

АНОТАЦІЯ

Биць О.М. Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».- Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального завдання в галузі автоматизації та приладобудування – розробленню теоретичної бази для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії та розробленню системи автоматизованого проектування (САПР) засобів вимірювання кількості теплової енергії, у складі яких застосовують витратоміри зі стандартними звужувальними пристроями потоку.

Розроблена система автоматизованого проектування дає можливість спростити процес проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії, зменшити його трудомісткість, контролювати відповідність проектних рішень вимогам нормативних документів щодо вимірювання кількості теплової енергії.

У дисертації представлено аналіз нормативних документів, які визначають вимоги до комерційного обліку теплової енергії. Розглянуто основні положення щодо здійснення контролю за станом засобів вимірювальної техніки, вимоги до метрологічних та технічних характеристик лічильників теплової енергії. Встановлено, що зазначені документи не містять вимог до систем вимірювання витрати та кількості теплової енергії, що складаються з обчислювача, витратомірів, вимірювальних перетворювачів тиску та температури, що виконані як окремі прилади.

Розглянуто переваги та недоліки витратомірів змінного перепаду тиску і відзначено, що завдяки універсальності застосування, простоті реалізації первинного перетворювача витрати, стандартизації визначень, технічних вимог та методів виконання вимірювань такі витратоміри набули широкого застосування в промислових вимірюваннях. Зокрема, витратоміри змінного перепаду тиску широко застосовують в системах обліку теплової енергії на промислових підприємствах та теплопостачальних організаціях. Для проектування витратомірів змінного перепаду тиску застосовують САПР «Расход-ПУ», Arian ISO-5167 Flow CAD software. Проте ці програмні пакети не призначені для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, тому розроблення САПР засобів вимірювання кількості теплової енергії є актуальним завданням, яке вирішено у дисертаційній роботі.

Структура системи вимірювання кількості теплової енергії, а відповідно й рівняння визначення кількості теплової енергії залежать від схеми розташування вимірювальних перетворювачів. В дисертаційній роботі виконано класифікацію систем теплопостачання та проаналізовано можливі структури систем вимірювання кількості теплової енергії. Розглянуто рівняння для визначення кількості теплової енергії для типових схем систем обліку на джерелах теплової енергії та в схемах теплопостачання споживачів. Встановлено, що основою алгоритму розрахунку кількості теплової енергії для будь-якої структури системи вимірювання її витрати та кількості є алгоритм обчислення інтегральної кількості енергії між двома точками системи теплопостачання, так як рівняння для обчислення кількості теплової енергії містять складові, які є результатом інтегрування добутку витрати теплоносія на різницю ентальпій потоку теплоносія у різних точках схеми теплопостачання.

Визначено основні функції, які є достатніми для формування та зручного представлення вимірюваного значення кількості теплової енергії і які незалежно від структури має реалізувати система вимірювання кількості теплової енергії.

На основі повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь визначення кількості теплової енергії та рівнянь визначення властивостей теплоносія розроблено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, що дає можливість дослідити вплив конструктивних характеристик витратоміра, параметрів теплоносія на результат вимірювання кількості теплової енергії.

Розроблено алгоритм розрахунку кількості теплової енергії для систем із застосуванням витратомірів змінного перепаду тиску, який реалізує повну математичну модель витратоміра, зокрема, ітераційний алгоритм розрахунку витрати теплоносія.

Розроблено рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії. Розроблене рівняння дає можливість обчислити невизначеність для конфігурації системи вимірювання з двома витратомірами, а також оцінити невизначеність кількості теплової енергії з врахуванням невизначеностей вимірюваних значень параметрів потоку (температури, тиску, витрати) та застосованих методик розрахунку параметрів теплоносія.

Проведено аналіз існуючих методик розрахунку термодинамічних властивостей теплоносія (води, водяної пари). Зокрема, методик розрахунку ентальпії, густини, динамічної в'язкості води та водяної пари. За результатами проведеного аналізу встановлено, що для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії доцільно застосовувати методики IAPWS IF-97.

На основі термодинамічних залежностей та рівнянь IAPWS IF-97 розроблено нове рівняння для обчислення показника адіабати перегрітої водяної пари, що в сукупності з відомими рівняннями густини дає можливість обчислити параметри стану водяної пари під час вимірювання її витрати методом змінного перепаду тиску. За результатами опрацювання цього рівняння розроблено спрощене рівняння та алгоритм для розрахунку показника адіабати перегрітої пари для тиску пари від лінії насичення до 100МПа та температури від 97°C до 800°C. Виконано перевірку розробленого спрощеного рівняння шляхом порівняння результатів обчислення показника адіабати за спрощеним рівнянням із зразковими значеннями, отриманими за рівняннями IAPWS-IF97 та встановлено, що відносне відхилення значень показника адіабати, отриманих за спрощеним рівнянням, від зразкових значень показника адіабати не перевищує для діапазону зміни температури від 97 до 350 °C - 0,72% ; для діапазону зміни температури від 350 до 590 °C - 2,62% ; для діапазону зміни температури від 590 до 800 °C - 1,19%.

На основі теорії оцінювання невизначеності та рівнянь розрахунку ентальпії води (водяної пари) розроблено рівняння для розрахунку невизначеності ентальпії води (водяної пари). Застосування цього рівняння дає можливість врахувати методичну невизначеність розрахунку ентальпії та невизначеності параметрів стану води (водяної пари) для області параметрів стану теплоносія, що охоплює технологічні умови застосування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Розроблено спрощені аналітичні залежності для обчислення відносних коефіцієнтів чутливості невизначеності ентальпії до невизначеності результатів вимірювання тиску та температури води, що дає можливість розробити спрощену методику оцінювання невизначеності ентальпії.

Удосконалено метод проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який полягає у пошуку параметрів витратоміра, що забезпечують мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску, що дає можливість зменшити втрати тиску у системах постачання теплової енергії.

Запропоновано нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, що дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень.

Шляхом програмної реалізації алгоритмів, розроблених на основі рівнянь обчислення кількості теплової енергії, математичної моделі системи вимірювання кількості теплової енергії з витратомірами змінного перепаду тиску, методів визначення властивостей води та водяної пари, розроблених методики обчислення показника адіабати водяної пари, методики оцінювання сумарної відносної розширеної невизначеності ентальпії води, водяної пари та методики оцінювання сумарної відносної розширеної невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії, розроблено САПР засобів вимірювання кількості теплової енергії.

Представлено особливості реалізації підсистем введення та перевірки коректності вхідних даних, вікон САПР для введення характеристик вимірювального трубопроводу, засобів вимірювань тиску, перепаду тиску, температури, що входять до складу системи вимірювання кількості теплової енергії.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що на основі зразкових значень показника адіабати, отриманих за новим рівнянням, розроблено спрощені залежності та алгоритм розрахунку

показника адіабати для їх застосування у обчислювачах кількості теплової енергії; розроблено алгоритми розрахунку кількості теплової енергії, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії та дають можливість обчислити кількість теплової енергії для різних конфігурацій систем вимірювання; удосконалено алгоритм проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який забезпечує мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску та дає можливість зменшити втрати тиску, а отже й підвищити ефективність систем постачання теплової енергії; шляхом реалізації сукупності алгоритмів, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, рівняння обчислення фізичних властивостей теплоносія, рівняння розрахунку невизначеності кількості теплової енергії розроблено програмний комплекс САПР "Теплова енергія" для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в підприємствах, що займаються проектуванням та інсталяцією об'єктів тепlopостачання, зокрема розроблений програмний пакет САПР "Теплова енергія" застосований для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії у ТОВ "Сервіскотломонтаж-Львів" а також впроваджений у навчальний процес для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

Ключові слова: кількість теплової енергії, ентальпія теплоносія, витратомір змінного перепаду тиску, математична модель, алгоритм розрахунку, система автоматизованого проектування, оцінювання невизначеності.

ABSTRACT

Byts O.M. Computer-Aided Designing of Thermal Energy Metering Systems based on Differential Pressure Flowmeters.

The thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in the specialty 151 – Automation and Computer Integrated Technologies. – Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2020.

The thesis is devoted to solving an important problem in the field of automation and instrumentation, i.e. development of theoretical base for designing the thermal energy metering systems and development of computer-aided design (CAD) system for designing the thermal energy metering devices, which include flowmeters with standard primary devices.

The developed CAD system simplifies the process of designing the thermal energy metering devices, reduces the labor intensity and controls the compliance of design solutions with the requirements of regulations on thermal energy metering.

The analysis of normative documents with the requirements to the custody transfer systems for metering the thermal energy is presented in the thesis. The main provisions for controlling the condition of metering devices, requirements to the metrological and technical characteristics of heat meters were considered. It was found that these documents do not contain the requirements to the systems of thermal energy flow rate and volume measurement, consisting of a computer, flowmeters, measuring transducers of pressure and temperature, which are made as separate devices.

The advantages and disadvantages of the differential pressure flowmeters were considered. It is noted that due to the universality of application, the simplicity of implementation of the primary transducers, standardization of

definitions, technical requirements and metering methods, such flowmeters are widely used in the industrial measurements. In particular, the differential pressure flowmeters are applied for thermal energy metering at industrial enterprises and at heat supplying organizations. The following software is used for designing the differential pressure flowmeters: «Raskhod-RU» CAD, Arian ISO-5167 Flow CAD. However, these software packages are not intended for computer-aided design of thermal energy metering systems. Therefore, development of computer-aided design software for designing the thermal energy metering systems is an important task, which was solved in the thesis.

The structure of the thermal energy metering system and consequently the equation for determining the thermal energy volume depend on the location scheme of the measuring transducers. Classification of heat supplying systems was carried out in the thesis. The possible structures of thermal energy metering systems were analyzed. The equations for determining the thermal energy volume for typical schemes of metering systems at heat energy sources and in heat supplying networks were considered. It was found that the algorithm for determining the thermal energy volume for any kind of structure of the metering system is based on the algorithm for calculating the integral energy volume between two points of a heat supplying system, since the equations for calculating the thermal energy volume contain the components resulting from integration of the product of the heat carrier flow rate and the difference of enthalpies of the heat carrier in different points of the heat supplying scheme.

The main functions that have to be implemented in a thermal energy metering system independently of its structure are defined. These functions are sufficient for formation and convenient presentation of the measured value of the thermal energy volume.

The mathematical model of the thermal energy metering system was developed on the basis of a complete mathematical model of differential pressure flowmeters, equations for determining the thermal energy volume and equations for determining the properties of a heat carrier. This model provides the possibility to study the influence of the design characteristics of the flowmeter and the parameters of the heat carrier on the result of thermal energy volume measurement.

The algorithm for calculating the thermal energy volume for systems based on differential pressure flowmeters was developed. The complete mathematical model of the flowmeter including the iterative calculation of the heat carrier flow rate was implemented in the developed algorithm.

The equation of uncertainty of the measured value of thermal energy volume was developed. This equation makes it possible to determine the uncertainty for the configuration of the metering system with two flowmeters, as well as to estimate the uncertainty of thermal energy volume taking into account the uncertainties of the measured values of the flow parameters (temperature, pressure, flow rate) and the uncertainties of the techniques applied for calculation of the heat carrier parameters.

The analysis of the existing methods for calculating of thermodynamic properties of the heat carrier (water, steam) was carried out. In particular, methods for calculating the enthalpy, density, dynamic viscosity of water and water steam were analyzed. Based on the results of the analysis, it was found that for the computer-aided design of a thermal energy metering system it is advisable to use the IAPWS IF-97 techniques.

New equations for calculating the isentropic exponent of superheated steam based on dependences and equations from IAPWS-IF97 (International Association for the Properties of Water and Steam) were developed. These equations in combination with known equations for calculating the density makes it possible to

calculate the state parameters of the water steam during measurement of its flow rate by means of the differential pressure method. Based on processing of this equation, a simplified equation and algorithm for calculating the isentropic exponent of superheated steam for pressure from the saturation line to 100 MPa and temperature from 97 °C to 800 °C was developed. The developed simplified equation was verified by comparing the results of calculating the isentropic exponent using this equation with the reference values obtained using the IAPWS-IF97 equations. It was found that the relative deviation of the isentropic exponent values obtained using the simplified equation from the reference isentropic exponent values does not exceed 0.72% for the temperature range from 97 to 350 °C, 2.62% for the temperature range from 350 to 590 °C and 1.19% for the temperature range from 590 to 800 °C.

The equation for calculating the uncertainty of the enthalpy of water (water steam) was developed on the basis of the uncertainty evaluation theory and equations for calculating the enthalpy of water (water steam). Application of this equation makes it possible to take into account the methodological uncertainty of enthalpy calculation and the uncertainty of water (steam) parameters for the range of heat carrier parameters covering the technical conditions for application of thermal energy metering systems.

Simplified analytical dependencies for determining the relative sensitivity coefficients of the enthalpy uncertainty to the uncertainty of the results of water pressure and temperature measurement were developed. It provides the possibility to develop a simplified method for evaluation of the enthalpy uncertainty.

The method of designing a thermal energy metering system was improved. The improvement consists in finding the parameters of the flowmeter that provide the minimum uncertainty in the measured value of the flow rate taking into account

the pressure losses limit, which makes it possible to reduce pressure losses in thermal energy supply systems.

New approaches to computer-aided designing of a thermal energy metering system were proposed. These approaches make it possible to calculate the constructional and metrological characteristics of a thermal energy metering system taking into account the technological and normative constraints.

CAD software for designing the thermal energy metering systems was developed by implementing the algorithms developed on the basis of the equations for calculating the thermal energy volume, the mathematical model of the thermal energy metering system based on the differential pressure flowmeters, the methods for determining the properties of water and steam, the methods for calculating the isentropic exponent of steam, the methods for evaluation of total relative expanded uncertainty of enthalpy of water and steam, as well as the methods for evaluating the total relative expanded uncertainty of thermal energy volume measurement result.

The peculiarities of implementation of CAD subsystems and windows for entering and verifying the input data are presented. The windows for entering the characteristics of the measuring pipeline, the instruments for measurement of pressure, differential pressure and temperature, which are part of the thermal energy metering system, are presented.

The practical significance of the thesis is that on the basis of reference isentropic exponent values, obtained by new equation, a simplified relation and algorithm for calculating the isentropic exponent was developed for its application in the calculators of thermal energy volume. The algorithms for calculation of thermal energy volume were developed with implementation of the mathematical model of the thermal energy metering system. These algorithms make it possible to calculate the thermal energy volume for different configurations of metering

systems. The algorithm for designing the thermal energy metering system was improved, which provides minimal uncertainty of the measured value of the flow rate taking into account the pressure losses limit. Thanks to this algorithm the pressure losses can be reduced and, consequently, the efficiency of a thermal energy supplying system can be increased. "Thermal Energy" CAD software was developed for computer-aided design of thermal energy metering systems. The algorithms that implement a mathematical model of the thermal energy metering system, an equation for calculating the physical properties of the heat carrier, an equation for calculating the uncertainty of the thermal energy volume were applied in this software.

The results of the thesis are implemented in enterprises engaged in the design and installation of heat supply facilities. In particular the developed "Thermal Energy" CAD software is used for designing the thermal energy metering systems in "Serviskotlomontazh-Lviv" LLC. This software was also included into the educational process for students of specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies".

Keywords: thermal energy volume, enthalpy of heat carrier, differential pressure flowmeters, mathematical model, calculation algorithm, computer-aided design system, uncertainty evaluation.

Список публікацій здобувача:

Статті в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Matiko F. D., Slabyk O. M., Hutnyk M. B. (2018). Аналіз нормативного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Вип. 28 (3). С. 105 – 110.

2. Matiko F., Slabyk O., Lesovoy L., Matiko H. Technique for evaluating the uncertainty of enthalpy of water and steam for thermal energy metering systems. *Energy Engineering and Control Systems*. 2018. Vol. 4, № 2. P. 79 – 86.

3. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адіабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. *Вісник КПІ. Серія: Приладобудування*. 2019. Вип. 57 (1). С. 72 – 78.

4. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2019. Вип. № 36. С. 77 – 81.

5. Matiko F., Byts O., Lesovoy L., Matiko H. Computer-aided system for designing the thermal energy metering devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2020. Vol. 6, No. 1. P. 61 – 69.

6. Byts O., Kurytnik I., FedirMatiko F., Lesovoy L., Matiko H. Evaluating the uncertainty of the amount of thermal energy for metering systems with differential pressure flowmeters. *Napędy i Sterowanie*. 2020. No. 4. P. 57 – 63.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Слабик О.М., Матіко Ф.Д. Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. *Актуальні проблеми гуманітарних та природничих наук: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції*. 25-26 серпня 2017 р. Одеса, 2017. С. 156 – 158.

8. О. М. Слабик, Д. Матіко, Л. В. Лесовой. Проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного

перепаду тиску. «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017): збірник тез доповідей Четвертої міжнародної наукової конференції. 31 жовтня – 2 листопада 2017 р. Вінниця, 2017. С. 237 – 238.

9. Матіко Ф. Д., Слабик О. М., Гутник М. Б. Аналіз стану приладового обліку кількості теплової енергії. *Приладобудування: стан і перспективи*: збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції. 15 – 16 травня 2018 р. Київ, 2018. С 184.

10. Slabyk O.M., Matiko F.D., Lesovoy L.V. Technique for determining the properties of heat carrier for the automated design of measuring systems of thermal energy. *Автоматика/Automatics – 2018*: матеріали XXV Міжнародної конференція з автоматичного управління. 18–19 вересня 2018 р. Львів, 2018. С. 189 – 190.

11. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адіабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. *International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students Actual Problems of Automation and Control: conference materials*. 30 листопада 2018 р. Луцьк, 2018 - №6. С. 49-54.

12. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем з витратоміром змінного перепаду тиску. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2019*: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2019). 23–24 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 68 – 69.

13. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Оцінювання невизначеності ентальпії теплоносія для метрологічного забезпечення систем обліку теплової енергії. *«Приладобудування: стан і перспективи»*: збірник

тез доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції. 15 – 16 травня 2019 р. Київ, 2019. С. 172 – 173.

14. Биць О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Програмний комплекс для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2020*: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2020). 22 квітня 2020 р. Київ, 2020. С. 35 – 36.