

## МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ

Korobko I.  
The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (i.korobko@kpi.ua)

### MODELING OF ULTRASONIC TYPE FLOW RATE TRANSDUCERS

*Стаття направлена на вирішення задачі створення дієвої системи енергозбереження шляхом організації ефективного вимірювання і обліку паливно-енергетичних ресурсів та води. Правильність вибраних принципів побудови вимірювальних перетворювачів витрати і основних технічних рішень, прийнятих при цьому, запропоновано оцінювати не шляхом проведення великої кількості затратних експериментально-випробувальних робіт на макетах та лабораторних зразках, а здійсненням математичного та віртуального моделювань з використанням сучасних інформаційних технологій. В роботі розглядаються питання оцінки правильності вибору значень конструктивних параметрів вимірювальних перетворювачів витрати ультразвукового типу при їх проектуванні та подальших дослідженнях. Для проведення комплексних досліджень вимірювальних перетворювачів витрати та кількості розроблено спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє проведення математичного моделювання приладів на їх базі. Особлива увага приділена дослідженню впливу гідродинамічних показників потоку на метрологічні характеристики приладу; оцінці статичної та динамічної характеристик; відношення швидкості, яку вимірює прилад, та середньої за потоком вимірювального середовища; оцінці похибок вимірювання.*

*Ключові слова:* витрата, вимірювання витрати, ультразвукові вимірювальні перетворювачі, моделювання.

#### Вступ. Постановка проблеми

Процес створення вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ) паливно-енергетичних ресурсів та води (ПЕРВ) включає в собі цілий ряд етапів, які пов'язані із проектуванням, виготовленням і випробуванням як окремих елементів так і всього приладу чи системи в цілому. Правильність вибраних принципів побудови ВПВ і основних технічних рішень, які прийняті при їх, перевіряється шляхом проведення великого об'єму математичного та віртуального моделювань і експериментально-випробувальних робіт на макетах та лабораторних зразках.

Математичне моделювання роботи ВПВ є відображенням фізичної сутності процесів вимірювання із властивими їм особливостями та обмеженнями і встановлює зв'язок між двома об'єктами: реальною системою - вимірювальним перетворювачем (оригіналом) та її відтворенням – математичною моделлю.

Порівняно із фізичним, математичне моделювання є більш універсальним, воно: дає змогу на основі одного ВПВ здійснити розв'язання цілого класу задач, які мають однакові або подібні математичні описи; забезпечує простоту переходу від однієї задачі до іншої; дає можливість моделювання по частинах (тобто декомпонувати систему на частини, моделювати кожен частину окремо і об'єднувати моделі, що відповідають різним підсистемам чи аспектам опису); прискорює моделювання за рахунок використання сучасних комп'ютерних систем; потребує менших витрат внаслідок відсутності необхідності побудови великої кількості фізичних моделей і заміни суттєвої частки емпіричних досліджень теоретичними [1].

В зв'язку із обмеженнями пов'язаних із можливістю проведення широкомасштабних експериментальних випробувань математичне моделювання роботи ВПВ на цьому етапі набуває значимої важливості і є одним із найефективніших методів дослідження приладів при їх розробці.

#### Аналіз останніх досліджень

На сьогоднішній день ще відсутні методологія математичного моделювання ультразвукових ВПВ, прийнятні алгоритми та програмне забезпечення його проведення за різних фізико-хімічних властивостей вимірювального середовища, з широким спектром динаміки його протікання та впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на процес вимірювання витрати ПЕРВ. Питання розробки та досліджень ВПВ висвітлені в роботах ряду науковців та інженерів. Серед них: П.П.Кремльовський, Л.Л.Бошняк, Л.Н.Бызов, А.А.Тупіченков, А.Ш.Кіясбейлі, Г.Н.Бобровніков, Л.А.Камишев, Л.М.Шонін, О.М.Павловський, Д.І.Агейкін, Є.О. Шорніков та інші [2-3]. Але в цих наукових працях не приділена належна увага питанням розробки спеціалізованого

програмного забезпечення дослідження багатьох типів ВПВ, в тому числі і тих, які базуються на ультразвукових (УЗ) методах вимірювання.

Саме відсутність єдиного підходу, що передбачав би створення програмного забезпечення з метою створення сучасних вимірювальних приладів та систем, шляхом їх комплексних досліджень на етапі проектування визначають доцільність та актуальність роботи.

#### **Формулювання цілей статті (постановка задачі)**

УЗ ВПВ базуються на вимірюванні залежного від витрати того або іншого ефекту, що виникає при проходженні акустичних хвиль крізь потік вимірювального середовища. Такі прилади завдяки своїм перевагам набули широкого поширення при організації вимірювання витрати та кількості ПЕРВ [4].

УЗ ВПВ є досить складними як в розробці та виготовленні, так і в експлуатації. При проектуванні таких приладів з високими метрологічними характеристиками, для визначення раціональних значень конструктивних параметрів, необхідно здійснювати великий обсяг експериментальних досліджень. Особливо це стосується при вимірюванні витрати забруднених, агресивних середовищ та пульп, швидкозмінних та пульсуючих витрат. Для розв'язання поставлених задач вимірювання ефективним шляхом є застосування сучасних інформаційних систем дослідження УЗ ВПВ.

Основною задачею статті є висвітлення основних аспектів створеного обчислювального комплексу із спеціальним програмним забезпеченням для оцінки правильності вибору значень конструктивних параметрів вимірювальних перетворювачів витрати ультразвукового типу при їх проектуванні та подальших дослідженнях за різних режимів протікання вимірювального середовища; оцінка впливу внутрішніх і зовнішніх факторів на метрологічні та експлуатаційні характеристики УЗ ВПВ.

#### **Розробка програмного забезпечення**

Комп'ютерне моделювання роботи ВПВ дозволяє розв'язувати такі задачі: перевірка гіпотез про дію тих чи інших фізичних факторів на ефективність процесу вимірювання витрати і кількості ПЕРВ; визначення метрологічних характеристик приладу та вплив на них різних фізичних факторів; на основі дослідження одного ВПВ здійснити розв'язання цілого класу задач, які мають однакові або подібні математичні описи; уточнення математичних моделей і розрахункових алгоритмів; визначення сприятливих технологічних режимів функціонування ВПВ та створення інженерних методів і розрахунків; оптимізація конструктивних параметрів ВПВ; постановка обчислювальних експериментів із візуалізацією процесів на екрані комп'ютера [5]. Комп'ютерне моделювання дає можливість глибше зрозуміти і пояснити складні нестационарні гідродинамічні процеси взаємодії потоків вимірювальних середовищ із чутливими елементами первинних вимірювальних перетворювачів витрат і кількості. З іншого боку, порівняння із дослідними даними дозволяє уточнити математичні моделі, які покладені за основу комп'ютерних програм.

З метою автоматизації досліджень характеристик УЗ ВПВ був розроблений пакет прикладних програм розрахунку USonicFlowMeter. Необхідність розробки даного пакету прикладних програм обумовлена тим, що математична модель УЗ ВПВ включає вирази, які складно розв'язати аналітичним шляхом. Застосування в цьому випадку чисельних методів є досить ефективним і поширеним шляхом розв'язання такого типу задач.

Розроблений програмний комплекс дає можливість здійснювати цілий ряд теоретичних досліджень: оцінка впливу профілю потоку на метрологічні характеристики приладу і повторюваність результатів вимірювання; визначення та дослідження статичної і динамічної характеристик з оцінкою впливу на них різноманітних факторів і властивостей вимірювального середовища; визначення величини невизначеності вимірювання і оцінка впливу на неї зміни характеру протікання вимірювального середовища з аналізом шляхів її зменшення.

При проведенні досліджень розроблений пакет прикладних програм дозволяє змінювати основні параметри трубопроводу, вимірювального середовища, конструктивних елементів ВПВ, умов експлуатації та моделювати величини та характер впливу на процес вимірювання різноманітних факторів.

Характерні особливості пакету прикладних програм: інтуїтивно-зрозумілий інтерфейс; оптимізована обробка великої кількості даних; можливість одночасного перегляду до 255 графіків; можливість одночасного порівняльного розгляду декількох графіків на одній координатній площині; постійна індикація найбільш важливих вимірюваних параметрів.

Пакет прикладних програм розроблено в середовищі програмування високого рівня Delphi® 7. При його розробці дотримувалися базові принципи об'єктно орієнтованого програмування: інкапсуляція та поліморфізм [6]. Суть інкапсуляції полягає у віддаленні реалізації об'єкту від інтерфейсу. Інакше кажучи, інкапсуляція програма взаємодії з об'єктом через його інтерфейс, який складається з відкритих властивостей та методів. Завдяки поліморфізму одні й ті самі інтерфейси вдається по різному реалізувати в різних класах. Інакше кажучи, поліморфізм дозволяє визивати методи та властивості об'єкта незалежно від реалізації.

Всі програми пакету побудовані на єдиному об'єктно – орієнтованому принципі програмування. Принцип побудови програм розглянемо на прикладі програми USonicFlowMeter.

Завдяки об'єктній орієнтованості програмного комплексу існує можливість розширення базової функціональності програми та створення незалежних програм на базі класів «USonicFlowMeter classes».

Вихідний код програми USonicFlowMeter міститься в таких файлах: USonicFlowMeter.dpr – головний файл проекту; MainFormUnit.pas – модуль головного вікна програми; ChartFormUnit.pas – модуль вікна дослідження; OptionsUnit.pas – модуль вікна опцій; LocalMathUnit.pas – модуль базових класів «USonicFlowMeter classes»; IntegrationUnit.pas – модуль чисельного визначення інтеграла функції; TranscendentalUnit.pas – модуль чисельного визначення коренів трансцендентного рівняння.

Базові класи «USonicFlowMeter classes» представлені двома класами: TInitConditions – базовий клас початкових умов та параметрів моделі; TFlowRepres – базовий клас математичної моделі потоку.

Клас TInitConditions використовується як структура зберігання початкових умов та параметрів моделі потоку. Для збільшення гнучкості використання полів класу використана технологія оперування «властивостями» класу (properties). Важлива особливість властивостей – можливість обробки вхідних та вихідних даних в неявному вигляді. Таким чином підвищується стабільність роботи програми, покращується контроль розмірностей та спрощується механізм обробки критичних подій. Керуючись методологією використання властивостей, всі поля класу, а також функції-гетери та функції-сетери оголошуються в захищеній області для запобігання будь-якого прямого доступу.

Клас TFlowRepres представляє модель потоку і описує параметри потоку, включає в собі модулі знаходження коренів трансцендентного рівняння (TranscendentalUnit) та визначення інтегралу функції (IntegrationUnit).

Пакет прикладних програм побудований у формі MDI-application (багатовіконна форма інтерфейсу). Завдяки цьому відкривається можливість одночасного порівняльного аналізу результатів окремих дослідів, які виконані у різних вікнах, в рамках спільного програмного середовища.

Після запуску програми відкривається головне програмне вікно з доступом до параметрів налаштування та загальної функціональності програми. Головне меню програми містить такі пункти: файл – команди виводу графіків на друк та виходу з програми; досліді – перелік дослідів; налаштування – команду відкриття вікна налаштування параметрів точності розрахунків; довідка – команди відкриття допомоги та короткого опису програми.

Вікно кожного досліду (рис. 1) поділяється на чотири логічні панелі: параметрів досліду; списку графіків; відображення графіків і статусна.

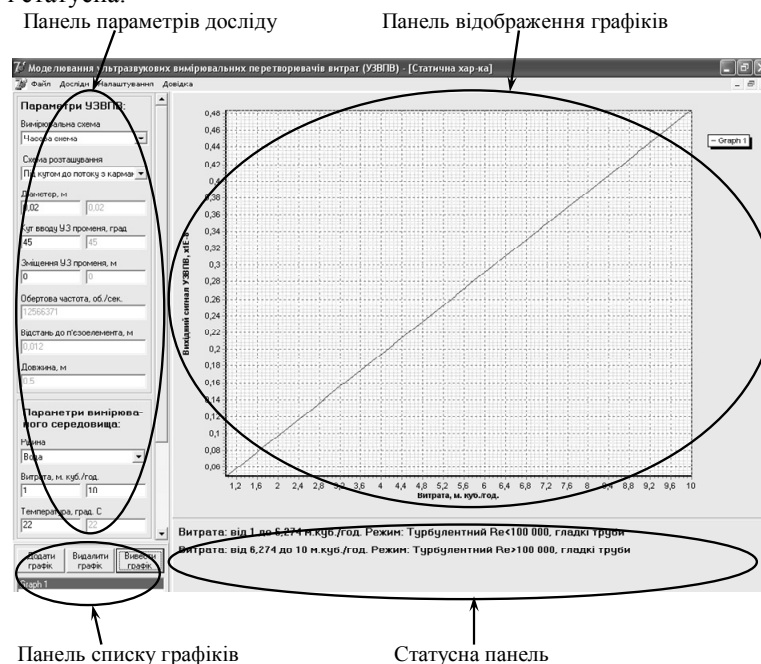


Рис. 1. Головне вікно дослідів

Панель параметрів досліду містить перелік всіх параметрів, які використовуються програмою USonicFlowMeter для розрахунку обраної характеристики УЗ ВПВ.

В панелі списку графіків виводиться перелік усіх графічних залежностей даного досліду. За допомогою опцій «Додати графік» та «Видалити графік» відбувається відповідно додавання графіків та їх видалення з переліку. Опція «Вивести графік» служить для виведення виділеного графіку до панелі відображення графіків.

Кожен графік є незалежною структурою, яка має свої власні параметри досліду. Таким чином, при виділенні будь-якого графіка із списку графіків, панель параметрів досліду заповнюється числовими значеннями, які належать цьому графіку.

Панель відображення графіків являє собою декартову координатну площину, на яку виводяться результати обчислень дослідів. Границі координатного вікна розраховуються автоматично так, щоб вмістити всі виведені графіки. Для збільшення окремого фрагменту графіка необхідно окреслити потрібний діапазон рухом «мишки» при утриманні лівої клавіші зверху-вниз і зліва-направо. Рухом «мишки» в зворотному напрямку відновлюється масштаб відображення.

Статусна панель використовується для виведення певної довідкової інформації, необхідної під час дослідів. Наповнення панелі і склад інформації залежать від конкретного дослідів.

### Дослідження впливу гідродинамічних показників потоку вимірювального середовища на метрологічні характеристики приладу

Однією із основних складових похибок УЗ ВПВ є похибка викликана гідродинамічними характеристиками вимірювального середовища за різних режимів його плинину [7].

Для проведення дослідження впливу гідродинамічного профілю потоку вимірювального середовища на точність та повторюваність вимірювання необхідно вибрати відповідний пункт в головному меню програми «Досліди» (рис. 2) з кнопкою «Додати графік».

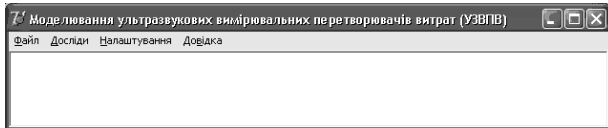
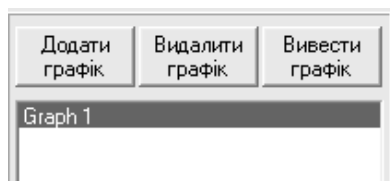


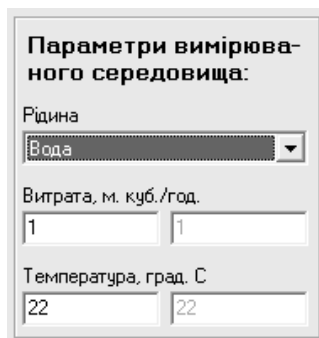
Рис. 2. Меню програми „Досліди”

Після вибору функції «Додати графік», список графіків (рис.3а) доповниться відповідним записом і стають доступними поля редагування вхідних параметрів конкретних дослідів: параметри

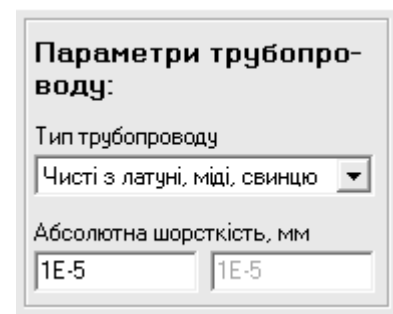
вимірювального середовища (рис.3б), параметри трубопроводу (рис.3в), конструктивні параметри УЗ ВПВ, діаметр трубопроводу і величина зміщення УЗ променя відносно діаметральної площини.



а



б



в

Рис. 3. Вікна налаштувань вхідних параметрів

Поля редагування, розташовані попарно, представляють собою поля завдання діапазону. В першому полі задається початкове значення параметру, а в другому – кінцеве значення. Оскільки для відображення профілю потоку немає потреби в завданні діапазонних значень параметрів, всі поля кінцевих значень діапазону не доступні для редагування і не приймають участі в розрахунках.

Після внесення необхідних змін до панелі параметрів дослідів видається команда на виконання дослідів і після цього результати виводяться у вигляді відповідних таблиць та графіків. Під час побудови графіку з'явиться вікно повідомлення про стан розрахунків і можна отримати проміжні результати дослідів.

### Дослідження статичної характеристики

Для дослідження статичної характеристики необхідно вибрати відповідний пункт в головному меню програми «Досліди». Зовнішній вигляд та принцип роботи з вікном дослідження статичної характеристики подібний до дослідження впливу профілю потоку, розглянутого вище. В той же час необхідно відзначити ряд відмінностей. Враховуючи те, що статична характеристика є функцією від витрати, інтерфейс програми відкриває доступ до можливості завдання діапазону витрати. Окрім цього в даному досліді для редагування стають доступними параметри, які були доступні в досліді профілів швидкостей, а також параметри УЗ ВПВ (рис.4): вимірювальна схема (рис.5); схема розташування; кут вводу УЗ променя; обертова частота (в випадку фазової схеми вимірювання); відстань до п'єзоелементу (в випадку схеми розташування УЗ ВПВ під кутом до потоку без кишень); довжина (в випадку схеми розташування УЗ ВПВ паралельно потоку).

Аналізуючи отримані графіки необхідно звертати увагу на масштабний коефіцієнт, що вказаний на вісі ординат. В деяких випадках після побудови графіку за віссю ординат замість відповідних значень відображаються нулі. Це відбувається в тому випадку, коли для коректного виведення значень необхідно ввести масштабний коефіцієнт, натиснувши праву кнопку «миші» в районі підпису назви вісі ординат. Після цього з'являється вікно за допомогою якого можливо змінити масштабний коефіцієнт (рис.6). Окрім цього дане вікно дає можливість змінювати верхню і нижню межі значень за віссю ординат, встановлювати значення за

провчанням та згладжувати графіки при малих відмінностях в значеннях за віссю ординат (це відбувається за рахунок відсутності різниці між змінами значень за віссю ординат та кроком чисельних методів, які використовуються при розрахунках).

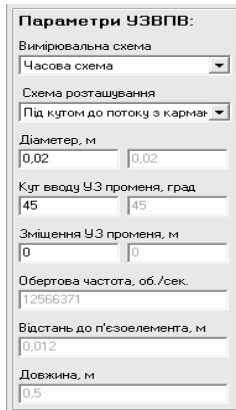


Рис. 4. Вікно введення значень параметрів УЗВПВ

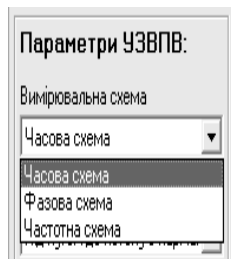


Рис. 5. Вікно введення типу вимірювальної схеми

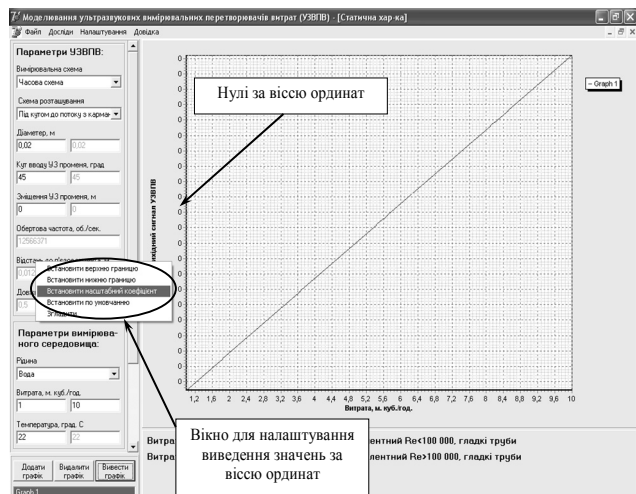


Рис. 6. Вікно налаштувань масштабних коефіцієнтів

### Дослідження залежності відношення швидкостей від витрати

Дані дослідження були введені до програмного комплексу USonicFlowMeter через не просту залежність швидкості, яку вимірює УЗ ВПВ, та середньої за потоком швидкості, що є базою для розрахунку плинної витрати. Для проведення досліджень залежності відношення швидкостей від витрати вибирається відповідний пункт у головному меню програми «Досліди». З точки зору інтерфейсу, цей дослід майже повністю дублює досліди від впливаючих параметрів за винятком однієї відмінності: оскільки вимірювальна схема, в даному випадку, не має значення, то відповідне поле параметрів досліду залишається недоступним.

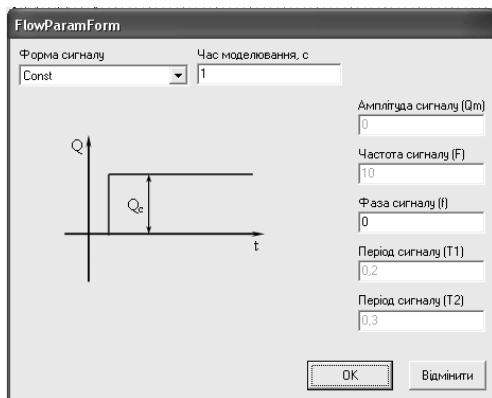


Рис. 7. Вікно на лаштувань вхідного сигналу

### Дослідження динамічних характеристик

Для проведення дослідження динамічної характеристики необхідно вибрати відповідний пункт в головному меню програми «Досліди». Зовнішній вигляд та принцип роботи з вікном дослідження динамічної характеристики подібний до зовнішнього вигляду та принципу роботи вікон розглянутих вище. Необхідно відзначити декілька відмінностей. Динамічна характеристика є функцією часу, форми та параметрів вхідного сигналу. Тому перед розрахунком динамічної характеристики необхідно задати ці параметри у вікні «Вхідного сигналу» (рис.7.), яке знаходиться в меню «Налаштування». Дане вікно дозволяє задавати час моделювання, форму та параметри вхідного сигналу (амплітуду, частоту, фазу та ін.)

### Дослідження похибок УЗ ВПВ

Для проведення дослідження похибки УЗ ВПВ треба вибрати відповідний пункт в головному меню програми «Досліди» (рис. 2). Зовнішній вигляд вікна дослідження не відрізняється від розглянутих вище. При цих дослідженнях для редагування стають доступними всі параметри, які були доступні при проведенні попередніх досліджень. Порядок проведення розрахунків в цьому разі не відрізняється від попередніх досліджень.

### Висновки

Розроблений програмний комплекс дослідження характеристик УЗ ВПВ дозволяє ефективно здійснювати дослідження таких приладів і на його основі в перспективі буде створено систему оптимального проектування і на її основі методики проектування УЗ ВПВ. Така система дозволить: вести пошук оптимальної конструкції

ВПВ за заданими критеріями оптимальності; моделювати роботу ВПВ, як в динамічному за умови різного характеру зміни витрати, так і в статичному режимах при зміні геометричних параметрів конструкції і властивостей вимірюваного середовища; визначити нелінійність градувальних характеристик ВПВ; оцінювати вплив на метрологічні характеристики ВПВ зміну різних чинників, що входять до числа вихідних даних; формувати конструкцію ВПВ шляхом оптимального підбору параметрів для конкретних умов її використання.

**Анотация.** Статья направлена на решение задачи создания действенной системы энергосбережения путем организации эффективного измерения и учета топливно-энергетических ресурсов и воды. Правильность выбранных принципов построения измерительных преобразователей расхода и основных технических решений, которые были приняты при этом, предложено оценивать не путем проведения большого количества затратных экспериментально-испытательных работ на макетных и лабораторных образцах, а осуществлением математического и виртуального моделирования с использованием современных информационных технологий.

В работе рассматриваются вопросы оценки правильности выбора значений конструктивных параметров измерительных преобразователей расхода ультразвукового типа при их проектировании и дальнейших исследованиях. Для проведения комплексных исследований измерительных преобразователей расхода разработано специальное программное обеспечение, позволяющее моделировать работу приборов на их основе. Особое внимание уделено исследованию влияния гидродинамических показателей потока на метрологические характеристики прибора; оценке статической и динамической характеристик; отношения скорости, измеряемой прибором, и средней по потоку измеряемой среды, а также оценке погрешностей измерения.

**Ключевые слова:** расход, измерение расхода, ультразвуковые измерительные преобразователи, моделирование

**Abstract.** The article is devoted to creation of effective energy saving system by means of fuel and energy resources and water measurement and assessment effective organization.

Correctness of measuring flow transducer construction principles and basic solutions, made in this, proposed to evaluate not by means of lot costly experimental testing on scale-models and laboratory samples, but realize of mathematical and virtual modeling with modern information technologies.

Estimation the selection structural parameters magnitude of ultrasonic type flow rate transducers in design and further research are considered. For comprehensive research of flow rate transducers special software to mathematic modeling was developed. Special attention is given to research of flow hydrodynamic parameters influence on meter's metrological characteristics; to estimation of its static and dynamic characteristics; to ratio of measuring velocity to average velocity in flow and to accuracy estimation.

**Keywords:** flow, flow measurement, ultrasonic transducers, modeling.

1. Коробко І.В. Проектування вимірювальних перетворювачів витрат паливно-енергетичних ресурсів та води. У зб. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання. Івано-Франківськ: ФЕ і ІВТ, ІФНТУНГ. – 2008. – 191 с.
2. Кремльовский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 1./ – 5-е изд., пере раб. и доп. – СПб.: Политехника, 2002. – 410 с.
3. Кремльовский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / Под общ. ред. Е.А. Шорникова. – 5-е изд., пере раб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
4. Прозоров М.А. Новые ультразвуковые расходомеры и теплосчетчики // Приборы и системы управления. – 1996. – №8. – С. 22 – 25.
5. Гліненко Л.К., Сухоносів О.Г. Основи моделювання технічних систем – Навч. посіб. – Львів, „Бескид Біт”, - 2003. – 176с.
6. Сван Т. Delphi 7. Библия разработчика. – К.-М.-СПб.: Диалектика, 2002. – 672 с.,
7. Разработка WINDOWS приложений на VisualBasic.NET и VisualC#.NET. – М.: Русская редакция, 2003. – 512с.
8. Філатов В.І. Гидродинамические погрешности ультразвуковых расходомеров // Измерительная техника. 1996, № 9. – с. 36-37

## REFERENCES

1. Korobko I.V. Zb. Suchasni priladi, materiali i tehnologii dlja nerujnivnogo kontrolju i tehnicnoi diagnostiki mashinobudivnogo i naftogazopromislovogo obladnannja. Ivano-Frankivs'k: FE i IVT, IFNTUNG. 2008. 191 p.
2. Kremlovskij P.P. Rashodomery i schetchiki kolichestva vewestv: Spravochnik: Kn. 1. 5-e izd., pere rab. i dop. SPb.: Politehnika, 2002, 410 p.
3. Kremlovskij P.P. Rashodomery i schetchiki kolichestva vewestv: Spravochnik: Kn. 2. Pod obw. red. E.A. Shornikova. 5-e izd., pere rab. i dop. SPb.: Politehnika, 2004. 412 p.
4. Prozorov M.A. Pribory i sistemy upravlenija. 1996. no 8. pp. 22 – 25.
5. Glinenko L.K., Suhonosov O.G. Osnovi modeljuvannja tehnicnih sistem – Navch.posib. L'viv, „Beskid Bit”, 2003. 176 p.
6. Svan T. Delphi 7. Biblija razrabotchika. K.M.SPb.: Dialektika, 2002,672 p.
7. Razabotka WINDOWS prilozhenij na VisualBasic.NET i VisualC#.NET. Moskow: Russkaja redakcija, 2003, 512 p.
8. Filatov V.I. Izmeritel'naja tehnika. 1996, no 9, pp. 36-37