

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЛІТВІНОВ КОСТЯНТИН АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 681.128.82

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

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

15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ К. А. Літвінов

Науковий керівник

Стенцель Йосип Іванович
доктор технічних наук, професор

Севєродонецьк – 2017

АНОТАЦІЯ

Литвінов К. А. Ультразвуковий рівнемір з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі. – Кваліфікаційна наукова праця 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» (152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка) – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк, 2018.

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

У дисертації приведені результати дослідження ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, що дозволило розширити діапазон вимірювання, зменшити зону нечутливості та зменшити похибку вимірювання. Виконано аналіз існуючих методів і засобів контролю рівня рідини в технологічних апаратах та ємностях для зберігання рідин. Показано їх позитивні особливості та основні недоліки. До основних неконтактних методів відноситься ультразвуковий, який заснований на вимірюванні товщини газового середовища. Показано, що сучасні ультразвукові рівнеміри рідин мають низку недоліків і вимагають подальшого вдосконалення. До основних з них відноситься наявність механічного реперного пристрою, що приводить до зони нечутливості, яка досягає 0,6 метра й більше. Так як ультразвуковий імпульс два рази проходить товщину газу, то такі засоби мають достатньо великі похибки вимірювання, які зумовлені зміною температури, тиску та молекулярного складу газу. Окрім того, ще залишилися невивченими причини зміни параметрів ультразвукового імпульсу при його формуванні випромінювачем, проходженні через газове середовище та сприйманні

приймачем. До основної задачі відноситься також розробка математичного та програмного забезпечення з метою уведення поправки при контролі рівня рідин.

Описується сутність ультразвукового методу вимірювання рівня рідини, та розглядаються функціональні перетворення. Показано, що газове середовище є аперіодичною динамічною ланкою першого порядку, котра залежить від багатьох впливових параметрів. Описані конструктивні відмінності запропонованого засобу контролю від існуючих. Вказується, що в запропонованому засобі відсутній механічний реперний пристрій, а реперний сигнал, який є функцією електричних параметрів випромінювача, приймача та газового середовища, є більш ефективним для уведення поправки до результату вимірювання. Розроблені фізичні моделі функціональних перетворень і показано, що вони описуються інтегральними імпульсними дельта-функціями Дірака. Для кожного реологічного переходу отримані математичні моделі у формі нелінійних диференціальних рівнянь. Виконані теоретичні дослідження електромеханічних та електромагнітних процесів, котрі супроводжуються випромінюванням ультразвукової енергії в газове середовище. Показано, що вимірювальний процес має сім функціональних переходів. Отримані математичні моделі перетворення ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, а також математичні моделі рівнеміра. Запропоновано ультразвуковий рівнемір з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі, суть якого полягає в тому, що ультразвуковий імпульс проходить товщину газового середовища тільки один раз за рахунок того, що випромінювач розташований на поплавку, котрий плаває на поверхні рідини. Це дозволило розширити діапазон вимірювання, зменшити зону нечутливості та підвищити точність вимірювання. Розглядаються два варіанти конструктивного виконання такого засобу. Виконано аналіз математичної моделі засобу та теоретичне обґрунтування реперного алгоритму. Надається структурна схема функціональних перетворень у такому рівнемірі та приводяться результати теоретичних досліджень статичної характеристики. Розглядається вплив основних узагальнюючих параметрів (ультразвукового випромінювача, приймача та

газового середовища) на характер статичної характеристики. Описується принцип перетворень в ультразвуковому рівнемірі з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу матричним методом, приводяться результати моделювання складових похибок вимірювання. Вказується, що принцип роботи рівнеміра можна подати у матричній формі, в якій діагональні добутки являють собою відповідні умовні послідовні перетворювальні канали. Показано, що при зміні температури, молекулярного складу й тиску газу визначальною є мультиплікативна складова похибки. Реперний алгоритм заснований на співвідношенні часу проходження одним і тим же ультразвуковим імпульсом однієї відстані при прямому ході та подвійної відстані при зворотному ході ультразвукового імпульсу.

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача, яка полягає у розробці та дослідженні рівнеміра рідин, що забезпечує розширення діапазону вимірювання, зменшення зони нечутливості, зменшення похибки вимірювання, в основу яких покладені наступні нові наукові результати: вдосконалено ультразвуковий засіб контролю рівня рідин, який відрізняється від відомих тим, що забезпечує одноразове поширення ультразвукового імпульсу, апаратна реалізація якого дозволяє розширити діапазон вимірювання до 15 м, довести поріг чутливості до 0,2 м (у порівнянні з існуючими аналогічними рівнемірами) і зведеної похибки до 0,2%; вперше запропоновано використати співвідношення часу прямого та зворотного руху ультразвукового імпульсу в газі як реперного аналогу, що дозволило зменшити зону нечутливості (з 0,6 м до 0,2 м) і підвищити точність компенсації додаткових похибок (з 0,25% до 0,2 %), зумовлених зміною фізичних параметрів газу; вперше запропоновано метод матричного інтегрального функціоналу для дослідження похибок, що дозволило оцінити одночасну дію внутрішніх і зовнішніх факторів на роботу засобу контролю; дістали подальший розвиток математичні моделі процесів перенесення електричного та ультразвукового імпульсу за рахунок урахування впливів вторинних ультразвукових ефектів, що

дозволило виявити зміщення фази сприймаючого ультразвукового імпульсу та установити додаткову похибку вимірювання.

Одержані наукові результати у вигляді методики експериментального визначення рівня рідини, структурних схем, рівнянь функціональних перетворень, принципу дії засобу вимірювання рівня впроваджені у навчальний процес кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України. Розроблений експериментальний макет ультразвукового засобу контролю рівня рідин з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі впроваджено в науково-виробничому підприємстві «Мікротерм». Розроблено структурні схеми ультразвукового засобу контролю рівня рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу, алгоритми обробки вимірювальної інформації та програмне забезпечення засобу, що дозволяє виконувати контроль рівня у діапазоні від 0,2 до 15 метрів, зоною нечутливості до 200 мм, і зведеною похибкою вимірювання до 0,2%. Запропоновано методику градуювання засобу, яка враховує особливості одноразового поширення ультразвукового імпульсу в газовому середовищі. Даються рекомендації щодо проектування засобу контролю рівня рідини на основі одноразового поширення ультразвукового імпульсу, які включають вибір ультразвукових випромінювачів і приймачів, поплавка з передавачем, реперного алгоритму, електричної вимірювальної схеми. Запропоновано засіб контролю рівня рідини на основі одноразового поширення ультразвукового імпульсу, який має практично у двічі більший діапазон вимірювання у порівнянні з прототипом МТМ-900, більш ніж у 3 рази меншу зону нечутливості, на 20% меншу похибку вимірювання.

Ключові слова: ультразвук, перетворювач, напруга, імпульс, реологія, п'єзокераміка, засіб, поплавок, мембрана, модель, алгоритм, контроль.

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 СХУ 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 Contrj] / 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 «ХП». – 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 «ХП». – 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 «ХП». – 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 and zero gradient method», *TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – An International quarterly journal on Motorization, vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*, 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 ХІХ Міжнародної наук.-техн. конф. Ч.2, 22-23 квітня 2016 р. – Сєвєродонецьк: 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. Stencil, 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. – Сєвєродонецьк. – 2014. - С.20-21.

Автором обґрунтовано принцип вимірювання рівня рідини ультразвуковим рівнеміром 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.

ABSTRACT

Litvinov K. A. Ultrasonic level gauge with a one-time spread ultrasonic pulse in a gas environment. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscripts.

Candidate of Engineering Science (PhD) thesis in speciality 05.11.13 “Devices and Methods of Control and Determination of Substance Composition” (152 – Metrology and Information-Measuring Equipment) – Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, 2018.

Defense will be held at the meeting of the Specialized Scientific Council D 64.050.09 in National technical university «Kharkiv Polytechnic University», Kharkiv, 2018.

The thesis presents the improved method of ultrasonic control of fluid media level, giving an opportunity to expand the measuring range, to narrow the dead zone and to increase the accuracy of control. The analysis of the existing methods and devices for liquid level control in process vessels and containers for storing fluid media has been conducted. Their positive features and major disadvantages are shown. The main non-contact methods include ultrasonic, based on measuring the gas medium thickness. It is shown that modern ultrasonic control devices have a number of disadvantages and require further improvement. The main of them include availability of the mechanical reference device, leading to the dead zone that reaches 0.6 meters and

more. Since the ultrasonic pulse passes through the gas medium thickness twice, such devices have quite critical errors in control caused by changes in temperature, pressure and gas molecular composition. In addition, there are still unexplored reasons for changing the ultrasonic pulse parameters during its formation by the emitter, its passing through the gas medium and sensing by the receiver. The core aims also include development of mathematical support and software to make amendments for control of liquid level.

The nature of the ultrasonic method of control of liquid level is described, and functional transformations are considered. It is shown that the gas medium is a first-order dynamic aperiodic link, depending on a number of influential parameters. Construction differences between the proposed method and device for control and the existing ones are described. It is pointed out that the proposed device does not have the mechanical reference device, and the reference signal that is a function of the electrical parameters of the emitter, the receiver and the gas medium is more effective for amending measurement results. Physical models of functional transformations have been developed and it is shown that they are described by integral pulse Dirac delta functions. Mathematical models in the form of nonlinear differential equations have been obtained for each rheological transition. Theoretical study of electromechanical and electromagnetic processes, accompanied by emission of ultrasonic energy in the gas environment, has been made. It is shown that the measuring process has seven rheological transitions. Mathematical models of conversion of the ultrasonic pulse in the gas medium and mathematical models of the ultrasonic device for control of liquid level have been obtained. The method and device for ultrasonic control of liquid level with circular motion of the electrical signal have been proposed, the essence of which is that the ultrasonic pulse passes through the gas medium thickness only once because the emitter is located on a float on the surface of the liquid. It has made possible to expand the range of control, to narrow the dead zone and to increase accuracy. We consider two versions of design of such a device. The analysis of the device mathematical model and theoretical justification of the reference algorithm have been performed. A block

diagram of functional transformations in such a device is given and the results of theoretical research of the static characteristic are given. The influence of the main generalizing parameters (ultrasonic emitter, receiver and gas medium) on the nature of the static characteristic. The principle of transformations in the ultrasonic device by the matrix method is described, the results of modeling error components of control are given. It is pointed out that the control device can be presented in the matrix form, in which diagonal elements are corresponding conventional sequential converting channels. It is shown that under changes of gas temperature, molecular composition and gas pressure, error multiplicative component is crucial. The reference algorithm is based on the ratio of the transmission time of one distance during forward motion to the double distance during backward motion by the same ultrasonic pulse.

The results of conducted theoretical and experimental studies addressed the solution of the important scientific and technical challenge, which is to design and study the device for control of liquid level, expanding the range of control, narrowing the dead zone, improving the accuracy and reliability of controls, based on the following new scientific results: the ultrasonic device for control of liquid level has been improved, differing from the known by the fact that it provides circular motion of the electrical and ultrasonic pulse, hardware implementation of which can expand the measurement range (from 0.2 m to 15 m), bring the sensory threshold to 0.2 m (in comparison with existing ones similar level gauge) and normalize the value of total error to 0.2%. There has been firstly proposed: usage of the ratio of time of forward and backward motion of the ultrasonic pulse in gas as a reference analog that has narrowed the dead zone (from 0.6 m to 0.2 m) and increased the accuracy of compensation for additional errors (from 0.25% to 0.2%) due to changes in gas physical parameters; the matrix method of integral functional to study errors, giving an opportunity to estimate the simultaneous effect of internal and external factors on operation of the control device. Further development has been provided for mathematical models of transferring processes of the electric ultrasonic pulse by taking into account influences of secondary ultrasonic

effects to detect possible phase shifts of the receiving ultrasonic pulse and to find out additional measuring error.

The obtained scientific results in the form of methods of experimental determination of liquid level, block diagrams, equations of functional transformations, the principle of the level measuring device operation have been implemented into the educational process of the Department of Computer-Integrated Management Systems of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. The developed experimental prototype of the ultrasonic device for liquid level control with a one-time spread ultrasonic pulse in a gas environment has been implemented at research, development and production “Microtherm” Company. There have been developed block diagrams of the ultrasonic control device for liquid level based on one-time spread ultrasonic pulse in a gas environment, processing algorithms of measurement data and software for the device with a one-time spread ultrasonic pulse in a gas environment, which allows to control the level in the range of 0.2 to 15 meters, the dead zone to 200 mm, total control error up to 0.2% and control reliability up to 0.997. The method of calibration of the measuring device, taking into account peculiarities of motion of the ultrasonic pulse in the gas medium has been proposed. There are given recommendations for design of the device for control of liquid level based on one-time spread ultrasonic pulse, which includes choice of ultrasonic emitters and receivers, the float with the emitter, the reference algorithm, the electrical measuring circuit. There has been proposed the device for control of liquid level based on one-time spread ultrasonic pulse, which has almost twice as large range of control in comparison with the prototype MTM-900, more than 3 times smaller dead zone, and 20% lower measuring control total error.

Keywords: ultrasonic, transmitter, voltage, pulse, rheology, piezoceramics, device, float, membrane, model, algorithm, control.

List of works published on topic on the dissertation

Publications in the specialized editions recommended by the Higher Attestation Commission of Ukraine

1. Litvinov K. A. Fyzy`chni modeli peretvoren` v ul`trazvukovy`x zasobax kontrolyu rivnya ridy`ny` ridy`nny`x seredovy`shh / J. I. Stencil`, A. V. Ryabichenko, K. A. Litvinov // Visny`k NTU «XPI». – Xarkiv. – 2011. - #19. - S. 3-18.

2. Litvinov K. A. Zasib kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh z kil`cevy`m ruxom ul`trazvukovogo sy`gnalu / J. I. Stencil`, A. V. Ryabichenko., K. A. Litvinov, O. I. Shapovalov // Informacijni tehnologiyi ta komp'yuterna inzheneriya. Mizhnarodny`j naukovo-texnichny`j zhurnal. – Vinny`cya. - 2014. - # 1. - S. 52-56.

3. Litvinov K. A. Matematy`chni modeli ul`trazvukovogo membrannogo vy`prominyuvacha / J. I. Stencil`, A. V. Ryabichenko, K. A. Litvinov // Visny`k SNU im.. V. Dalya. – Lugans`k. - 2012. - #18(189). – S. 253-260.

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

5. Litvinov K. A. Doslidzhennya elektrody`namichny`x procesiv u p'yezokeramichnomu pry`jmachi ul`trazvukovy`x rivnemiriv] / J. I. Stencil`, K. A. Litvinov // Metrologiya ta pry`lady`. Naukovo-vy`robny`chy`j zhurnal. – Xarkiv. - 2016. - # 4(48) – S. 13-23.

6. Litvinov K. A. Matematy`chni modeli ul`trazvukovogo rivnemira z kil`cevy`m ruxom elektry`chnogo sy`gnalu / K. A. Litvinov. // Komp'yuterno-integrovani tehnologiyi. Osvita, nauka, vy`robny`cztvo. Naukovy`j zhurnal. – Lucz`ky`j nacz. texn. un-t. – Lucz`k. - 2015. - # 18. – S. 132-141.

7. Litvinov K. A. Doslidzhennya poxy`bok repernogo kanalu ul`trazvukovy`x zasobiv kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh / J. I. Stencil`, A. V. Tomson, V. V. Yevsyukov, K. A. Litvinov // Visny`k NTU «XPI». – Xarkiv. – 2011. - #19(1128). – S. 55-60.

8. Litvinov K. A. Reperny`j alory`tm dlya ul`trazvukovogo rivnemira z kil`cevy`m ruxom elektry`chnogo sy`gnalu / K. A. Litvinov // Visny`k NTU «XPI». – Xarkiv. – 2015. - # 19(1128). S. 97-105.

9. Litvinov K. A. Doslidzhennya poxy`bok vy`miryval`nogo kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh / J. I. Stencil`, K. A. Litvinov // Visny`k NTU «XPI». – Xarkiv. – 2013. - # 34(1007). S. 32-36.

10. Litvinov K. A. Doslidzhennya tochnosti vy`miryuvannya za reologichny`x peretvoren` fizy`chnoyi vely`chy`ny` / J. I. Stencil`, K. A. Litvinov // Metrologiya ta pry`lady`. Naukovo-vy`robny`chy`j zhurnal. – Xarkiv. – 2014. - #2(46). – S. 24-30.

11. Litvinov K. A. Doslidzhennya tochnosti vy`miryuvannya za reologichny`x peretvoren` fizy`chnoyi vely`chy`ny` z konvekciyn`m perenesennyam /J. I. Stencil`, K. A. Litvinov, O. I. Shapovalov //Metrologiya ta pry`lady`, Naukovo-vy`robny`chy`j zhurnal. – Xarkiv. – 2014. - #6(50). - S. 8-11.

12. Litvinov K. A. Doslidzhennya bagatoparmetry`chny`x ob'yektiv kontrolyu ta upravlinnya metodom try`mirnogo integral`nogo funkcionalu / J. I. Stencil`, O. I. Prokaza, K. A. Litvinov. // Sxidnoyevropejs`ky`j zhurnal peredovy`x texnologij. Informacijni texnologiyi i sy`stemy` upravlinnya v promy`slovosti. – Xarkiv. – 2015. - # 1/2 (73). - S. 36-42.

13. Litvinov K. A. Doslidzhennya poxy`bok vy`miryval`nogo kontrolyu metodom integral`nogo funkcionalu / J. I. Stencil`, V. V. Yevsyukov., A. V. Tomson, K. A. Litvinov // Visny`k NTU «XPI». – Xarkiv. – 2012. - #41. – S. 43 – 55.

14. Litvinov K. A. Doslidzhennya poxy`bok vy`miryval`nogo kontrolyu metodom matry`chnogo funkcionalu /J. I. Stencil`, K. A. Litvinov // Visny`k SNU im. V. Dalya. – Lugans`k. – 2012. - #18(189). - S. 245-252.

15. Litvinov K. A. Doslidzhennya poxy`bok ul`trazvukovy`x rivnemiriv metodom integral`noyi matry`ci /J. I. Stencil`, K. A. Litvinov // Visny`k SNU im. V. Dalya. – Lugans`k. – 2016. - #9(216). - S. 108-113.

16. Litvinov K. A. Doslidzhennya skladny`x sy`stem kontrolyu ta upravlinnya metodom kvadratur / J. I. Stencil`, K. A. Litvinov, O. I. Prokaza, A. V. Ryabichenko //

Metrologiya ta pry`lady`. Naukovo-vy`robny`chy`j zhurnal. – Xarkiv. – 2015. - # 2(52). - S. 24-28.

17. Litvinov K. A. Teorety`ni doslidzhennya ul`trazvukovogo pry`stroyu kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh z nerivnomirnoyu poverxneyu / J. I. Stencil`, O. I. Shapovalov, K. A. Litvinov, V. V. Yevsyukov. // Visny`k NTU «XPI». – Xarkiv. – 2013. - # 34(1007). - S. 18-23, 2013.

18. Y. Stentsel, O. Porkuian, K. Litvinov, O. Shapovalov, «Research of heat energy transfer processes based on rheological transitions theory fnd 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.

19. Litvinov K. A. Doslidzhennya perexidny`x procesiv sy`stem avtomaty`chnogo regulyuvannya chetvertogo poryadku metodom kvadratur / J. I. Stencil`, O. I. Prokaza, K. A. Litvinov. //Sxidnoyevropejs`ky`j zhurnal peredovy`x texnologij. Informacijni texnologiyi i sy`stemy` upravlinnya v promy`slovosti, – Xarkiv. – 2015. - # 2/2 (73. - S. 41-48.

Scientific papers certifying the approbation of the materials of the dissertation.

20. Litvinov K. A. Analiz suchasnogo stanu metodiv i zsoviv vy`miryval`nogo kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh //V. Ye Nazarov, K. A. Litvinov. «Texnologiya-2016»: materialy` XIX Mizhnarodnoyi nauk.-texn. konf. Ch.2, 22-23 kvitnya 2016 r. – Syevyerodonecz`k: Vy`d-vo Sxidnoukr. nacz. un-tu im. V.Dalya, 2016. – S. 111-114.

21. Litvinov K. A. Measuringlevel of liquid mediums with irregular surface by the ultrasolund level control device / I. I. Stencil, 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.

22. Litvinov K. A. Kontrol` rivnya ridy`n rivnemirom z kil`cevy`m ruxom ul`trazvukovogo sy`gnalu / K. A. Litvinov, A. V. Ryabichenko, J. I. Stencil` //

«Texnologiya-2014» - Materialy` Mizhnarodnoyi nauk.-texn. konf. - Syevyerodonecz`k. - 2014. – S. 25-27.

23. K. Litvinov, «Benchmarking algorithm for ultrasonic level meter / K. A. Litvinov» na 8-ij Ukrayins`ko-pol`s`kij nauk.-prakt. konf.. «Elektronika ta informacijni texnologiyi» (ELIT-2016). - L`viv-Chy`nadiyevo. - 2016. - S. 59-61.

24. Litvinov K. A. Doslidzhennya repernogo algory`tmu dlya ul`trazvukovogo rivnemira z kil`cevy`m ruxom elektry`chnogo sy`gnalu / K.A. Litvinov. Materialy` Mizhnarodnoyi nauk.-texn. konf. Texnologiya-2015. - Syevyerodonecz`k. – 2015. - S. 52-56.

25. Litvinov K. A. Pidvy`shhennya tochnosti vy`miryval`nogo kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh ul`trazvukovy`m metodom / J. I. Stencil`, K. A. Litvinov // «Technical Using of Measurement-2015». Materialy` Vseukrayins`koyi nauk.-texn. konf. molody`x vcheny`x v czary`ni metrologiyi. – Slavs`ke. – 2015 - S. 115-117.

26. Litvinov K. A. Metody`chna poxy`bka vy`miryuvannya pry` reologichny`x peretvorennyax fizy`chnoyi vely`chy`ny` / A. V. Ryabichenko, K. A. Litvinov, O. I. Shapovalov // «Texnologiya-2014». Materialy` Mizhnarodnoyi nauk.-texn. konf. – Syevyerodonecz`k. – 2014. - S.20-21.

27. Litvinov K. A. Ul`trazvukovy`j zasib kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh z nerivnomirnoyu poverxneyu / J. I. Stencil`, V. V. Yevsyukov, K. A. Litvinov. //Materialy` Mizhnarodnoyi nauk. texn. konf. «Vy`miryuvannya, kontrol` ta diagnosty`ka v sy`stemax VKDTS-2011. – Vinny`cya. – 2011. - S. 85.

28. K.A. 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. - RR. 15-16.

Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation.

29. Patent Ukrayiny` na vy`naxid MNK G01F 23/296 # 110220 S2 // Stencil` J. I., Litvinov K. A., Ryabichenko A. V. Ul`trazvukovy`j pry`strij dlya kontrolyu rivnya

ridy`nny`x seredovy`shh. Zayavka # a 2013 05151, zayavl. 22.04.2013, opubl. 10.12.2015. Byul. #23.

30. Patent Ukrayiny` na kory`snu model` MNK G01F 23/28# 103916 U // Stencil` J. I., Litvinov K. A., ta Prokaza O. I. Pry`strij kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh z kil`cevy`m ruxom ul`trazvukovogo impul`s. Zayavka # u 2015 05361, zayavl. 02.06.230015, opubl. 12. 01.2016. Byul. #1.

31. Patent na kory`snu model` MNK G01F 23/28 # 74227 U // Stencil` J. I., Tomson A. V., Shapovalov O. I., Litvinov K. A. Ul`trazvukovy`j pry`strij dlya vy`miryuvannya rivnya seredovy`shh z nerivnomirnoyu poverxneyu Zayavka # u 2012 03182. Zayavl. 19.03.2012. Opubl. 25.10.2012, Byul. # 20.

ЗМІСТ

	Перелік умовних скорочень.....	6
ВСТУП		9
Розділ 1	Аналіз сучасного стану методів і засобів контролю рівня рідин ...	17
1.1	Методи та засоби контролю рівня рідин.....	17
1.2	Аналіз ультразвукових методів і засобів контролю рівня рідин.....	25
1.3	Постановка задачі дослідження.....	33
1.4	Висновки.....	34
Розділ 2	Розробка математичних моделей перетворювачів ультразвукового рівнеміра рідини та дослідження їх характеристик.....	36
2.1	Сутність ультразвукового методу вимірювання рівня рідини	36
2.2	Математичні моделі перетворень в ультразвуковому рівнемірі рідини з одноразовим рухом ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.....	41
2.3	Незворотні функціональні перетворення в ультразвуковому рівнемірі	42
2.4	Електромеханічні перетворення в ультразвуковому випромінювачі.....	48
2.5	Математична модель перетворення ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.....	55
2.6	Математична модель перетворення УЗІ в електрорушійну силу ...	59
2.7	Математична модель статичної характеристики ультразвукового рівнеміра з одноразовим рухом УЗІ.....	61
2.8	Висновки.....	65
Розділ 3	Розробка ультразвукового рівнеміра рідини з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газоваму середовищі..	67
3.1	Розробка та вибір схеми ультразвукового рівнеміра рідини з одноразовим рухом УЗІ.....	67

3.2	Принцип роботи ультразвукового рівнеміра з одноразовим рухом УЗІ та реперним алгоритмом.....	70
3.3	Метрологічні характеристики ультразвукового рівнеміра з одноразовим рухом УЗІ.....	77
3.3.1	Оцінка впливу неінформативних параметрів.....	77
3.3.2	Дослідження статичних характеристик ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі.....	79
3.3.3	Математичні моделі перетворень в ультразвуковому рівнемірі з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі матричним методом.....	83
3.4	Дослідження похибок ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі.....	92
3.4.1	Дослідження температурних похибок вимірювання.....	92
3.4.2	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміною тиску газу.....	97
3.4.3	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених одночасною зміною температури і тиску газу.....	99
3.4.4	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміною молекулярного складу газу	102
3.4.5	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміною напруги ЕЗІ.....	103
3.4.6	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміщенням фази ЕЗІ.....	105
3.4.7	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміною опорної напруги.....	107
3.4.8	Дослідження динамічних характеристик ультразвукового рівнеміра з з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі.....	109

3.5	Висновки.....	113
Розділ 4	Апаратна реалізація та дослідження ультразвукового рівнеміра рідин з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.....	115
4.1	Рекомендації щодо проектування ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі.....	115
4.2	Методика градуювання ультразвукового рівнеміра	117
4.3	Методика обробки результатів вимірювання рівня рідини при періодичних перевірках ультразвукового рівнеміра	122
4.4	Апаратна реалізація ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі.....	126
4.5	Експериментальні дослідження статичних характеристик ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі.....	129
4.5.1	Експериментальна установка та принцип її роботи.....	129
4.5.2	Методика виконання експериментальних досліджень та обробки результатів вимірювання	130
4.5.3	Перевірка градуювальних характеристик	134
4.5.4	Експериментальні дослідження додаткових похибок вимірювання ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням УЗІ в газовому середовищі.....	136
4.5.4.1	Дослідження похибок, зумовлених зміною температури газу	136
4.5.4.2	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміною тиску газу	138
4.5.4.3	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміною молекулярного складу газу.....	140
4.5.4.4	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміною напруги електричного збуджуючого імпульсу.....	142
4.5.4.5	Дослідження похибок вимірювання, зумовлених зміщенням фази	

УЗІ	143
4.5.5 Оцінювання вірогідності контролю рівня рідини.....	144
4.5.6 Оцінка адекватності результатів експериментальних досліджень.....	147
4.6 Висновки.....	149
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	172
Додаток А Акти впровадження ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.....	173
Додаток Б Патенти на винахід і корисні моделі	175
Додаток В Дослідження статичних характеристик ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.....	178
Додаток Г Дослідження похибок вимірювання ультразвукового рівнеміра з одноразовим поширенням ультразвукового імпульсу в газовому середовищі.....	197
Додаток Д Програма для мікроконтролера ультразвукового рівнеміра.....	221
Додаток Е Список публікацій за темою дисертації.....	229