни

коефіцієнта підсилення вихідного підсилювача ЕВС і залишається сталим до чергового профілактичного обслуговування засобу. Оскільки статична характеристика запропонованого ультразвукового рівнеміра є нелінійною, то коефіцієнт нелінійності  $k_H$  залежить як від дійсного значення вимірювального рівня  $L_\theta$ , так і від впливових параметрів. Узагальнюючі змінні  $B_1$ ,  $B_2$  і  $B_3$  визначають вплив тої чи іншої частини вимірювальної схеми на процес перетворення. Так, наприклад, змінна  $B_1$  характеризує зміну фізичних параметрів газового середовища, змінна  $B_2$  - вимірювальну схему з ПКЕ, змінна  $B_3$  - процес перенесення енергії збуджуючого імпульсу в ПКЕ. Виконано дослідження впливу цих змінних на статичну характеристику та їх нелінійність. Результати моделювання статичної характеристики, зумовленої відхиленням змінної  $B_1$  від нормованого значення  $B_1 = 12,255$  (крива 1 -  $B_1 = 11,25$ ; крива 2 -  $B_1 = 11,75$ ; крива 3 -  $B_1 = 12,255$ ; крива 4 -  $B_1 = 12,75$  і крива 5 -  $B_1 = 13,25$ ), наведені на рис. 6, а; на рис. 6, б приведені результати моделювання статичної характеристики при відхиленні змінної  $B_2$  від нормованого значення  $B_2 = 0,0250$  (крива 1 -  $B_2 = 0,0200$ ; крива 2 -  $B_2 = 0,0225$ ; крива 3 -  $B_2 = 0,0250$ ; крива 4 -  $B_2 = 0,0275$  і крива 5 -  $B_2 = 0,0300$ ); на рис. 6, в результати моделювання статичної характеристики при відхиленні змінної  $B_3$  від нормованого значення  $B_3 = 0,000205$  (крива 1 -  $B_3 = 0,00055$ ; крива 2 -  $B_3 = 0,00105$ ; крива 3 -  $B_3 = 0,00155$ ; крива 4 -  $B_3 = 0,000205$  і крива 5 -  $B_3 = 0,000255$ ).

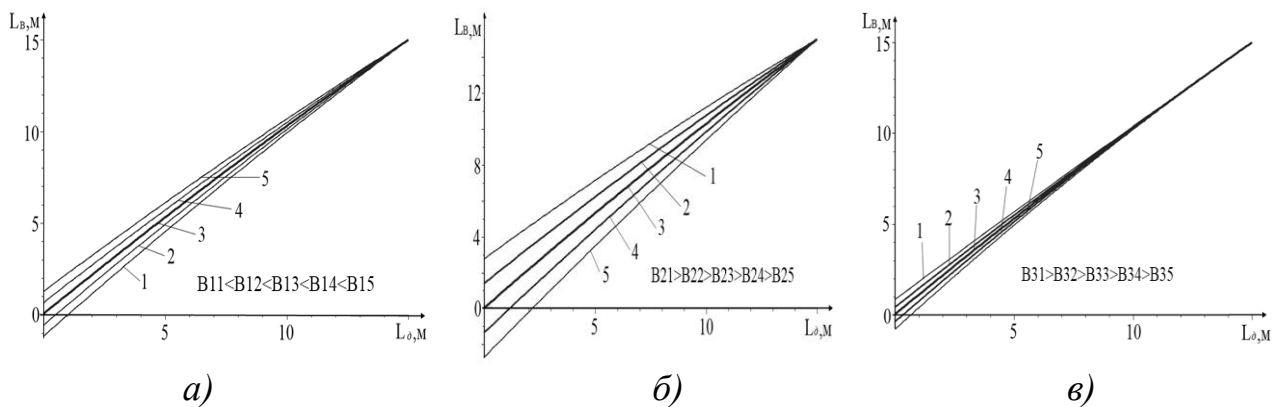


Рисунок 6 – Результати моделювання статичних характеристик при відхиленні змінних: а) -  $B_1$ ; б) -  $B_2$ ; в)  $B_3$

З рис. 6 видно, що найбільший вплив на статичну характеристику чинять змінні  $B_1$  і  $B_2$ . Мінімальне відхилення статичних характеристик має місце при максимальному рівні рідини в ємності, а максимальне - при мінімальному рівні. На рис. 7 показані результати моделювання не лінійності статичних характеристик, зумовлених відхиленням змінних  $B_1$ ,  $B_2$  і  $B_3$  від їх номінальних значень.

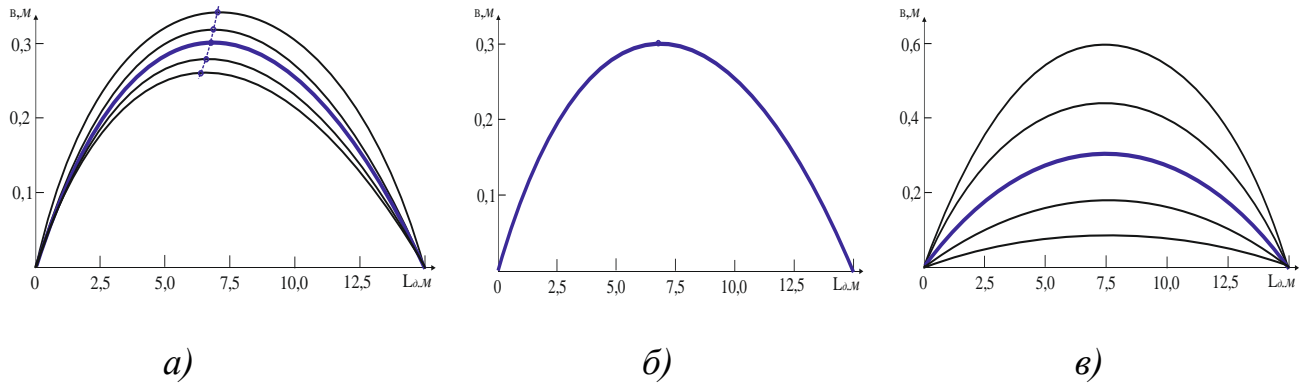


Рисунок 7 – Результати моделювання нелінійності статичних характеристик при відхиленні змінних: а) -  $B_1$ ; б) -  $B_2$ ; в) -  $B_3$

Оскільки змінна  $B_3$  характеризує процес перенесення ультразвукової енергії від ПКЕ випромінювача до ПКЕ приймача, то звідси впливає, що особливу увагу при розробці рівнеміра необхідно звертати на стабільність параметрів ПКЕ як випромінювача, так і приймача. Відхилення змінної  $B_2$  від її нормованого значення практично не приводить до зміщення нелінійності статичної характеристики (рис. 7, б), а максимум не лінійності статичної характеристики при відхиленні змінної  $B_1$  при збільшенні рівня дещо зміщується вліво. На рис. 8 наведені результати моделювання похибок, зумовлених одночасним відхиленням змінних  $B_1$  і  $B_2$ , а на рис. 9 – при одночасному відхиленні змінних  $B_1$  і  $B_3$ .

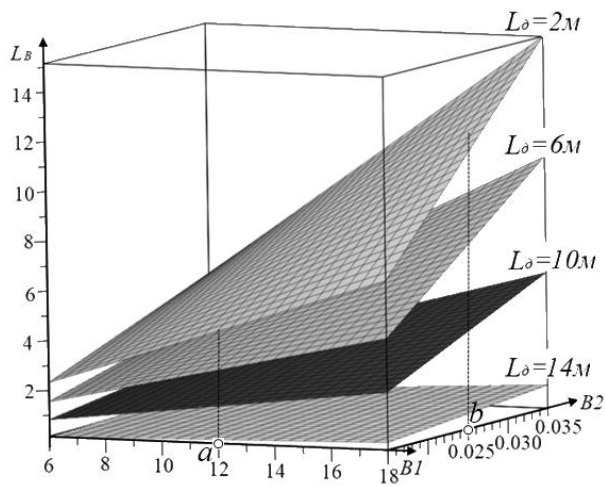


Рисунок 8 – Результати досліджень при одночасному відхиленні змінних  $B_1$  і  $B_2$  для різних значень рівня рідини

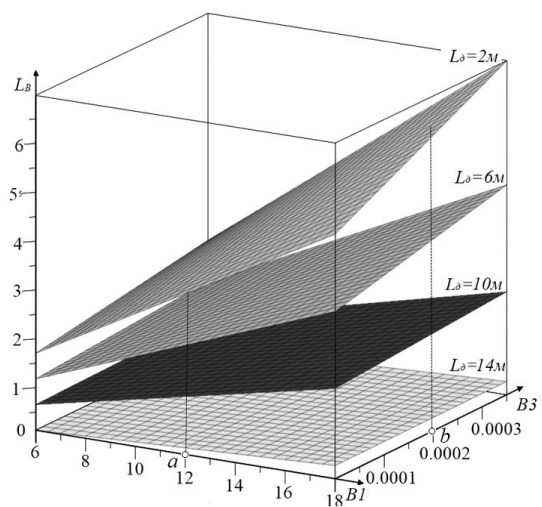


Рисунок 9 – Результати досліджень при одночасному відхиленні змінних  $B_1$  і  $B_3$  для різних значень рівня рідини

Дослідження похибок вимірювання виконано матричним методом, зроблено аналіз впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на статичну характеристику. Показано, що для оцінки часткових похибок рівнеміра доцільно використовувати матричний метод, суть якого полягає в тому, що діагональні складові матриці (рис. 10, а), яка описує рівнемір, є відповідними послідовно-паралельними

каналами з передавальними коефіцієнтами  $k_{i,j}$  як показано на рис. 10, б. Похибки вимірювання подано у вигляді суми мультиплікативної та нелінійних складових.

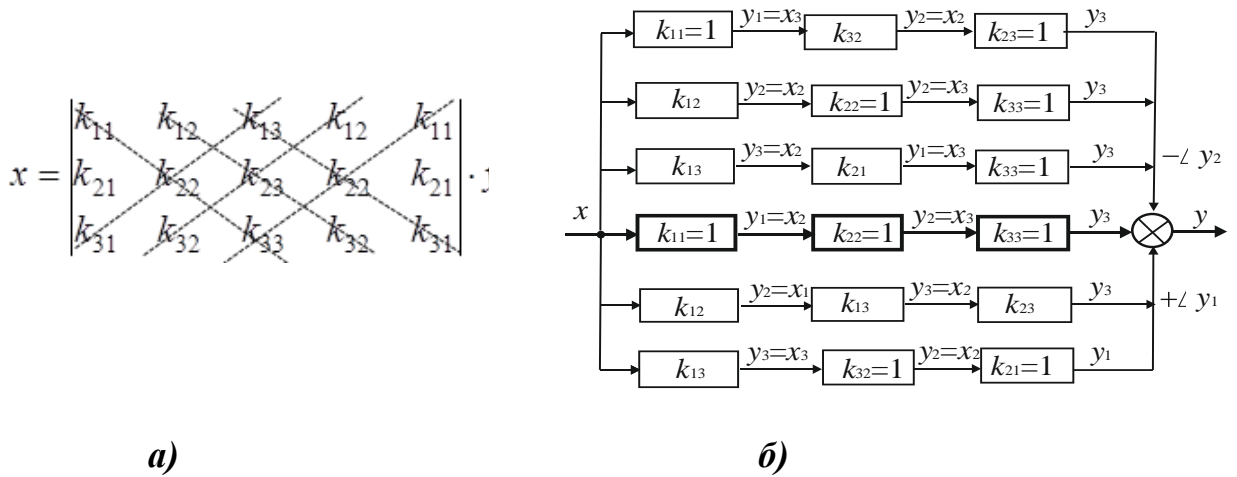


Рисунок 10 – Тримірна матриця (а) та структурна схема (б) рівнеміра у матричній формі:  $x$  – вхідна величина,  $y$  – вихідна величина

Отримані математичні моделі для похибок вимірювання, зумовлених зміною температури, тиску та молекулярного складу газу, напруги ЕЗІ, зміщенням фази УЗІ, опорної напруги, а також виконані їх дослідження. Результати моделювання температурних похибок для рівнів  $L_1 = 2\text{м}$ ,  $L_2 = 4\text{м}$ ,  $L_3 = 6\text{м}$ ,  $L_4 = 8\text{м}$  і  $L_5 = 10\text{м}$  приведені на рис. 11, а, а мультиплікативних та нелінійних складових цих похибок для тих же рівнів рідини в ємності - на рис. 11, б. З рис. 11, а видно, що загальна температурна похибка є розподіленою за діапазоном вимірювання, особливо значною вона є при зменшенні температури за рахунок того, що мультиплікативні та нелінійні складові є одного знаку (рис. 11, б).

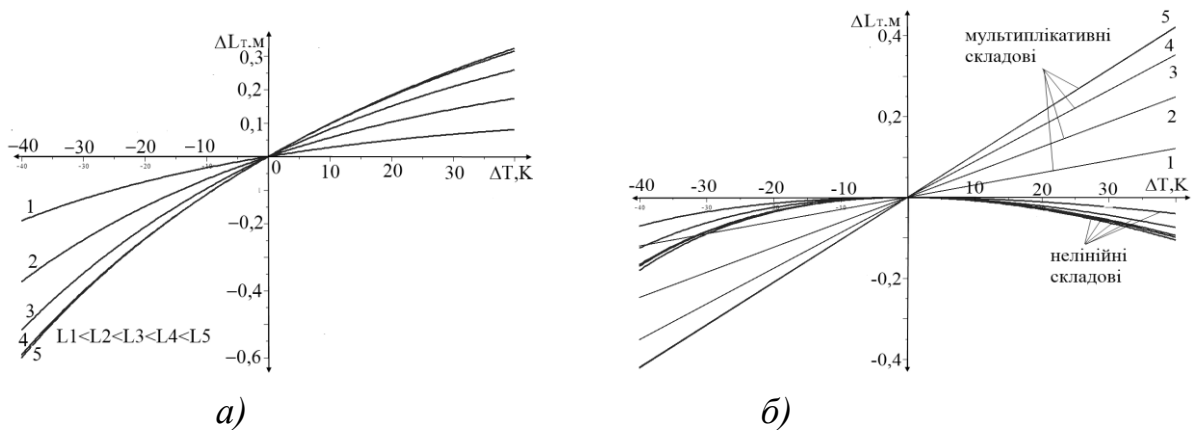


Рисунок 11 – Результати моделювання температурних похибок вимірювання

Результати моделювання похибки вимірювання, зумовленої зміною тиску газу показані на рис. 12, а а її мультиплікативних і нелінійних складових на рис 12, б. Результати моделювання загальної похибки вимірювання, зумовленої зміною молекулярного складу газу, показані на рис. 13, а, а мультиплікативних та нелінійних складових – на рис. 13, б.

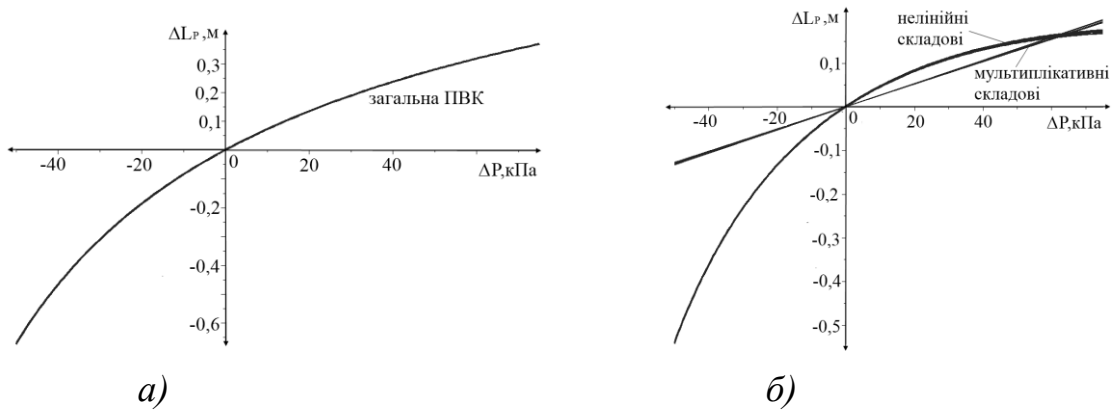


Рисунок 12 – Результати моделювання похибок, зумовлених зміною тиску газу

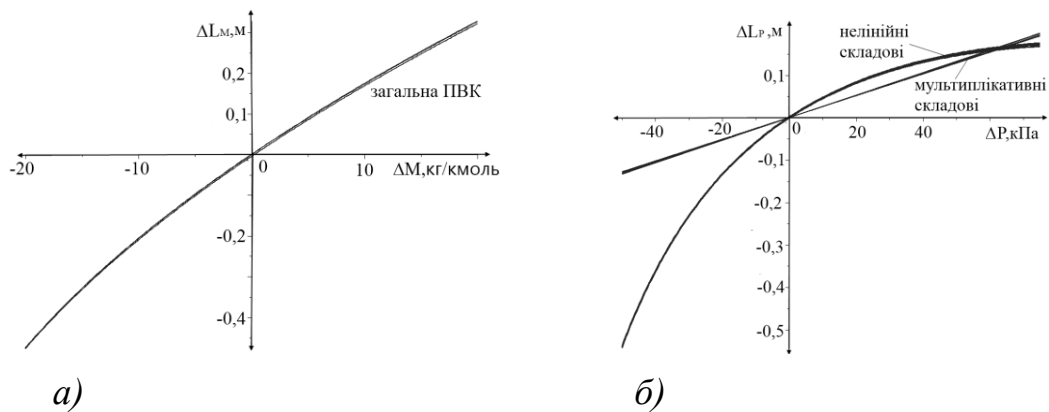


Рисунок 13 – Результати моделювання похибки вимірювання, зумовлених зміною молекулярного складу газу

У роботі наведені результати моделювання похибок вимірювання, які зумовлені зміною напруги електричного збуджуючого імпульсу, зміщенням фази УЗІ та опорної напруги.

У четвертому розділі приведена апаратна реалізація та результати моделювання ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі. Наведені рекомендації щодо інженерного проектування такого рівнеміра, а також алгоритми випробувань ПКЕ і налагодження. Описується методика градуювання запропонованого рівнеміра, робота експериментальної та імітаційної установок, а також методики виконання експериментальних досліджень та обробки результатів вимірювання. Виконано аналіз математичної моделі рівнеміра та запропоновано використовувати лінійну математичну модель наступної форми

$$L_B = H \left\{ 1 - N_{10} M_C \sqrt{\frac{T_C}{M_C P_A}} \right\} + L_0 \left( N_{10} M_C \sqrt{\frac{T_C}{M_C P_A}} \right), \quad (2)$$

де  $N_{10} = \epsilon_\lambda / M_{СП} \sqrt{P_H / kR}$ ;  $T_C = 273,13 K$ ,  $M_C$  - молекулярний склад газу;  $P_H = 101,33$  кПа.

Якщо в (2) прийняти, що  $a_0 = H \frac{K}{R} N_{10} M_C \sqrt{T_C / M_C P_A}$  і  $a_1 = N_{10} M_C \sqrt{T_C / M_C P_A}$ , то отримуємо наступну лінійну математичну модель для градуовальної характеристики у такій формі

$$L_B = a_0 + a_1 L_D.$$

На рис. 14 наведена експериментальна градуовальна характеристика рівнеміра у вигляді ломаної лінії регресії (суцільна) та емпірична (пунктирна).

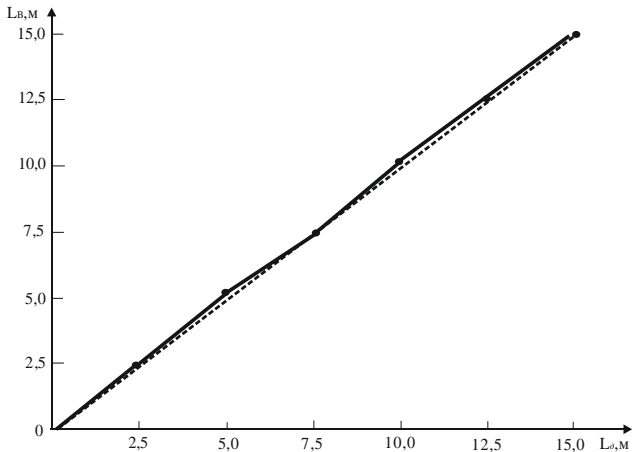


Рисунок 14 – Експериментальна градуовальна характеристика рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі

Відхилення експериментальної лінії регресії від лінійної (пунктирної) не перевищує 7 мм, або 0,05% від діапазону вимірювання, який дорівнює 15 м. Методом найменших квадратів визначені коефіцієнти емпіричної лінії регресії, для котрої отримані наступні їх значення:  $a_0 = 0,0995$  і  $a_1 = 9,986$ . Коефіцієнт кореляції між  $a_0$  і  $a_1$  є незначним і становить  $R_{L_B L_D} = 0,236$ .

Показана можливість переходу з одного діапазону вимірювання на інший без відповідного градуювання. Установлено, що

при цьому дещо змінюється значення кінця нового діапазону вимірювання як показано на рис. 15. Нелінійність градуовальних характеристик зменшується як показано на рис. 16.

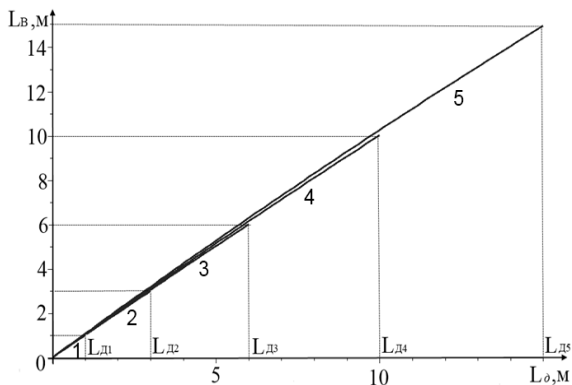


Рисунок 15 - Результати моделювання характеристик для діапазонів вимірювання: 1 –  $\varnothing-1 \text{ м}$ ; 2 –  $\varnothing-3 \text{ м}$ ; 3 –  $\varnothing-6 \text{ м}$ ; 4 –  $\varnothing-10 \text{ м}$ ; 5 –  $\varnothing-15 \text{ м}$

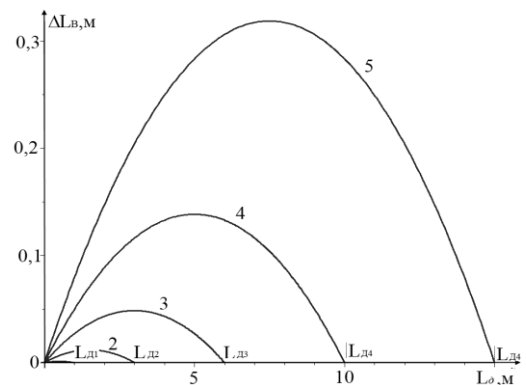


Рисунок 16 - Нелінійності градуовальних характеристик для діапазонів: 1 –  $\varnothing-1 \text{ м}$ ; 2 –  $\varnothing-3 \text{ м}$ ; 3 –  $\varnothing-6 \text{ м}$ ; 4 –  $\varnothing-10 \text{ м}$ ; 5 –  $\varnothing-15 \text{ м}$

Залежність коефіцієнта чутливості рівнеміра при переході на інший діапазон вимірювання показана на рис. 17, а зміни нелінійності градуовальної характеристики на рис. 18. Залежність зміни чутливості за діапазоном вимірювання є близькою до лінійної, що дозволяє за відповідним алгоритмом в

автоматичному режимі установлювати необхідний діапазон. Установлено, що максимальні абсолютні похибки вимірювання складають: при зміні температури на кожні 20 К - 4,6 мм; тиску газу на кожні 30 кПа - 5,5 мм; молекулярного складу газу на кожні 10 кг/кмоль – не більше 4 мм; напруги електричного збуджуючого імпульсу на кожні 1 вольт – 5,2 мм; зсуву фази – не більше 5 мм. Вірогідність контролю становить  $D=0,987$ .

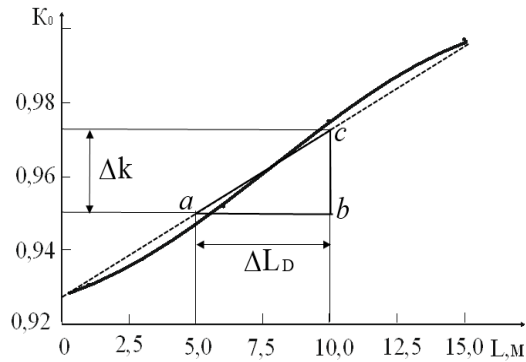


Рисунок 17 – Результати моделювання зміни чутливості

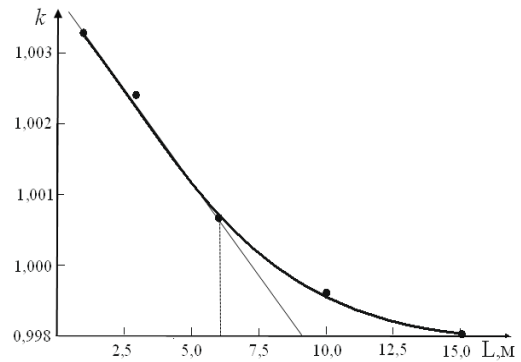


Рисунок 18 – Результати моделювання зміни нелінійності градувальних характеристик

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи на науково-виробничому підприємстві «Мікротерм» і в навчальний процес у Східноукраїнському національному університеті імені В. Даля, патенти на винахід і користі моделі, результати моделювання метрологічних характеристик ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, список публікацій здобувача за темою дисертації, а також програма для відповідних розрахунків.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача, яка полягає в розробці та дослідженні ультразвукового рівнеміра рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, що дозволяє збільшити точність та розширити діапазон вимірювання за рахунок зменшення часу поширення ультразвукового імпульсу в газовому середовищі. При цьому одержані такі основні результати:

1. Запропоновано метод та ультразвуковий рівнемір рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, який має основний ультразвуковий випромінювач (УЗВ) і ультразвуковий приймач (УЗП), котрі розташовані на кришці ємності, та ультразвуковий прийомо-передавач (УЗПП), котрий розташований на плаваючому на поверхні рідини поплавку, причому основний УЗВ збуджується електричним імпульсом і створює ультразвуковий імпульс (УЗІ), а УЗПП збуджується УЗІ основного УЗВ, котрі з'єднані між собою ізольованим кабелем; причому УЗІ УЗПП проходить через газове середовище і сприймається УЗП, який перетворює ці імпульси в електрорушійну силу (ЕРС), що дозволило збільшити діапазон вимірювання в два рази, зменшити зону



нечутливості в три рази, основну зведену похибку вимірювання в 1,5 рази та додаткові похибки в два рази.

2. Розроблено фізичні та математичні моделі функціональних перетворень ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі на основі теорії незворотних реологічних переходів та методу нульового градієнта, що дозволило отримати математичні моделі функціональних перетворень та запропонованого рівнеміра в аналітичній формі, придатній для розробки програмного забезпечення його роботи.

3. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження запропонованого ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі та встановлено, що його градувальна характеристика є практично лінійною в діапазоні вимірювання рівня рідини до 15 метрів, вперше встановлена та досліджена додаткова похибка вимірювання, зумовлена зсувом фази УЗІ, а також додаткові похибки вимірювання, котрі викликані зміною напруги електричного збуджуючого імпульсу, фізичних параметрів п'єзокерамічного елемента, газового середовища та опорної напруги електричної вимірювальної схеми.

4. Запропоновано реперний алгоритм, який заснований на співвідношенні часу прямого та суми прямого і зворотного часу поширення УЗІ через газове середовище та матричний метод для дослідження похибок вимірювання багатовимірного параметричного вимірювального каналу, що дозволило в два рази зменшити додаткову похибку вимірювання, зумовлену зміною температури, тиску та молекулярного складу газу та оцінити долю похибки кожного перетворювального елемента на точність вимірювання, а також позбутися металевих реперних пристроїв і зменшити зону нечутливості в три рази.

5. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені на науково-виробничому підприємстві «Мікротерм» (м. Сєвєродонецьк) – вітчизняному розробнику ультразвукових рівнемірів та навчальний процес кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукр. нац.ун-ту ім. В. Даля.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Публікації у фахових виданнях, рекомендованих ВАК України.:*

1. Літвінов К. А. Фізичні моделі перетворень в ультразвукових засобах контролю рівня рідини рідинних середовищ / Й. І. Стенцель, А. В. Рябіченко, К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХП». – Харків. – 2011. - №19. - С. 3-18.

*Автором запропоновані фізичні моделі основних переходів у п'єзокерамічному елементі ультразвукових засобів та описані їх перетворення*

2. Літвінов К. А. Засіб контролю рівня рідинних середовищ з кільцевим рухом ультразвукового сигналу / Й. І. Стенцель, А. В. Рябіченко., К. А. Літвінов, О. І. Шаповалов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Міжнародний науково-технічний журнал. – Вінниця. - 2014. - № 1. - С. 52-56.

*Автором досліджено ультразвуковий засіб контролю рівня рідини з кільцевим рухом ультразвукового сигналу.*

3. Літвінов К. А. Математичні моделі ультразвукового мембранного випромінювача / Й. І. Стенцель, А. В. Рябіченко, К. А. Літвінов // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ. - 2012. - №18(189). – С. 253-260.

*Автором досліджені математичні моделі ультразвукового мембранного випромінювача.*

4. Litvinov K. A. Research into Rheological transmutations in a Piezoceramic ultrasonic Sensor of Fluid Level Contrjl / K. A. Litvinov. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – Kharkov. - 2016. № 4/5 (82). – P. 4-11.

5. Літвінов К. А. Дослідження електродинамічних процесів у п'єзокерамічному приймачі ультразвукових рівнемірів] / Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – Харків. - 2016. - № 4(48) – С. 13-23.

*Автором досліджені електродинамічні процеси в п'єзокерамічному приймачі ультразвукового рівнеміра.*

6. Літвінов К. А. Математичні моделі ультразвукового рівнеміра з кільцевим рухом електричного сигналу / К. А. Літвінов. // Комп'ютерно-інтегровані технології. Освіта, наука, виробництво. Науковий журнал. – Луцький нац. техн. ун-т. – Луцьк. - 2015. - № 18. – С. 132-141.

7. Літвінов К. А. Дослідження похибок реперного каналу ультразвукових засобів контролю рівня рідинних середовищ / Й. І. Стенцель, А. В. Томсон, В. В. Євсюков, К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2011. - №19(1128). – С. 55-60.

*Автором досліджено вплив реперного сигналу на зменшення похибок вимірювання*

8. Літвінов К. А. Реперний алгоритм для ультразвукового рівнеміра з кільцевим рухом електричного сигналу / К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2015. - № 19(1128). С. 97-105.

9. Літвінов К. А. Дослідження похибок вимірювального контролю рівня рідинних середовищ [Текст] / Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2013. - № 34(1007). С. 32-36.

*Автором досліджені похибки в ультразвуковому рівнемірі рідини у формі матричного функціоналу.*

10. Літвінов К. А. Дослідження точності вимірювання за реологічних перетворень фізичної величини / Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – Харків. – 2014. - №2(46). – С. 24-30.

*Автором досліджено вплив перенесення кількості енергії на похибки вимірювання рівнеміра. .*

11. Літвінов К. А. Дослідження точності вимірювання за реологічних перетворень фізичної величини з конвекційним перенесенням / Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов, О. І. Шаповалов // Метрологія та прилади, Науково-виробничий журнал. – Харків. – 2014. - №6(50). - С. 8-11.

*Автором досліджені похибки вимірювання фізичної величини при наявності конвекційного перенесення енергії та матеріального потоку.*

12. Літвінов К. А. Дослідження багатопараметричних об'єктів контролю та управління методом тримірного інтегрального функціоналу / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа, К. А. Літвінов. // Східноєвропейський журнал передових технологій. Інформаційні технології і системи управління в промисловості. – Харків. – 2015. - № 1/2 (73). - С. 36-42.

*Автором досліджено ультразвуковий засіб вимірювання як багатопараметричний об'єкт контролю методом тримірного інтегрального функціоналу.*

13. Літвінов К. А. Дослідження похибок вимірювального контролю методом інтегрального функціоналу / Й. І. Стенцель., В. В. Євсюков., А. В. Томсон, К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2012. - №41. – С. 43 – 55.

*Автором досліджені похибки вимірювання методом інтегрального функціоналу.*

14. Літвінов К. А. Дослідження похибок вимірювального контролю методом матричного функціоналу /Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов // Вісник СХУ ім. В. Даля. – Луганськ. – 2012. - №18(189). - С. 245-252.

*Автором досліджені похибки вимірювання методом матричного функціоналу.*

15. Літвінов К. А. Дослідження похибок ультразвукових рівнемірів методом інтегральної матриці /Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов // Вісник СХУ ім. В. Даля. – Луганськ. – 2016. - №9(216). - С. 108-113.

*Автором досліджені похибки вимірювання методом інтегральної матриці.*

16. Літвінов К. А. Дослідження складних систем контролю та управління методом квадратур / Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов, О. І. Проказа, А. В. Рябіченко // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – Харків. – 2015. - № 2(52). - С. 24-28.

*Автором досліджені динамічні характеристики складних систем контролю методом квадратур.*

17. Літвінов К. А. Теоретині дослідження ультразвукового пристрою контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірною поверхнею / Й. І. Стенцель, О. І. Шаповалов, К. А. Літвінов, В. В. Євсюков. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2013. - № 34(1007). - С. 18-23, 2013.

*Автором досліджено ультразвуковий рівнемір рідини з нерівномірною поверхнею.*

18. Y. Stentsel, O. Porkuian, K. Litvinov, O. Shapovalov, «Research of heat energy transfer processes based on rheological transitions theory find zero gradient method», *TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – An International quarterli journal on Motorization, venicle Operation, Energi Efficiency and Mechanical Engineerind*, Lublin-Rzeszow. – 2016. - Vol. 16, № 3. - PP. 21 – 29.

*Автором досліджено реологічні перетворення теплової енергії та метод нульового градієнта..*

19. Літвінов К. А. Дослідження перехідних процесів систем автоматичного регулювання четвертого порядку методом квадратур / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа, К. А. Літвінов. // Східноєвропейський журнал передових технологій. Інформаційні технології і системи управління в промисловості, – Харків. – 2015. - № 2/2 (73). - С. 41-48.

*Автором досліджено ультразвуковий рівнемір, як об'єкт управління четвертого порядку методом квадратур.*

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.*

20. Літвінов К. А. Аналіз сучасного стану методів і засобів вимірювального контролю рівня рідинних середовищ // В. Є Назаров, К. А. Літвінов. «Технологія-2016»: матеріали XIX Міжнародної наук.-техн. конф. Ч.2, 22-23 квітня 2016 р. – Сєверодонецьк: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2016. – С. 111-114.

*Автором обґрунтовані сучасні методи і засоби контролю рівня рідин.*

21. Litvinov K. A. Measuring level of liquid mediums with irregular surface by the ultrasolund level control device / I. I. Stencel, A. V. Thomson, A. I. Shapovalov, K. A. Litvinov // The development of scientific researches' 2012": The materials of eighth international scientific and practical conference/ - Poltava – 2012 - V.9. - P. 78-81.

*Автором досліджено вплив електричного збуджуючого сигналу ультразвукового рівнеміра на статичні характеристики.*

22. Літвінов К. А. Контроль рівня рідин рівнеміром з кільцевим рухом ультразвукового сигналу / К. А. Літвінов, А. В. Рябіченко, Й. І. Стенцель // «Технологія-2014» - Матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. - Сєверодонецьк. - 2014. – С. 25-27.

*Автором обґрунтовано принцип вимірювання рівня рідини ультразвуковим засобом з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу.*

23. K. Litvinov, «Benchmarking algorithm for ultrasonic level meter / K. A. Litvinov» на 8-ій Українсько-польській наук.-практ. конф.. «Електроніка та інформаційні технології» (ЕЛІТ-2016). - Львів-Чинадієво. - 2016. - С. 59-61.

24. Літвінов К. А. Дослідження реперного алгоритму для ультразвукового рівнеміра з кільцевим рухом електричного сигналу / К.А. Літвінов. Матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. Технологія-2015. - Сєверодонецьк. – 2015. - С. 52-56.

*Автором досліджено вплив основних впливових факторів на точність вимірювання рівня рідини.*

25. Літвінов К. А. Підвищення точності вимірювального контролю рівня рідинних середовищ ультразвуковим методом / Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов // «Technical Using of Measurement-2015». Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених в царині метрології. – Славське. – 2015 - С. 115-117.

*Автором досліджені похибки вимірювання рівня рідини та методи їх зменшення.*

26. Літвінов К. А. Методична похибка вимірювання при реологічних перетвореннях фізичної величини / А. В. Рябіченко, К. А. Літвінов, О. І.

Шаповалов // «Технологія-2014». Матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. – Северодонецьк. – 2014. - С.20-21.

*Автором обґрунтовано принцип вимірювання рівня рідини ультразвуковим рівнемірор при реологічних перетвореннях електричного збуджуючого імпульсу*

27. Літвінов К. А. Ультразвуковий засіб контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірною поверхнею / Й. І. Стенцель, В. В. Євсюков, К. А. Літвінов. //Матеріали Міжнародної наук. техн. конф. «Вимірювання, контроль та діагностика в системах ВКДТС-2011. – Вінниця. – 2011. - С. 85.

*Автором обґрунтована фізична модель ультразвукового рівнеміра рідини з нерівномірною поверхнею.*

28. К. Litvinov, «Computer system for controlling of ultrasonic level gauge for liquids with circular motion of ultrasonic pulse», an *Conference Proceedings II Scientific and practical Conference. Summer InfoCom Advanced Solutions.* – Kyiv. – 2016. - PP. 15-16.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.*

29. Патент України на винахід МНК G01F 23/296 № 110220 С2 // Стенцель Й. І., Літвінов К. А., Рябіченко А. В. Ультразвуковий пристрій для контролю рівня рідинних середовищ. Заявка № а 2013 05151, заявл. 22.04.2013, опубл. 10.12.2015. Бюл. №23.

*Автором обґрунтовано спосіб ультразвукового вимірювання рівня рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.*

30. Патент України на корисну модель МНК G01F 23/28№ 103916 U // Стенцель Й. І., Літвінов К. А., та Проказа О. І. Пристрій контролю рівня рідинних середовищ з кільцевим рухом ультразвукового імпульсу. Заявка № u 2015 05361, заявл. 02.06.230015, опубл. 12. 01.2016. Бюл. №1.

*Автором запропоновано пристрій контролю рівня рідини ультразвукового вимірювання рівня рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі та реперним алгоритмом*

31. Патент на корисну модель МНК G01F 23/28 № 74227 U // Стенцель Й. І., Томсон А. В., Шаповалов О. І., Літвінов К. А. Ультразвуковий пристрій для вимірювання рівня середовищ з нерівномірною поверхнею Заявка № u 2012 03182. Заявл. 19.03.2012. Опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20

*Автором досліджено ультразвуковий рівнемір рідини з нерівномірною поверхнею.*

## АНОТАЦІЇ

**Літвінов К. А. Ультразвуковий рівнемір рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин». - Східноукраїнський національний університет ім.

Володимира Даля, Сєверодонецьк. Захист відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний університет, Харків, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі – розробці ультразвукового рівнеміра рідини, котрий дозволяє підвищити ефективність використання ємностей за рахунок зменшення зони нечутливості, розширення діапазону та зменшення похибок вимірювання. Суть роботи рівнеміра полягає в одноразовому проходженні ультразвуковим імпульсом товщини газу. Досліджені динамічні процеси, що відбуваються в ультразвукових перетворювачах, та отримані їх математичні моделі. На основі методу нульового градієнта отримані математичні моделі ультразвукового рівнеміра рідини в аналітичній формі. Запропоновано програмний реперний алгоритм, який дозволяє значно зменшити зону нечутливості та похибки вимірювання, екотрі зумовлені внутрішніми та зовнішніми факторами. Розроблені алгоритми обробки вимірювальної інформації та програмне забезпечення рівнеміра.

**Ключові слова:** точність, вірогідність, чутливість, контроль, ультразвук, п'єзокераміка, перетворювач, імпульс, реологія, модель, алгоритм.

**Литвинов К. А. Ультразвуковой уровнемер жидкости с одноразовым распространением ультразвукового импульса в газовой среде. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля и определения состава веществ». - Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля, Северодонецк.

Защита состоится на заседании специализированного ученого совета Д 64.050.09 в Харьковском национальном техническом университете, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной задаче – разработке ультразвукового уровнемера жидкости, который позволяет увеличить эффективность использования емкостей за счет уменьшения зоны нечувствительности, расширения диапазона и уменьшения погрешностей измерения. В диссертации выполнен анализ существующих методов и средств измерения уровня жидкостей в том числе и ультразвуковых, показаны их достоинства и недостатки, а также предложен метод и средство ультразвукового измерительного контроля уровня жидкостей с одноразовым распространением ультразвукового импульса в газовой среде, что позволило расширить диапазон измерения, уменьшить зону нечувствительности и увеличить точность измерения. Отличие предложенного метода состоит в том, что ультразвуковой импульс проходит расстояние в газовой среде только один раз за счет того, что ультразвуковой излучатель расположен на поплавке, который плавает на поверхности жидкости. Теоретические исследования преобразований в ультразвуковом уровнемере выполнены с применением теории реологических переходов и метода нулевого градиента, что позволило получить математические

модели преобразований электрического и ультразвукового сигналов в аналитической форме. Физические процессы представлены в форме интегральной импульсной дельта-функции Дирака, ядром которой являются нелинейные дифференциальные уравнения, которые описывают процессы переноса импульса энергии, массы и количества движения. В результате исследований физических процессов установлено, что ультразвуковые преобразователи описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, что дало возможность изучить влияние нелинейности на метрологические характеристики ультразвукового уровнемера жидкости и разработать мероприятия для их улучшения. На основе теории функциональных преобразований и метода нулевого градиента получены математические модели ультразвукового уровнемера жидкости в аналитической форме и исследованы причины, которые влияют на зону нечувствительности и его метрологические характеристики. Разработаны математические модели ультразвукового уровнемера для погрешностей измерения и выполнены их исследования методом интегрального матричного функционала. На основе исследований влияния физических параметров показано, что самые большие погрешности измерения имеют средства измерения уровня при изменении температуры газа. Предложен программный реперный алгоритм, в основу которого положен принцип соотношения времени прохождения ультразвуковым импульсом газа прямого хода от излучателя к приемнику и времени обратного хода, что позволяет существенно уменьшить зону нечувствительности и погрешности измерения, которые обусловлены внутренними и внешними факторами. Приводится теоретическое обоснование и принцип его технической реализации. Установлено, что изменение электромеханических параметров пьезокерамического элемента и электрического возбуждающего импульса приводит к смещению фазы ультразвукового импульса, что является причиной дополнительной погрешности измерения. Теоретически и экспериментально исследованы погрешности измерения, обусловленные изменением температуры, давления и молекулярного состава газовой среды, а также напряжения электрического возбуждающего импульса и смещения фазы ультразвукового импульса. Предложен метод уменьшения нелинейности градуировочной характеристики ультразвукового уровнемера. Разработана структурная схема ультразвукового уровнемера жидкости, на основе которой усовершенствовано микропроцессорное устройство контроля параметров в статическом и динамическом режимах его работы. Разработаны алгоритмы обработки измерительной информации и программное обеспечение для расчета результатов измерительного контроля и их погрешностей.

**Ключевые слова:** точность, вероятность, чувствительность, контроль, ультразвук, пьезокерамика, преобразователь, импульс, реология, модель, алгоритм.

**Litvinov K. A. Ultrasonic level gauge with a one-time spread ultrasonic pulse in a gas environment. - Manuscripts.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) by specialty 05.11.13 «Devices and methods of control and determination of substances». –Volodymyr Dahl East Ukrainian University, Severodonetsk. Protection will be held at a meeting of the specialized academic council D 64.050.09 at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic University, Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and applied problem- development of ultrasonic level gauge liquids, which allows you to increase efficiency use of containers at the expense of reduction of the zone of insensitivity, expanding the range and decrease measurement errors. The essence of the work level gauge consist in one-time spread ultrasonic pulse in a gas environment. Investigated dynamic processes, occurring in ultrasound converters, and their mathematical models are obtained. Based on the method zero gradient obtained mathematical models ultrasonic level gauge liquids in an analytical form. Proposed programmatic reference algorithm, which can significantly reduce the area of insensitivity and measurement errors, which are caused by internal and external factors. The algorithms of processing of measuring information and software of the level gauge are developed.

**Keywords:** precision, reliability, sensitivity, control, ultrasound, piezoeremic, converter, pulse, rheology, model, algorithm.