

НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ

УДК 681.121

РОЗРОБКА CFD МОДЕЛІ ТУРБІННОГО ВИТРАТОМІРА ГАЗУ*Гришанова І. А., Коробко І. В.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: irgryshanova@gmail.com, i.korobko@kpi.ua*

Сучасний стан досліджень турбінних витратомірів газу показує, що для реалізації процесу вибору їхніх оптимальних параметрів застосування лише теоретичного підходу є недостатнім, оскільки він багато в чому базується на емпіричному підході. Нині для детального аналізу і прийняття рішень при розгляді задач створення ефективних засобів вимірювання витрати і кількості рідинно- і газофазних середовищ все більше імплементують технології обчислювальної гідрогазодинаміки або CFD технології, тому що саме вони дозволяють проникнути всередину процесу взаємодії потоку із чутливими елементами приладу, а отже врахувати і компенсувати недоліки застосовуваної раніше класичної теорії.

Дана стаття направлена на створення CFD моделі турбінного витратоміра газу, яка дає можливість відтворити роботу його первинного перетворювача в процесі обертання і врахувати особливості взаємодії плинного потоку вимірюваного середовища з турбінним чутливим елементом. Наведено методологію створення моделі турбінного витратоміра на базі 3D сітки з рухомою і стаціонарною частинами у програмному комплексі ANSYS CFX. Методологія складається з п'яти основних етапів, які за потреби можна доповнити параметризаційним дослідженням для оптимізації параметрів конструкції первинного вимірювального перетворювача. Розроблена модель дає змогу побудувати калібрувальну характеристику турбінного витратоміра, змінюючи швидкість потоку (витрату) і фізичні властивості вимірюваного середовища, а також вийти на стаціонарну швидкість обертання турбіни. Робота розпочалася з моделі стаціонарного стану, щоб забезпечити прийнятний початковий рівень, як умову подальшого моделювання. Ці результати далі можуть бути введені в модель перехідного стану.

В ході моделювання було оцінено характеристику зміни рушійного моменту на колесі турбіни в діапазоні витрат, отримано лінії течії і вектори швидкостей в обчислювальному домені. Запропонована модель може виявитися корисною при створенні сучасних конструкцій турбінних витратомірів газу.

Ключові слова: турбінний витратомір; CFD; калібрувальна крива; ANSYS CFX; вимірювальний перетворювач витрати.

Вступ. Постановка проблеми

Турбінні витратоміри давно існують на ринку засобів виміру витрат і кількості рідин та газів. Варто зазначити, що перший турбінний витратомір Вольтмана з'явився ще в 1790 році [1]. За цей час вони були достатньо добре вивчені.

Спочатку дослідження стосувалися лише статичного режиму обертання турбіни, далі інженери і науковці почали працювати над поліпшенням метрологічних та експлуатаційних характеристик вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ), а саме над оптимальною геометричною та просторовою формою лопатей турбіни, аналізом рушійного моменту і моменту тертя, уточненням коефіцієнтів для визначення цих моментів [2]. Задача полягала в тому, щоб якомога коректніше оцінити витрато-частотні характеристики турбінних засобів вимірювання. Однак на сьогодні ще є багато невирішених проблем, і актуальним напрямом залишається аналіз витрато-частотних характерис-

тик турбінних ВПВ (ТВПВ), але вже на базі сучасних CFD-технологій (*Computational Fluid Dynamics*) з побудовою відповідних моделей. Саме завдяки таким моделям можна оцінити особливості конструкції ВПВ і знайти оптимальні параметри, як окремих елементів, так і приладу в цілому. Це суттєво підвищить ефективність розрахунків і значно зменшить час створення приладів з високими експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Раніше теоретичний аналіз роботи турбінних витратомірів [3] не дозволяв врахувати всіх особливостей плинного газу і його взаємодії з первинним вимірювальним перетворювачем. В більшості робіт [2, 4], присвячених питанням теорії ВПВ з аксіальними турбінними чутливими елементами, досліджується рівняння їхнього обертання, які хоч і містять багато емпіричних коефіцієнтів, однак да-

ють розуміння про характер зміни градувальних характеристик в усьому діапазоні.

Частина науковців та інженерів [5] вважають, що на сьогодні все ще немає цілісної методики проектувального розрахунку турбінних витратомірів. Отже, метою своєї роботи вбачають отримання апроксимуючих виразів залежностей витрато-частотних характеристик турбінних ВПВ, заснованих на використанні функціональних залежностей гідродинамічних сил на лопатці турбінки від частоти її обертання та витрати газу, які отримано з допомогою тривимірних польових *CFD* моделей. Така методика передбачає поєднання класичної теорії турбінних витратомірів з чисельними експериментами.

Інші автори у своїх дослідженнях використовують порівняльний аналіз чисельних і натурних експериментів [6] для вивчення впливу ефекту в'язкості на характеристики ТВПВ, зокрема на градувальний коефіцієнт. В деяких випадках *CFD* технології використовували для прогнозування поведінки метрологічних характеристик ТВПВ [7] та їхньої оптимізації [8]. Чисельні експерименти імітують реальні експерименти з ТВПВ. Так, для досягнення стабільної швидкості обертання ротора змінювалися швидкість потоку, в'язкість та густина [1]. Модель дала певні результати, які можуть бути використані для вдосконалення ТВПВ у майбутньому.

Як бачимо сьогодні обчислювальна гідрогазодинаміка стає все більш актуальним інженерним інструментом [9]. Це обумовлено такими її якостями, як формальна простота постановки задачі і незалежність методики її розв'язання від робочого процесу досліджуваного вузла, а також завдяки тому, що чисельний експеримент інколи дає змогу отримати розуміння тих явищ, які важко відтворити в ході натурального експерименту [10].

Ми бачимо можливість з використанням *CFD* технологій створити загальний підхід для оцінки витрато-частотних характеристик ТВПВ газофазних середовищ, а потім проаналізуємо перспективи розвитку цих технологій у даному напрямку.

Метою дослідження, описаного у даній статті, є розробка методології створення моделі ТВПВ із застосуванням сучасних технологій обчислювальної гідродинаміки на базі 3D сітки з рухомою і стаціонарною частинами, яка використовуватиметься для оптимізації параметрів конструкції ТВПВ.

Сутність методології моделювання турбінних витратомірів газу

Процес розрахунків можна розбити на п'ять основних етапів.

1. Побудова геометричної моделі (CAD моделі) ТВПВ.

В *ANSYS CFX* реалізована методика розрахунку тривимірних тіл. Тому моделювання ТВПВ

виконується в тривимірній постановці в *ANSYS Design Modeler*. Модель розроблена на базі конструкції типового турбінного витратоміра газу (рис. 1), який має передній обтічник 1, колесо турбіни 2 і задній обтічник 3. Передній обтічник являє собою струмоспрямовуючий апарат на вході, лопаті якого сприяють розгалуженню потоку і більш ефективному попаданню його на лопаті турбінки. Передній і задній обтічники слугують для закріплення опор обертання турбінного чутливого елемента.

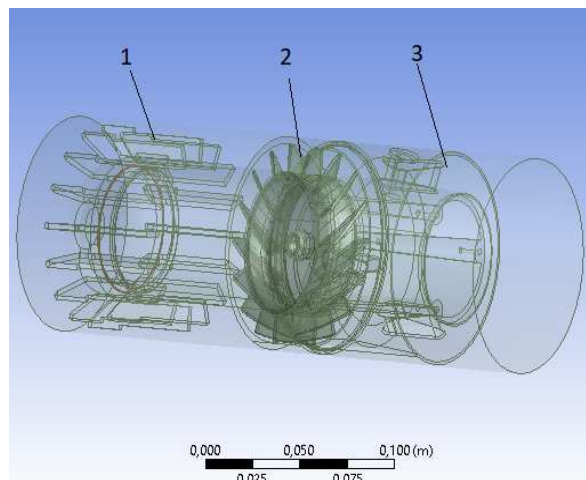


Рис. 1. CAD модель типового ТВПВ: 1 – передній обтічник, 2 – турбінка, 3 – задній обтічник

2. Створення сітчастої моделі (MESH) ТВПВ на базі геометричної моделі.

Для *CFD* розрахунків створена на попередньому етапі геометрія має бути представлена сіткою контрольних об'ємів. Розбиття твердотільної 3D-моделі на чарунки відбувається в сіткогенераторі *ANSYS Meshing*. Сітка складається з двох регіонів, а саме, регіону, де обертається турбінка, і іншого регіону, який включає передній і задній обтічники. Другий регіон є нерухомою зоною.

Побудована сітка (рис. 2) складається з елементів *tetrahedron*. За статистикою сітка налічує 2781313 елементів та 559735 вузлів. Метод побудови сітки обирався з метою досягнення оптимальної за часом і точністю збіжності розв'язку. Якщо дозволяють обчислювальні ресурси, то слід приділяти особливу увагу якості сітки навколо лопатей турбінки, зокрема на кінцях (торцях) лопатей.

3. Створення розрахункової моделі ТВПВ з сітчастої моделі шляхом накладання розрахункових умов.

В першу чергу, це набір рівнянь, які потрібно розв'язати, визначення межових умов і початкових параметрів в кожній чарунці всередині обчислювального домену.

Як вже було зазначено раніше, в регіоні турбінки передбачена сітка, що обертається, в інших

місцях домену сітка є нерухоною. Регіон, що обертається, і стаціонарні регіони поєднуються двома відповідними інтерфейсами. Опція руху у вигляді обертання (*Rotating*) задається для відповідного домену (*Domain Motion*). Швидкість обертання турбінки початково встановлювалася виходячи з експериментальних даних (рис. 3).

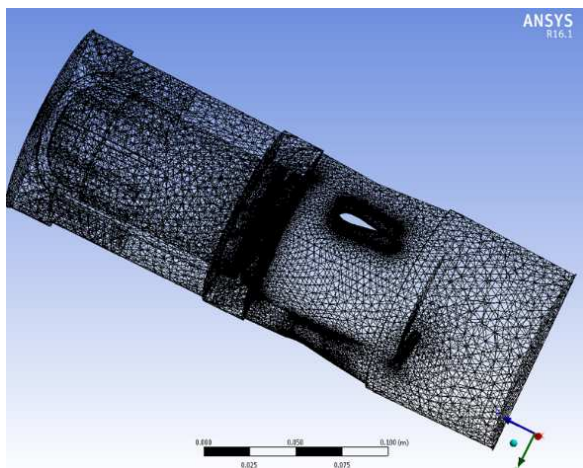


Рис. 2. Сітчаста модель ТВПВ

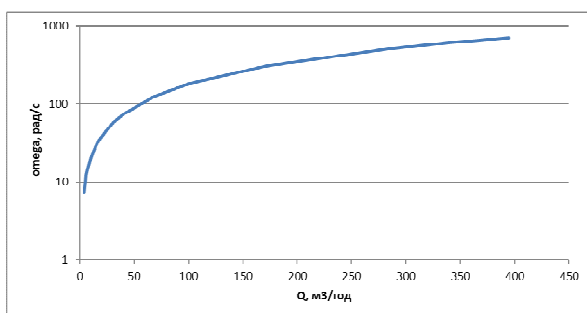


Рис. 3. Кутова швидкість типового турбінного витратоміра газу ω залежно від витрати Q

Крім того, створюється інтерфейс переходу потоку з виходу переднього обтічника на вхід турбінного чутливого елемента.

Для розрахунків використовувалася модель *k-epsilon* (2 eqn) зі стандартними *wall functions*. На вході задавалася масова витрата, на виході – відносний тиск.

Модельовання проводилося в діапазоні витрат $Q=4\div 400$ м³/год, вимірюваним середовищем для простоти експерименту обиралися повітря за температури 25 °С. В якості входних умов призначалася кожна з витрат, на якій працює ВПВ. Властивості вимірюваного середовища на даному етапі можна змінювати, зокрема в'язкість і густину, що дозволяє оцінити в подальшому їхній вплив на градувальну характеристику. Розрахункова модель представлена на рис. 4.

4. Пошук розв'язку для розрахункової моделі ТВПВ.

На даному етапі відбувається пошук таких значень параметрів в кожній чарунці, щоб у всьо-

му обчислювальному домені мали місце максимально вірні рівняння потоків. Завдяки методам чисельного розв'язку рівнянь система знаходить параметри, за яких досягається збіжність обчислювального процесу.

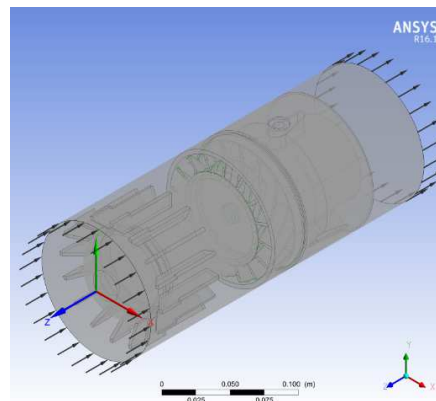


Рис. 4. Розрахункова модель ТВПВ

5. Аналіз результатів розрахунків.

Це фінальний етап дослідження, на якому порівнюються результати, отримані в ході чисельного експерименту, з результатами, отриманими в ході напівнатурного експерименту або в польових умовах. Завдяки *CFD* технологіям оцінюється поведінка ВПВ при взаємодії з вимірювальним середовищем з метою визначення калібрувальної функції, як результат функціональної залежності моментів, що діють на турбінку, та її кутової швидкості обертання, пропорційної витраті плинного потоку.

Покрокове виконання всіх зазначених вище п'яти етапів створення моделі ТВПВ газу призвело до отримання певних результатів, які слід обговорити.

Обговорення результатів

Візуальна інспекція ліній течії в обчислювальному домені, де обертається турбінка ВПВ газу (рис. 5), показує, що потік поводить себе так, як і очікувалося.

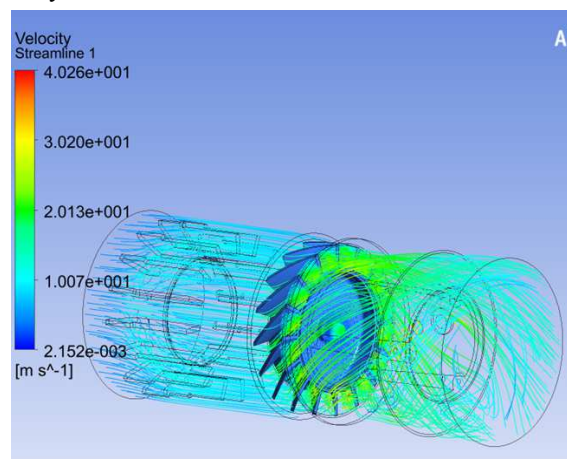


Рис. 5. Лінії течії у ТВПВ

В результаті ми отримали залежність рушійного моменту M від вимірюваної витрати Q , яка за своїм характером поведінки (рис. 6) подібна до наданої залежності $\omega = f(Q)$, отриманої за результатами експериментальних напівнатурних досліджень (рис. 3).

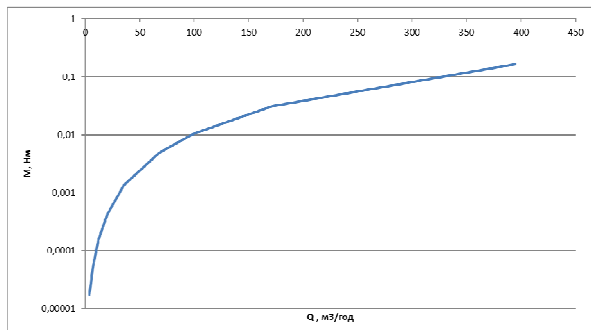


Рис. 6. Залежність рушійного моменту M від витрати Q для ТВПВ

Окрім того, були отримані вектори швидкостей (рис. 7) і лінії течії (рис. 8), що демонструють, як саме середовище рухається в середині витратоміра. Для прикладу показані дослідження на одній з витрат діапазону.

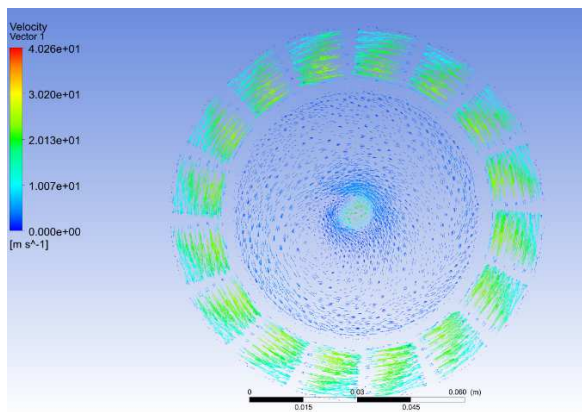


Рис. 7. Вектори швидкості вимірюваного середовища на турбінному колесі, отримані при моделюванні його роботи на витраті $171.6 \text{ м}^3/\text{год}$

Повністю відтворити під час моделювання залежність реальної кутової швидкості обертання турбіни в усьому діапазоні вимірюваних витрат не є можливим, оскільки ми не знаємо, яке саме тертя в опорах притаманне даному витратоміру, а то є дуже важливий чинник.

Отже, це задача в перспективі. Однак вважаємо, що отримання рушійного моменту і подібний характер його залежності (рис. 6) до залежності кутової швидкості обертання турбіни від витрати (рис. 3) дає змогу оцінити правильність нашого підходу до вирішення поставленої задачі і вести мову про адекватність нашої моделі реальному ТВПВ.

Висновки

В процесі дослідження було створено модель, яка має сітку, побудовану на взаємодії нерухокої структури і структури, що обертається. Це дає корисні відомості при уточненні калібрувальних характеристик, а отже, суттєво допомагає при проектуванні турбінних витратомірів.

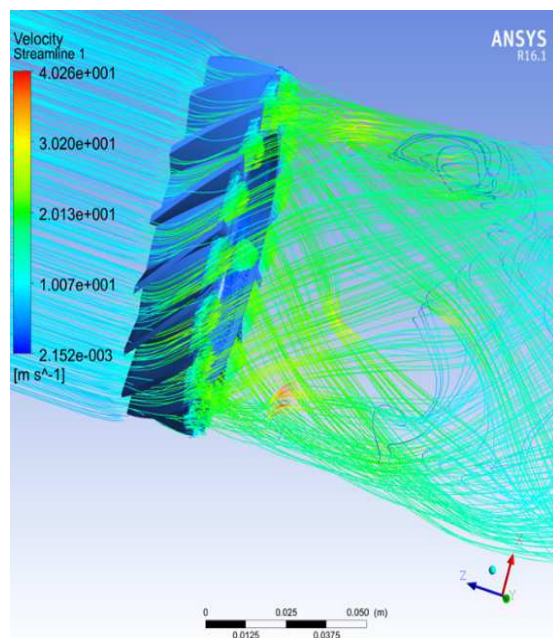


Рис. 8. Лінії течії вимірюваного середовища всередині витратоміра, отримані при моделюванні його роботи на витраті $171.6 \text{ м}^3/\text{год}$

В перспективі більш детальний аналіз поля потоку сприятиме отриманню певних знань, необхідних для покращення моделі і конструкції турбінних витратомірів газу. Зокрема, на наступних етапах буде проведено проробку різних варіантів витратомірної ділянки (змінення геометрії всього внутрішнього тракту) задля збільшення діапазону вимірювання, покращення чутливості приладу і зменшення перепаду тиску з виконанням параметричних досліджень в ході моделювання. Це дасть змогу пошуку оптимального варіанту турбінного витратоміра газу.

Є аспекти цієї моделі, які можна вдосконалити, щоб надати ще глибший характер розуміння роботи турбінних витратомірів. До моделювання слід включити модель тертя в опорних підшипниках. Це забезпечить додаткову точність, особливо на початку діапазону вимірювання.

Також можна вдосконалити сітку. Це було б необхідно для кращого дослідження явищ в зазорі між турбіною і корпусом або камерою, де вона обертається. Цікаво буде ретельно оцінити сліди обертання турбіни, що утворюються за нею в потоці. Отже, така покращена сітка сприятиме поліпшенню якості та оптимізації ефективності рішення.

Література

- [1] C. L. Tegtmeier, "Analysis of a Turbine Flow Meter Calibration Curve using CFD," *53rd AIAA Aerosp. Sci. Meet. Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, no. January, pp. 1–12, 2015.
- [2] Bunyamin, Nyayu Latifah Husni, Hasan Basri and Irsyadi Yani, "Challenges in Turbine Flow Metering System: An Overview", *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1198, Issue 4.
- [3] R. C. Baker, "Turbine flow meters: II. Theoretical and experimental published information", *Flow Meas. Instrum.*, 4(3), pp. 123–144, 1993.
- [4] Ю. Л. Тонконогий, А. Пядишюс, "Погрешность средств измерения, применяемых для учета газа," *Измерительная техника*, №5, с. 35–38, 1999.
- [5] П. Г. Круковский, А. С. Полубинский, Г. А. Пархоменко, Е. В. Цвященко, В. Н. Коваленко, "Анализ режимов работы турбинного расходомера газа с использованием аппроксимирующих расходно-частотных зависимостей," *Пром. теплотехника*, т. 29, № 6, с. 91–97, 2007.
- [6] S. Guo, L. Sun, T. Zhang, W. Yang, and Z. Yang, "Analysis of Viscosity Effect on Turbine Flowmeter Performance Based on Experiments and CFD Simulations," *Flow Meas. Instrum.*, 2013.
- [7] Z. Saboohi, S. Sorkhkhah, and H. Shakeri, "Developing a Model for Prediction of Helical Turbine Flowmeter Performance Using CFD," *Flow Meas. Instrum.*, 2014.
- [8] G. Suna, Z. Tao, and S. Lijun, "Blade Shape Optimization of Liquid Turbine Flow Sensor," *Trans. Tianjin Univ.*, pp. 144–150, 2016.
- [9] А. В. Сулинов, Л. С. Шаблий, "CFD-моделирование автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX": *электрон. метод. указания*, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), Самара, 2012. 47 с.
- [10] I. Gryshanova, "A Computational Investigation of Flow Meters," in *Proc. of 15th Int. Flow Measurement Conference 2010, FLOMEKO 2010*, Taipei, Taiwan, pp. 888–895.

УДК 681.121

И. А. Гришанова, И. В. Коробко*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***РАЗРАБОТКА CFD МОДЕЛИ ТУРБИННОГО РАСХОДОМЕРА ГАЗА**

Современное состояние исследований турбинных расходомеров газа показывает, что для реализации процесса выбора их оптимальных параметров применение лишь теоретического подхода является недостаточным, поскольку он во многом базируется на использовании эмпирических коэффициентов. Сейчас все более внедряют технологии вычислительной гидродинамики или CFD технологии, потому что именно они позволяют заглянуть внутрь процесса взаимодействия потока с чувствительным элементом, а значит учесть и компенсировать недостатки использованной ранее классической теории.

В этой статье описывается создание CFD модели турбинного расходомера газа, которая дает возможность воспроизвести работу его первичного преобразователя в процессе вращения и учесть особенности взаимодействия набегающего потока измеряемой среды с турбинкой. Приведена методология создания модели турбинного расходомера на базе 3D сетки с подвижной и стационарной частями в ANSYS CFX, которая далее может использоваться для оптимизации конструктивных параметров первичного измерительного преобразователя.

Ключевые слова: турбинный расходомер; CFD; калибровочная кривая; ANSYS CFX; измерительный преобразователь расхода.

Iryna Gryshanova, Ivan Korobko*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***DEVELOPMENT OF CFD MODEL OF TURBINE GAS METER**

The current state of research of gas turbine meters demonstrates that applying only theoretical approach is insufficient to implement the process of selecting of their optimal parameters, as it is largely based on the use of empirical coefficients. Now more and more computational hydrodynamics or CFD technologies are being implemented, because they allow to look inside the process of flow interaction with the sensitive element of the instrument, and thus take into account and compensate for the shortcomings of the previously applied classical theory.

This article describes the creation of a CFD model of a turbine gas flow meter, which makes it possible to reproduce the operation of its primary transducer during rotation and take into account the peculiarities of the interaction of the incoming flow of the measuring medium with the turbine. The methodology of creating a model of a turbine flowmeter based on a 3D mesh with moving and stationary parts in ANSYS CFX is presented. The methodology consists of five main stages, which can be supplemented, if necessary, by parameterization research to optimize the design parameters of the flow sensor. The developed model allows to build the calibration curve of the turbine flowmeter, changing the flow rate and physical properties of the measured substance, as well as to reach the stationary speed of the turbine. The

work began with a steady state model to provide an acceptable initial level as a condition for further modeling. These results can then be introduced into the transient state model.

During the simulation, the characteristic of torque change on the turbine wheel in the flow range was evaluated, streamlines and velocity vectors in the computational domain were obtained. The results of this model may be useful for future design of gas turbine meters.

Key words: turbine flow meter; CFD; calibration curve; ANSYS CFX; flow sensor.

Надійшла до редакції
26 жовтня 2020 року

Рецензовано
06 листопада 2020 року

УДК 621.382.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОНІВ У НІТРИДАХ ІНДІЮ І ГАЛІЮ

Саурова Т. А., Семеновська О. В., Ємельянов М. Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: saurowa-ee@lil.kpi.ua; helenseem-ee@lil.kpi.ua; memelianov-ee23@lil.kpi.ua

Нові можливості при створенні напівпровідникових приладів відкривають трикомпонентні напівпровідники. Одним з перспективних трикомпонентних напівпровідників є нітрид індію-галію $In_xGa_{1-x}N$, який розглядають як твердий сплав бінарних сполук – нітриду індію InN і нітриду галію GaN . Прогнозування перспектив створення приладів на основі $In_xGa_{1-x}N$ можливо при ґрунтовному дослідженні електричних властивостей складових його бінарних нітридів; нітриду індію і нітриду галію. У науковій літературі для вказаних нітридів переважають дослідження холлівської рухливості, температурна залежність якої описана у вузькому діапазоні значень концентрації домішки, та відповідність результатів моделювання експериментальним отримують введенням коригувальних коефіцієнтів.

Метою даної роботи є розрахунок для InN і GaN температурної залежності дрейфової рухливості електронів у широкому діапазоні ступеня легування напівпровідників і вибір вихідних параметрів матеріалів, що дозволяють отримати найкращу відповідність експериментальним результатам.

Для досліджених нітридів проведено чисельне моделювання процесів розсіювання для типових видів домішкового (на нейтральних атомах та іонах домішки) і фононного (акустичне, полярне оптичне, міждолинне) механізмів; розраховані та проаналізовані значення швидкостей розсіювання імпульсу. Вперше для нітридів індію та галію розрахована температурна залежність дрейфової рухливості електронів у широкому діапазоні значень концентрації легуючої домішки. Проведена верифікація результатів моделювання. Розраховані пошвидкісні характеристики методом релаксаційних рівнянь та зіставлені з результатами, отриманими методом Монте-Карло. Для досліджуваних нітридів запропоновані вихідні параметри, що забезпечують узгодження з експериментальними даними при моделюванні транспортних властивостей електронів у режимі слабого електричного поля.

Результати чисельного моделювання вказують на перспективність створення на основі InN і GaN висококоєфективних, швидкодіючих, потужних приладів різного призначення.

Ключові слова: нітрид індію; нітрид галію; розсіювання; дрейфова рухливість електронів; метод релаксаційних рівнянь.

Вступ

З кінця ХХ століття інтерес технологів, дослідників і розробників напівпровідникових приладів звернений до нітриду індію і галію, званими тринітридами. Експериментальні та теоретичні напрацювання вказують на їх перспективність при створенні електронних і оптоелектронних приладів з унікальними характеристиками [1].

Слід підкреслити, що нові можливості при створенні напівпровідникових приладів відкривають трикомпонентні напівпровідники. Одним з перспективних трикомпонентних напівпровідників є $In_xGa_{1-x}N$, який розглядають як твердий сплав бінарних сполук – нітриду індію InN і нітриду галію GaN .