

ВІДГУК

офіційного опонента д.т.н., проф. Гоц Н.Є. на дисертаційну роботу
Склярова Володимира Васильовича
«Розвиток методів вимірювань характеристик складних механічних і теплофізичних систем на основі комп’ютерного моделювання»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальність 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Актуальність теми

Сучасні промислові об’єкти являють собою сукупність взаємодіючих, функціонально самостійних технічних підсистем, в том числі і технічних пристройів з вимірювальними функціями, призначених для безпечної працездатності цих об’єктів.

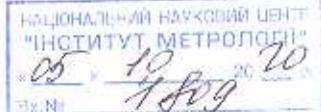
Зокрема складовими багатьох промислових об’єктів є механічні і теплофізичні системи. За своїм характером це складні системи, які є відкритими, а отже перебувають в стані постійної взаємодії з навколошнім середовищем, які постійно перебувають у стані внутрішньої зміни та трансформації в результаті впливу як внутрішніх, так і зовнішніх факторів. Зокрема, такі складні механічні і теплофізичні системи (СМТС) є в складі промислових енергогенеруючих об’єктів, національних еталонів України та технологій адитивного виробництва.

Більшість таких СМТС, які були створені ще в минулі десятиліття та мають напрацювання до декількох десятків років або ж їх термін експлуатації закінчується, потребують уточнення та подовження терміну їх експлуатації, що може бути визначено за результатами аналізу їх технічного стану.

На сьогоднішній день це проводиться двома шляхами:

- на основі використання системи вимірювань та контролю згідно технічної документації на об’єкт, в якій послідовно реалізуються такі етапи як визначення множини контролюваних параметрів, проведення вимірювань їх значень та оцінювання, визначення знаходження результатів вимірювань в заданих межах та прийняття рішення про технічний стан об’єкта. Але аналіз показав, що для СМТС, які вже функціонують не одне десятиліття, інформації про результати вимірювання нормованих показників недостатньо для визначення їх технічного стану;
- на основі використання експертної оцінки за результатами оцінювання стану СМТС (зокрема метод GIP для атомних реакторів) групою висококваліфікованих експертів, які на основі свого досвіду за затвердженою методикою висувають гіпотези про стан технічного об’єкта та його підсистем. Але експертний метод має високий ступінь суб’єктивізму, залежить від рівня фаховості експерта, а отже інформації, сформованої згідно думок експертів недостатньо для визначення технічного стану промислового об’єкта.

Отже, аналіз показує, що існуючі методи визначення технічного стану складних механічних і теплофізичних систем не надають достатньої інформації, необхідної для визначення технічного стану промислових об’єктів та потребують вдосконалення.



Шляхом вирішення цієї проблеми є використання додаткової інформації, отриманої шляхом комп’ютерного моделювання стану СМТС та її додаткове врахування при процесах вимірювання характеристик цих систем.

Тому метою роботи є розроблення науково-технічних зasad методології підвищення точності результатів досліджень характеристик складних механічних та теплофізичних систем на основі синтезу вимірювань, аналітичних розрахунків та комп’ютерного моделювання.

Для досягнення визначеної мети в роботі були вирішенні такі завдання:

- розроблені науково-технічних засади методології підвищення потенційної точності результатів дослідження складних механічних і теплофізичних систем з використанням моделювання їх характеристик;
- проведенні модельних досліджень у галузі вимірювань твердості та механічних характеристик сучасних полімерів для адитивного виробництва;
- досліджені теплофізичних характеристик складних систем;
- обґрунтована методологія аналізу існуючих методів кваліфікації обладнання енергоблоків АЕС з урахуванням подовження проскінного терміну експлуатації.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, забезпечується глибоким критичним аналізом літературних джерел, чітким формулюванням мети роботи, коректністю постановки і вирішення завдань дисертації, використанням ефективних сучасних методів дослідження, послідовним викладенням теоретичних та експериментальних результатів, отриманих на основі концепції невизначеності, чисельних методах вирішення рівнянь та економічних методах аналізу. Наукові положення, що виносяться на захист, обґрунтовані та доведені до необхідного наукового рівня, є новими та забезпечують істотний внесок у розвиток зasad підвищення точності результатів дослідження механічних і теплофізичних характеристик складних систем на основі синтезу вимірювань, аналітичних розрахунків і комп’ютерного моделювання є актуальною.

Достовірність теоретичних положень дисертаційної роботи підтверджується коректним застосуванням комп’ютерного моделювання під час доведення наукових результатів, зокрема дотриманням умов та заданих властивостей матеріалів при моделюванні фізичних процесів.

Отже, Скляровим В.В. отримані нові науковообґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують розв’язання важливого прикладного завдання у галузі метрології.

Наукова новизна дисертаційної роботи стосується методології підвищення точності результатів досліджень характеристик складних механічних і теплофізичних систем на основі синтезу вимірювань, аналітичних розрахунків і комп’ютерного моделювання, розроблено теоретичні та методологічні основи вимірювання механічних і теплофізичних характеристик складних систем на основі моделювання процесу вимірювання з урахуванням властивостей

матеріалів, додаткових чинників та умов проведення експериментальних досліджень, а саме:

- запропоновано комплексний розрахунково-експериментальний метод, що засновується на поєднанні сучасних комп'ютерних програм та результатів експериментальних досліджень складних систем, на відміну від існуючих наближених методів експертної оцінки, що дозволяє підвищити достовірність оцінки та прогнозування їхнього стану;

- досліджено критерій якості побудови скінченно-елементної моделі складної системи сучасними розрахунковими комплексами, на відміну від існуючих методів з недостатнім ступенем деталізації об'єкта дослідження, що дозволило підвищити точність результатів моделювання;

- запропоновано та обґрунтовано метод вимірювань характеристик складних механічних та теплофізичних систем на основі поєднання моделювання та вимірювань, що підвищило, зокрема, точність оцінювання ступеня еквівалентності національного еталона одиниць твердості за шкалами Роквелла та Супер-Роквелла при проведенні міжнародних звірень, завдяки додаванню додаткових чинників у рівняння вимірювання та бюджет невизначеності результату вимірювання;

- удосконалено метод розрахунку калориметричного перетворювача лазерного випромінення завдяки врахуванню в модельному рішенні температурного поля нелінійності коефіцієнта нееквівалентності заміщення, що підвищило точність вимірювання потужності та енергії лазерного випромінення;

- удосконалено методологію прогнозування механічних властивостей матеріалів з використанням моделювання та експериментального дослідження методів вимірювання твердості зразків матеріалу, яка, на відміну від існуючого методу оцінювання обладнання АЕС, передбачає прогноз старіння та дослідження критичних компонентів обладнання, що дозволило підвищити достовірність оцінки стану тепломеханічного обладнання АЕС;

- набули подальшого розвитку модельні рішення при дослідженні властивостей сучасних полімерних матеріалів, отриманих із застосуванням адитивних технологій та отримано властивості нових полімерних матеріалів, що дає можливість моделювати поведінку полімерних матеріалів залежно від впливних механічних факторів.

Практична цінність отриманих у дисертації результатів полягає в такому:

- запропоновано та впроваджено застосування комплексного розрахунково-експериментального методу оцінювання стану обладнання в роботах з подовження проєктного терміну експлуатації енергоблоків Рівненської АЕС, що дозволило підтвердити кваліфікацію до 98% обладнання енергоблоків АЕС;

- за результатами модельних рішень було уточнено значення розширеної невизначеності результатів вимірювань міжнародних звірень національного еталона за шкалами твердості Роквелла та Супер-Роквелла (ДЕТУ 02-04-99) за темами СООМЕТ-М-Н-S5 та СООМЕТ-М-Н-S3, що дозволило підтвердити метрологічні характеристики еталона;

- удосконалено метод розрахунку теплофізичних властивостей робочого еталона одиниці температури завдяки моделюванню теплового розподілу у стінці

температурної камери, що дозволило підвищити точність відтворення одиниці температури при виконанні робіт з калібрування еталонних термометрів;

- підвищено точність вимірювань за рахунок розширення діапазону відтворення потужності лазерного випромінення до 3 Вт та енергії лазерного випромінення до

3 Дж у державному первинному еталоні одиниць середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання (ДЕТУ 11-04-97).

Результати дисертаційної роботи впроваджено в метрологічну практику ТОВ «НВП Укрінтех», НПФ «Харків-Прилад», НВП «ЕЛВА», для оптимізації технології виробництва механічних елементів ультразвукових лічильників газу на ПрАТ «Енергооблік» та для розробки проекту Програми розвитку еталонної бази України на 2018–2020 рр.

Результати дисертаційної роботи використовуються у практиці кваліфікації обладнання на сейсмічні впливи енергоблоків Рівненської АЕС.

Оцінка структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Склярова В.В. складається зі вступу, шести розділів, висновків, додатків та переліку використаної літератури у вигляді окремого додатка. Загальний обсяг роботи складає 383 сторінки, з них основний текст – 297 сторінок; 178 рисунків за текстом, 90 таблиць за текстом, 4 таблиці на 4 сторінках; список використаних джерел із 292 найменувань на 33 сторінках; 9 додатків на 22 сторінках.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначені мета й задачі дослідження, а також коротко сформульовано основні результати, одержані в роботі; вказано їх значення для науки та практики, зв'язок роботи з науковими програмами, подано дані про структуру дисертації, апробацію та публікацію основних результатів роботи.

У першому розділі наведено аналіз складних механічних і теплофізичних систем промислових об'єктів, таких як енергогенеруючі об'єкти, національні еталони України та адитивне виробництво. Показано, що існуючі методи визначення технічного стану цих складних механічних і теплофізичних систем не надають достатньої інформації, необхідної для визначення технічного стану цих промислових об'єктів та потребують вдосконалення.

Проаналізовано чисельні методи комп'ютерного моделювання, які використовуються в різних галузях промисловості, які базуються на використанні широкого спектра диференційних рівнянь, відповідно до конкретної задачі. Обґрунтовано доцільність використання сучасних розрахункових комплексів комп'ютерного моделювання для підвищення точності результатів досліджень характеристик складних механічних та теплофізичних систем.

У другому розділі виконано дослідження точності результатів моделювання, які отримані з використанням сучасних програмних комплексів. Досліджено густину сітки скінчених елементів, вплив різних типів та розмірів скінчених елементів на розрахунки систем складної геометрії, виконано порівняльний розрахунок модельного рішення з аналітичним результатом.

Доведено, що при збільшенні розміру скінчених елементів, використовуваних для побудови скінченно-елементної моделі, незалежно від типу використовуваного скінченого елемента, спостерігається збільшення похиби отриманих результатів при зменшенні часу комп’ютерного розрахунку. Визначено, що зменшення розміру скінченого елемента також призводить до збільшення похиби результату моделювання, оскільки має місце накопичення похиби округлення результатів розрахунку. Встановлено залежність між похибкою отриманих результатів моделювання та розміром скінчених елементів, використовуваних для побудови скінченно-елементної моделі, що дозволяє оптимально визначити тип та розмір елемента в залежності від заданої похиби.

Показано, що значення вузлових температур багатошарової стінки, отримані методами Гауса та методом комп’ютерного моделювання, співпадають, а застосування розрахункових комплексів забезпечує необхідну точність розрахунків.

Отже, підтверджено достовірність модельних рішень у порівнянні з аналітичними розрахунками.

Третій розділ присвячено дослідженням застосування розрахункових комплексів моделювання в галузі твердометрії. Виконано дослідження полімерних матеріалів, які застосовуються в адитивному виробництві. Отримані результати важливі для оцінки проектного терміну експлуатації обладнання енергоблоків. Точність вимірювань та міжнародне визнання вимірювань твердості забезпечуються проведенням міжнародних звірянь та встановленням ступеня еквівалентності національного еталона України.

Проведено дослідження та виконано оцінювання впливу кожного з коефіцієнтів чутливості на розширену невизначеність результату вимірювань. На основі цього визначено найбільш впливові коефіцієнти чутливості бюджету невизначеності за шкалами Роквелла та Супер-Роквелла. На підставі виконаних досліджень було встановлено, що глибина вдавлення сталевого сферичного індентора не більш ніж на 2,5 мкм менша, ніж глибина вдавлення карбід-вольфрамового сферичного індентора за тих самих умов виконання вимірювань (для різних металів). Значення твердості відрізняються не більш ніж на 0,3 HRB, що знаходиться в межах розширеної невизначеності для Роквелла HRB. Результати моделювання підтверджуються експериментальними дослідженнями.

Таким чином, отримані результати застосовані при розрахунку міцності виробів аналітичними методами і методом скінчених елементів у різних розрахункових комплексах комп’ютерного моделювання.

У четвертому розділі проведено моделювання теплофізичних властивостей національних еталонів теплових величин. Досліджено розподіл температурного поля у багатошаровій стінці калібратора температури та чинники, що впливають на характеристики. Проведено розрахунки з використанням реальних температур експлуатації при різних коефіцієнтах конвекції на поверхні корпусу калібратора.

За результатами модельних розрахунків запропоновано конструктивне рішення побудови камери термостата калібратора температури, що дозволило зменшити з 120 хвилин до 50 хвилин час виходу в робочий режим термостабілізації.

Запропоноване конструктивне рішення на основі модельних розрахунків температурного поля, забезпечує підтримання стабільного температурного режиму калібратора без збільшення споживаної потужності.

Досліджено температурні розподіли та енергетичні параметри в галузі лазерної метрології. За результатами комп'ютерного моделювання розподілу температурного поля в першому перетворювачі лазерного випромінювання для різних рівнів енергії, запропонована конструкція перетворювача, що дозволила розширити діапазон вимірювання потужності від 1 кВт до 3 кВт та енергії від 1 кДж до 3 кДж.

У п'ятому розділі на прикладі енергогенеруючих об'єктів сформовано розрахунково-експериментальний метод визначення стану промислових об'єктів на основі синтезу вимірювань, аналітичних розрахунків та комп'ютерного моделювання, який дас можливість підвищити точність результатів досліджень характеристик цих об'єктів.

Отримані цим методом результати дали змогу за результатами дослідження характеристик енергогенеруючих об'єктів прийняти рішення про подовження проектного терміну експлуатації енергоблоків АЕС України.

Зокрема, на підставі отриманих результатів, прийнято рішення про стійкість обладнання до сейсмічних впливів. Визначено антисейсмічні заходи (додаткове закріплення, застосування гасять вібрацію демпферів) для обладнання, яке не пройшло випробування. На основі цих випробувань у грудні 2010 року з використанням РЕМ продовжено проектні терміни експлуатації першого і другого енергоблоків типу ВВЕР-440 (проект В-213) Рівненської АЕС.

У шостому розділі на підставі виконаного моделювання, яке враховувало додаткові фактори впливу, виконано уточнення значень розширеної невизначеності національних еталонів в галузі твердометрії, що дозволило підвищити точність оцінювання результату міжнародних звірень за темами СООМЕТ-М-Н-К3 та СООМЕТ-М-Н-С5.

За результатами моделювання було уточнено значення розширеної невизначеності результату вимірювань на ДЕТУ 02-04-99 для діапазонів 80-100 HRBW за шкалою Роквелла та діапазонів 47-53 HR30T і 70-82 HR30T за шкалою Супер-Роквелла, що підвищило точність оцінювання метрологічних характеристик на 4 %.

За результатами міжнародних звірень, національний еталон України у галузі твердометрії за шкалами Роквелла та Супер-Роквелла підтвердив свої метрологічні характеристики.

У висновках сформульовані найважливіші результати досліджень.

У додатках наведено розрахункові лістинги для комп'ютерного моделювання у галузі твердометрії та температурних вимірювань. Подано акти впровадження на науково-виробничих підприємствах результатів дисертаційного дослідження. Приведено регуляторні документи НАЕК Енергоатом України щодо прийняття до застосування результатів дисертації при кваліфікації обладнання енергоблоків Рівненської АЕС.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Результати досліджень за темою дисертації викладено у 54 наукових працях, з

яких 17 одноосібні, у тому числі: 22 наукові статті у фахових виданнях, з яких 6 - у виданнях, що входять до міжнародних наукометрических баз. Подано 30 доповідей на 18 науково-технічних міжнародних конференціях і семінарах, у тому числі на 10 закордонних. Опубліковано 5 наукових праць у виданнях, що включені до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, та у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus. Розміщено 13 тез доповідей у базі даних Scopus.

Основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Перелік публікацій, їх міст та обсяг відповідають темі дисертації, повністю відображають основні положення виконаних досліджень і не суперечать висновкам роботи.

До переваг виконаних досліджень слід віднести системний підхід при вирішенні комплексної проблеми поєднання моделювання та вимірювань з урахуванням додаткових чинників у рівняння вимірювання та бюджет невизначеності результата вимірювання.

Оцінка мови і стилю дисертації та автореферату. Ідентичність змісту автореферату і дисертації

Стиль викладення матеріалу дисертації і автореферату – науковий, послідовний, чіткий та лаконічний. Використана у роботі наукова термінологія є загальновизнаною.

Мова викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій практично завжди забезпечує доступність їх сприйняття.

Висновки до кожного розділу, і дисертації в цілому, відображають суть виконаних досліджень.

Структура роботи і стиль викладення матеріалу відповідають вимогам до докторських дисертацій.

Зміст та об'єм автореферату повністю ідентичний до змісту й основних положень дисертації та відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України до авторефератів.

Результати наукових досліджень, за якими здобувач в 2007 р. захистив кандидатську дисертацію «Методи та засоби забезпечення єдності вимірювань об'ємної активності радону-222 в Україні», за спеціальністю 05.01.02 - стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення, не виносяться на захист даної докторської дисертації.

Зауваження до змісту і представлення дисертації

1. Доцільно було би в списку літератури подати перелік нормативних документів та методів вимірювання, згідно яких на сьогодні відбувається визначення технічного стану складних механічних та теплофізичних систем енергогенеруючих об'єктів, національних еталонів та адитивного виробництва.

2. Доцільно подати окремі формулювання, яким чином запропонована у дисертаційному дослідженні методологія застосовується відповідно для енергогенеруючих об'єктів, для національних еталонів та для адитивного виробництва?

3. В розділі 2 доцільно було би подати порівняльну таблицю методів в залежності від їх точності, відповідних властивостей об'єкта, умов використання та інших чинників. Це б дозволило значно скоротити поданий матеріал, викладений на 70 сторінках.

4. В роботі доцільним було би провести порівняльний аналіз отриманих автором результатів з нещодавніми науковими розробками, зокрема з методами, запропонованими Маловиком К.М. в дисертаційній роботі «РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ».

5. В рисунках 3.14 та 3.15 на сторінці 182 не позначена вісь X.

6. Доцільним було би проаналізувати яким чином змінюється точність визначення стану об'єкту при застосуванні рівнянь вимірювання 3.11, 3.14 та 3.15?

7. Потребує пояснення вибір температурного діапазону на рисунку 4.17 при моделюванні температурного розподілу у калориметричному первинному перетворювачі, а саме температури 318,15K; 358,15K; 373,15K; 573, 15 K. Як відомо, ці перетворювачі працюють при значно вищих температурах.

8. В роботі є деякі термінологічні неточності та описки, наприклад на сторінці 260 вжито слово «температурі» замість «температури»; на сторінці 261 написано «по всієї зовнішньої поверхні»; на сторінці 94 «запропонованого методу, рівняння якого вимірювання засноване на співвідношенні» та ін.

9. Доцільно уточнити структурну схему розрахунково-експериментального методу на сторінці 270, зокрема умови вибору «Рішення про кваліфікацію» та «Рішення про заміну обладнання».

Висновок про відповідність дисертації вимогам Міністерства освіти і науки України

Дисертаційна робота Склярова В.В. є завершеною працею і містить нове вирішення актуальної науково-прикладної проблеми в сфері підвищення точності результатів досліджень механічних і теплофізичних характеристик складних систем на основі синтезу вимірювань, аналітичних розрахунків і комп'ютерного моделювання. Теоретичні положення дисертації можуть бути основою для вдосконалення національних еталонів України в галузі механічних та теплофізичних вимірювань. Практичне використання результатів роботи підтвердило цінність отриманих автором результатів.

Мета роботи, поставлені та розв'язані в ній завдання досліджень, викладені основні наукові результати дають можливість зробити висновок про те, що дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення.

Робота вносить суттєвий вклад у науку і має практичне значення. Зміст дисертації свідчить про високий рівень кваліфікації автора, як науковця. Відзначенні недоліки й зауваження не впливають на вагомість результатів та їх практичну значимість.

На підставі проведеного аналізу дисертації «Розвиток методів вимірювань характеристик складних механічних і теплофізичних систем на основі комп'ютерного моделювання» можна зробити висновок про те, що за актуальністю, науковим рівнем, отриманими науковими результатами та практичною цінністю робота відповідає вимогам п. 9, 10, 12 – 14 Постанови КМУ «Порядок присудження наукових ступенів» від 24.07.2013 № 567 (зі змінами), які ставляться до докторських дисертацій, Наказу Міністерства освіти і науки «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» від 12.01.2017 № 40, чинним пунктам Наказів Міністерства освіти і науки України «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук» від 23.09.2019 р. №1220 та Листу МОН України від 04.12.2015 р. № 1/9-586 «Про опублікування результатів дисертацій у періодичних виданнях», а її автор Володимир Васильович Скляров заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення.

Офіційний опонент,
професор кафедри
інформаційно-вимірювальних технологій
Національного університету
«Львівська політехніка»,
Д.т.н., професор

Гоц Н.Є.

Під час захисту
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»
к.т.н., доцент

Брилинський Р.Б.

