

## **НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 681.2.001.2:681.2.001.8:681.2-2

### **МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИЛИ СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

*Беспалов В.О., Гераїмчук М.Д., Нікітін О.К., Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*У статті на прикладі пружних вимірювальних перетворювачів сили розглядається методика оптимізації геометричних розмірів з використанням системи 3D-моделювання й конструювання SolidWorks у сполученні з додатком до неї COSMOS Works*

#### **Вступ. Постановка проблеми**

Відомо, що виготовлення конкурентноздатної продукції, пошук ефективних конструкцій пружних вимірювальних перетворювачів, пов'язано з необхідністю проведення оптимізації та достатньо об'ємних розрахунків, це є достатньо складним процесом і вимагає використання нових інформаційних технологій. Правильний вибір програмного забезпечення дозволяє значно підвищити продуктивність роботи при конструюванні та дослідженнях складних конкретних об'єктів. З цього погляду становить інтерес використання системи 3D-моделювання й конструювання Solid Works у сполученні з додатком до неї COSMOS Works при оптимізації геометричних розмірів складних пружних конструкцій методом кінцевих елементів. Можливості системи розглянемо на конкретному прикладі проектування пружних вимірювальних перетворювачів сили консольного виду (консольної балки) з поперечними отворами. 3D-модель пружного елемента, один з торців якого жорстко закріплений, а на верхню грань в області, близької до протилежного торця діє сила, спрямована вниз, що дорівнює 130Н, приведена на рис. 1. Розрахунки й оптимізація параметрів пружного елемента проводилася методом кінцевих елементів.

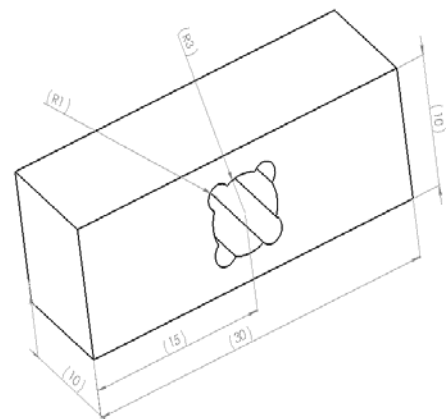


Рисунок 1 – 3D-модель чутливого елемента з отвором довільних розмірів

#### **Попередній аналіз конструкції чутливого елемента**

На попередньому етапі аналізу конструкції чутливого елемента (ЧЕ), який не

вимагає високої точності обчислення, припускаємо, що розміри елементів сітки (геометричні розміри кінцевих елементів) приймаються рівними розміру, заданому за замовчуванням програмно COSMOS Works. Одержану 3D модель пружного елемента в деформованому стані наведено на рис.2.

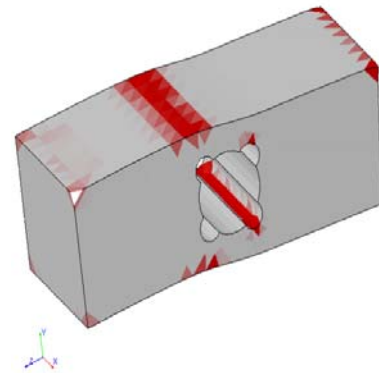


Рисунок 2 – Результати попереднього розрахунку ЧЕ

На наведеній колірній шкалі відображена відповідна відносна деформація поверхневого шару пружного елемента. З рис. 2. видно, що значення максимальної деформації відповідає верхній межі колірної шкали, і дорівнює  $1,532 \cdot 10^{-4}$ . Отримане значення максимальної відносної деформації майже на порядок менше необхідного, тому потрібно провести оптимізацію конструктивних параметрів пружного елемента, тобто діаметра великої й чотирьох малих окружностей, що утворюють отвір.

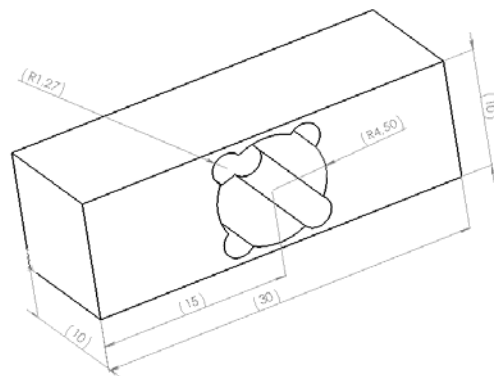


Рисунок 3 – Модель ЧЕ з оптимізованими геометричними розмірами отвору

### **Оптимізація геометричних параметрів чутливого елемента**

Для проведення оптимізації в додатку COSMOS Works обирається режим оптимізації та вказуються:

- розміри, які потрібно оптимізувати;
- межі зміни параметрів, що характеризують деформацію.

Для оптимізації потрібно вказати як межу зміни параметрів, що характеризують деформацію, вузький інтервал, що знаходиться в області бажаного значення відносної деформації й крок його зміни, рівним 50% розміру інтервалу. В процесі оптимізації програмно змінюються геометричні розміри.

Для аналізованої конструкції вибрані наступні параметри:

- у якості розмірів, що оптимізуються, діаметр великої й чотирьох малих окружностей, що утворюють отвір у моделі;
- межі зміни параметрів: діаметр великого отвору – від 3 до 9 мм і діаметр чотирьох малих – від 2 до 4 мм:
- мінімізацію маси моделі;
- інтервал зміни максимальної відносної деформації в межах від  $0,9 \cdot 10^{-3}$  до  $1,1 \cdot 10^{-3}$  із кроком зміни, рівним 50%.

На першому етапі оптимізації, програма виконує декілька кроків розрахунку (тривалість розрахунку залежить від зазначеної точності попереднього розрахунку, заданих меж інтервалів зміни параметрів моделі та потужності комп'ютера), по закінченні яких надає як результат модель з оптимізованими геометричними розмірами, що представлена на рис. 3.

На наступному етапі проводиться розрахунок моделі повторно, включаючи обчислення сітки, для перевірки правильності оптимізації. З рис. 4 видно, що після оптимізації значення максимальної відносної деформації відповідає величині  $1,148 \cdot 10^{-3}$  і максимальна деформація знаходиться на циліндричних поверхнях малого діаметра.

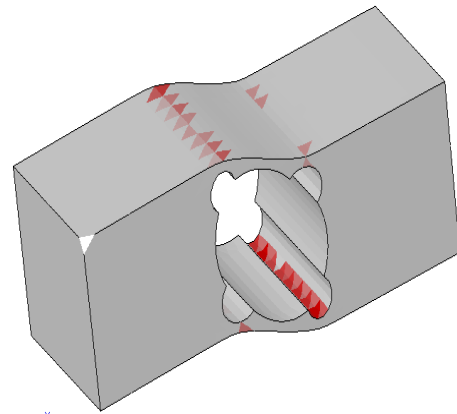


Рисунок 4 – Результати повторного розрахунку ЧЕ з оптимізованими геометричними розмірами отвору

На третьому етапі проводиться розрахунок з максимальною точністю. Перед проведенням точного розрахунку округлено підбрані програмно розміри до наступних розмірів:

$$R_{\text{мал}} = 1,27 \text{ мм} \approx 1,3 \text{ мм} \Rightarrow D_{\text{мал}} = 2,6 \text{ мм};$$

$$R_{\text{вел}} = 4,50 \text{ мм} = 4,5 \text{ мм} \Rightarrow D_{\text{вел}} = 9 \text{ мм}.$$

Для збільшення значення максимальної відносної деформації на поверхні збільшимо діаметр малих окружностей, що беруть участь в утворенні отвору в ЧЕ, на 0,3 мм і проведемо точний розрахунок моделі з вищевказаними розмірами (рис. 5).

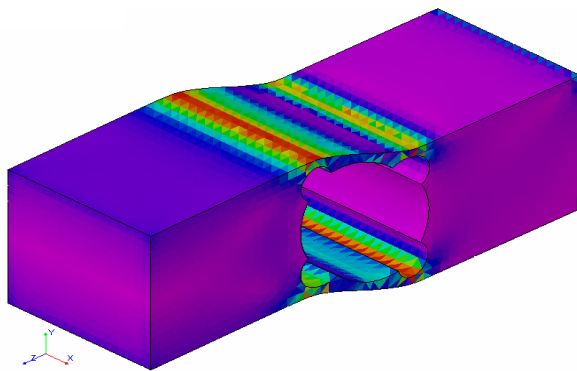


Рисунок 5 – Результати точного розрахунку з оптимізованими й округленими геометричними розмірами отвору

Аналіз результатів точного розрахунку моделі верхній поверхні ЧЕ дорівнює наближено  $1,022 \cdot 10^{-3}$ . Це значення деформації цілком відповідає використанню фольгових тензорезисторів.

Для визначення ділянки ЧЕ з максимальним значенням відносної деформації, на якій можна приклеювати тензорезистори, побудуємо епюри відносної

деформації. Такою ділянкою, як показав попередній аналіз є верхня поверхня ЧЕ над малими окружностями.

Для побудови епюри відносної деформації ділянки ЧЕ використовується графічний редактор с елементом управління «піпетка» (наприклад Adobe PhotoShop). Результати моделювання для аналізуемого прикладу представлені на рис. 6 і у вигляді табл. 1.

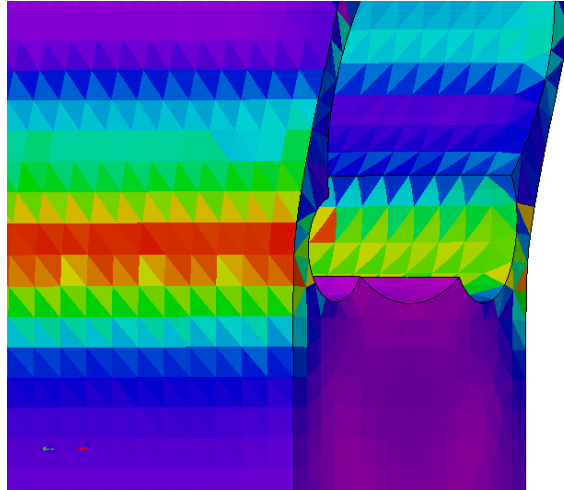


Рисунок 6 – Область ЧЕ, що призначена для наклепки тензорезисторів

Таблиця 1 – Розподіл відносної деформації

1																						
2	$1,892 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$3,122 \cdot 10^{-4}$	$3,97 \cdot 10^{-4}$	$5,109 \cdot 10^{-4}$	$5,961 \cdot 10^{-4}$	$8,515 \cdot 10^{-4}$	$9,272 \cdot 10^{-4}$	$1,022 \cdot 10^{-3}$	$9,537 \cdot 10^{-4}$	$7,465 \cdot 10^{-4}$	$6,074 \cdot 10^{-4}$	$4,995 \cdot 10^{-4}$	$4,258 \cdot 10^{-4}$	$3,974 \cdot 10^{-4}$	$3,970 \cdot 10^{-4}$	$3,122 \cdot 10^{-4}$	$2,895 \cdot 10^{-4}$	$2,384 \cdot 10^{-4}$	$1,845 \cdot 10^{-4}$	$1,136 \cdot 10^{-4}$	$0,908 \cdot 10^{-4}$
3	8,55 мм	8,85 мм	9,15 мм	9,45 мм	9,75 мм	10,05 мм	10,35 мм	10,65 мм	10,95 мм	11,25 мм	11,55 мм	11,85 мм	12,15 мм	12,45 мм	12,75 мм	13,05 мм	13,35 мм	13,65 мм	13,95 мм	14,25 мм	14,55 мм	14,85 мм

У першому рядку табл. 1 наведене колірне відображення розподілу деформацій по довжині ЧЕ, у другому рядку – чисельне значення деформації, що відповідають кольору, у третьому рядку – відстань від площини закріплення ЧЕ до відповідної точки на поверхні елемента.

Для наглядності і більш практичного використання представимо епюру деформацій у вигляді графіка (рис. 7).

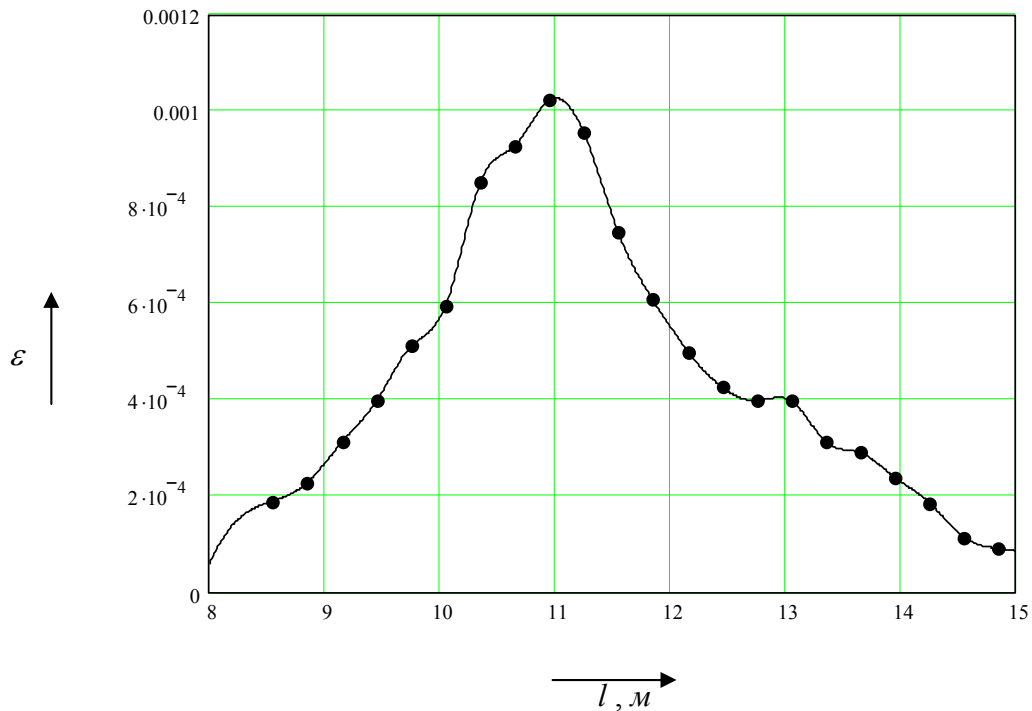


Рисунок 7 – Епюра деформацій ділянки наклейки тензорезисторів

### Визначення місця наклейки тензорезисторів і середньої відносної деформації по довжині бази тензорезистора

Враховуємо, що початок бази тензорезистора повинен знаходитися на відстані в 9 мм від площини закріплення ЧЕ, позаяк довжина бази тензорезистора дорівнює 5 мм. В цьому випадку тензорезистор буде зазнавати найбільші деформації. Епюра відносних деформацій показує, що центри баз тензорезисторів повинні бути розташовані на лінії, паралельній площині закріплення ЧЕ, що лежить на верхній або на нижній поверхні ЧЕ (крім країв цієї лінії, і ближче до її центра), що перебуває на відстані 11.5 мм від площини закріплення (рис. 8). Одна пара тензорезисторів повинна знаходитися на верхній поверхні ЧЕ (тензорезистори будуть зазнавати деформацію розтягання), а друга пара – на нижній поверхні ЧЕ (тензорезистори будуть зазнавати деформацію стиснення).

Для визначення абсолютних значень максимальних відносних деформацій розтягання й деформацій стиснення, які будуть зазнавати тензорезистори обчислимо середнє значення відносної деформації по довжині бази тензорезистора (5 мм). Для визначення цього значення візьмемо інтеграл у межах (9 ... 14 мм) від сплайн-функції, отриманої шляхом інтерполяції в програмному пакеті MathSoft MathCAD, (рис. 7 – суцільна лінія), що проходить через крапки, зображені на рис. 7, і розділимо значення інтеграла на довжину інтервалу інтегрування. Внаслідок обчислень одержимо:

$$\epsilon_{cp(F_{max})} = \frac{\int_9^{14} spl(x) dx}{14 - 9} = 5,642378 \cdot 10^{-4}$$

Тоді абсолютні значення максимальних відносних деформацій розтягання й деформацій стиснення, які будуть зазнавати тензорезистори, будуть складати  $5,642378 \cdot 10^{-4}$ .

Схему розташування тензорезисторів на 3D-моделі ЧЕ наведено на рис. 8.

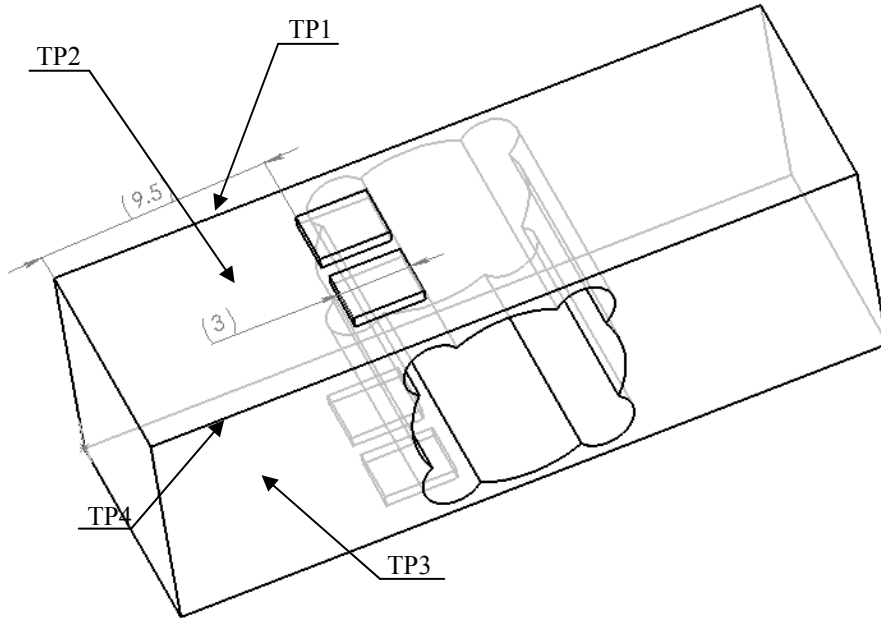


Рисунок 8 – Схема розташування тензорезисторів

**Побудова статичної характеристики вимірювального перетворювача сили**

Для побудови статичної характеристики вимірювального перетворювача сили – залежності максимальної відносної деформації від величини прикладеної сили, задамо зміну вхідної величини ( сили) із кроком 10Н в діапазоні від 0Н до 130Н. Результати обчислень представлені у вигляді табл. 2.

Таблиця 2 – Статична характеристика вимірювального перетворювача

Сила, Н	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Максимальна відносна деформація	0	$8,467 \cdot 10^{-5}$	$1,696 \cdot 10^{-4}$	$2,545 \cdot 10^{-4}$	$3,393 \cdot 10^{-4}$	$4,241 \cdot 10^{-4}$	$5,089 \cdot 10^{-4}$	$5,933 \cdot 10^{-4}$	$6,786 \cdot 10^{-4}$	$7,634 \cdot 10^{-4}$	$8,482 \cdot 10^{-4}$	$9,331 \cdot 10^{-4}$	$1,018 \cdot 10^{-3}$	$1,102 \cdot 10^{-3}$

За даними табл. 2 побудуємо графік залежності  $\epsilon_{\max}(F)$  (рис. 9).

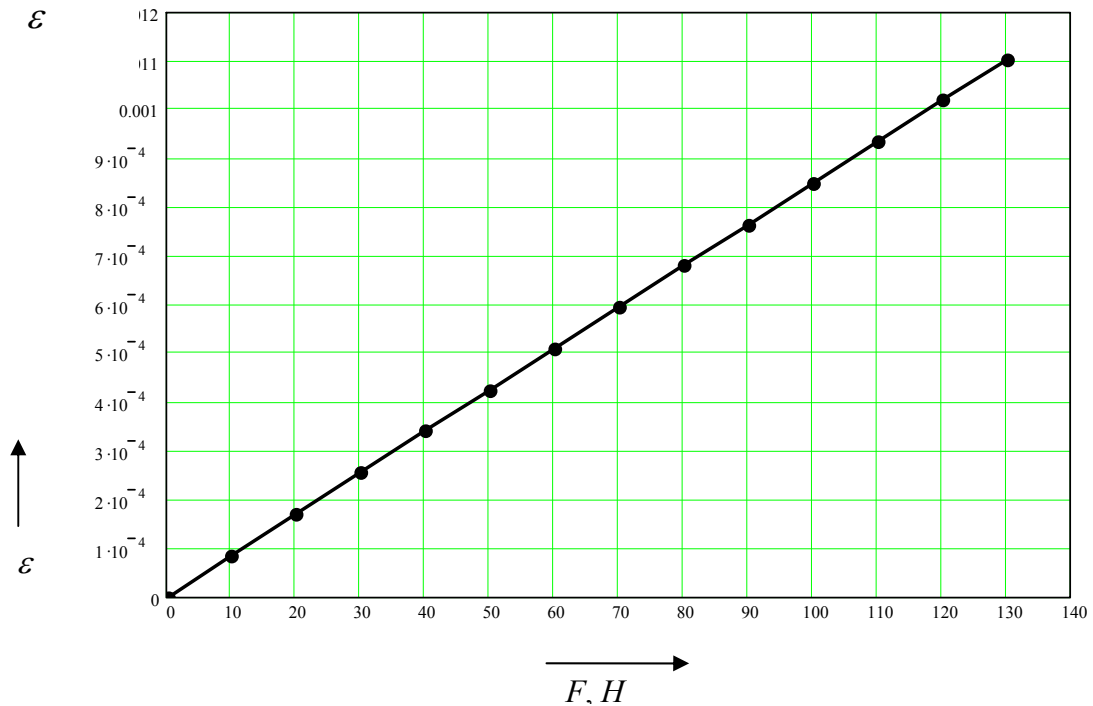


Рисунок 9 – Залежність максимальної відносної деформації від величини сили, що прикладена

Аналіз статичної характеристики (рис. 9) показує, що залежність значення відносної деформації в певній точці поверхні й прикладеною силою має лінійний характер.

### Висновки

Розроблена методика розрахунку та оптимізації геометричних розмірів з використанням системи 3D-моделювання й конструювання SolidWorks у зв'язці з додатком до неї COSMOS Works, може використовуватись для подальшого дослідження різних форм чутливих елементів, виконаних з різних матеріалів і дозволяє значно прискорити процес конструювання.

<p>Беспалов В.О., Гераимчук М.Д., Никитин А.К. <b>Методика оптимизации геометрических размеров чувствительных элементов измерительных преобразователей силы сложной формы</b> В статье на примере измерительных упругих преобразователей силы рассмотрена методика оптимизации их геометрических размеров с помощью использования системы 3D-моделирования и конструирования SolidWorks совместно с дополнением к ней COSMOS Works.</p>	<p>Bespalov V.O., Geraimchuk M.D., Nikitin O.K. <b>Method of optimisation the parameters devices force of the forme complexity</b> There article we consider device end optimization to use the system Solid Works end COSMOS Works.</p>
---	--

Надійшло до редакції  
27 травня 2005 року

УДК 681.121.42

## МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ І ПЕРЕХІДНИХ ВИТРАТНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИТРАТОМІРА ГАЗУ ТУРБІННОГО ТИПУ

<sup>1)</sup>Полубінський А.С., <sup>1)</sup>Круковський П.Г., <sup>1)</sup>Яцевський В.А., <sup>2)</sup>Тонконогий Ю. Л., <sup>1)</sup>Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, Україна; <sup>2)</sup>Литовський енергетичний інститут, м. Каунас, Литва

*На підставі розробленої авторами за допомогою CFD технологій комп'ютерної моделі турбінного витратоміра проаналізовані частотно-витратні характеристики в статичних і динамічних умовах, а також помилки вимірювання та запропоновані шляхи їх зменшення*

### **Вступ. Постановка задачі**

В умовах дефіциту і перманентного дорожчання енергоресурсів їх достовірний і точний облік при транспортуванні і використуванні має велике значення для ефективного функціонування економіки. Оцінка ефективності й доцільності впровадження різних енергозберігаючих технологій та організаційних заходів можлива тільки за наявності точного обліку. Одним з найважливіших джерел енергії є природний газ, що забезпечує функціонування і розвиток енергетики багатьох країн світу. Річне споживання природного газу в Україні, наприклад у 2005 р., складе близько 76,46 млрд. м<sup>3</sup>, або у вартісному виразі 3,823 млрд. доларів при вартості 50\$ за 1000 м<sup>3</sup>. У 2005 р. Росія продає газ в Польщі за вартістю 130\$, Угорщині дещо більше 140\$ за 1000 м<sup>3</sup>. З наступного 2006 р. року очікується наступний підйом цін, зокрема для України обговорюється ціна 160\$ за 1000 м<sup>3</sup>; що складе суму (у разі придбання всього об'єму необхідного країні газу за ринковою ціною) близько 12,2 млрд. доларів. Процеси транспортування та споживання природного газу супроводжуються втратами (з різних причин) близько 2% споживаної за рік кількості, що складає у варіюваному діапазоні цін від 50\$ до 160\$ суму 76÷245 млн. доларів. Ці цифри визначають важливість достовірного і точного обліку газу, оскільки поліпшення точності обліку навіть на десяті або соті частки відсотка принесе підприємствам, комунальному сектору і країні в цілому істотну економію фінансових ресурсів, а також з'явиться істотним стимулом до упровадження комплексу сучасних енергозберігаючих технологій.

Не дивлячись на те, що в Україні експлуатується більше 50 типів лічильників газу, внесених в Державний реєстр, основним засобом вимірювання в розподільних мережах є турбінні лічильники газу [1, 2]. Вони враховують (60–80)% всього споживаного газу. В основному турбінні лічильники використовують у випадках великого і середнього споживання газу. Їх максимальна межа вимірювання доходить до (16-25) тис. м<sup>3</sup>/год за реальних умов вимірювання, або з урахуванням тиску газу, який може бути до 50 бар і вище, до 1 млн. нормальних м<sup>3</sup>. Одна з основних чинників звичайно існуючого негативного балансу поставки і споживання газу - недоліки обліку, зокрема систематичні похибки негативного знаку деяких засобів вимірювання [3], – зазвичай в області мініма-



льної витрати. Крім основної систематичної похибки, що визначена при калібруванні, для турбінних лічильників можливі й деякі додаткові, пов'язані з:

1. Якістю монтажу лічильника – наявністю ексцентриситету, виступаючих прокладок, овальністю труб і відмінністю їх діаметру лічильника.

2. Нерівномірністю по перетину і закруткою потоку. Для усунення впливу цих явищ відповідно до рекомендацій РТВ (Німеччина) [4] перед лічильником слід встановлювати пряму ділянку, а в деяких випадках і струмененаправлювача.

У процесі експлуатації лічильників з рухомими частинами у випадку, якщо газ недостатньо обчищений і відсутня система періодичного змашування підшипників, крива похибки через знос підшипників за 1-2 роки опускається до  $(1 \div 1,5)\%$ . Можливе також протилежне явище, коли в початковій стадії експлуатації через притирання рухомих частин похибка змінюється у позитивному напрямі. Похибка може зміщуватися також в позитивному напрямі за наявності періодичних і стохастичних пульсацій потоку залежно від частоти і амплітуди основних гармонік пульсацій. В окремих випадках похибка може зростати на десятки відсотків.

Не дивлячись на велику кількість публікацій, присвячених питанням проектування, вивченню характеристик турбінних лічильників (ці лічильники часто називають турбінними витратомірами) в різних умовах експлуатації присвячено порівняно мало уваги, а багато аспектів проблеми не знайшли вичерпного рішення. До тепер не існує досконалих методів прогнозування метрологічних характеристик лічильників, зокрема названих похибок.

Вивчення турбінних лічильників проводилося як в експериментальному, так і у теоретичному напрямках [5]. Теоретичний аналіз здебільшого ґрунтувався на спрощених моделях із зосередженими параметрами [2, 6-11]. Одна з найвідоміших вживаних моделей – модель Аткинсона [6]. Більшість моделей не повною мірою враховують усі істотні чинники і конструктивні особливості, а у низці випадків страждають зайвим ступенем ідеалізації фізичних процесів.

Таким чином, наразі існуючі розрахункові методи прогнозування метрологічних характеристик витратомірів, що враховують локальні особливості їх просторової конструкції і взаємодію з вимірюваним середовищем, вельми обмежені. Робіт, заснованих на вживанні до турбінних витратомірів сучасних польових моделей і заснованих на них комп'ютерних CFD (Computational Fluid Dynamics) технологій, практично немає. Тим часом саме ці моделі й технології дозволяють достатньо повно і детально аналізувати поля тиску, швидкостей і температур, досліджувати статичні та динамічні характеристики витратомірів, оптимізувати параметри приладів, і, зрештою, прогнозувати метрологічні характеристики витратомірів. Ці моделі можуть бути вельми корисні при розробці приладів і створенні для цього автоматичних електронних коректорів різних джерел похибок вимірювань, пов'язаних із зовнішніми й внутрішніми умовами експлуатації, що адаптуються до умов експлуатації.

CFD технології зазвичай ґрунтуються на створенні тривимірної цифрової сіткової моделі витратоміра, описі його взаємодії з вимірюваним середовищем, що протікає, (газом або рідиною) повною системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, доповненою рівняннями стану газу, початковими і граничними умовами і системою рівнянь, що описує турбулентні властивості середовища,

рішенні рівнянь сучасними апробованими чисельними методами (метод контрольного об'єму) і тривимірною кольоровою візуалізацією отриманих результатів з можливістю обертання і масштабування як об'єкту в цілому, так і окремих частин, що цікавлять дослідника.

Звичайно, технології CFD повинні бути доповнені сучасними ретельними, глибокими із застосуванням новітніх методів експериментальними дослідженнями, як для перевірки результатів розрахунків, так і для визначення деяких параметрів моделей, що використовуються [12]. При використуванні CFD технологій стосовно турбінних лічильників корисним може виявитися досвід вживання цих технологій до турбін повітряних електростанцій [13 - 17], які останнім часом все ширше застосовуються в альтернативній енергетиці, у тому числі й в Україні. Хоча конструкції, розміри, вирішувані задачі для цих пристроїв істотно розрізняються, підходи й прийоми моделювання носять загальний характер.

Ця робота доповнює існуючі дослідження по моделюванню газодинамічних процесів в турбінних лічильниках газу.

**Метою роботи** є побудова тривимірної комп'ютерної CFD - моделі турбінного витратоміра газу і дослідженні з її допомогою стаціонарних і перехідних витратно-частотних і метрологічних характеристик витратомірів.

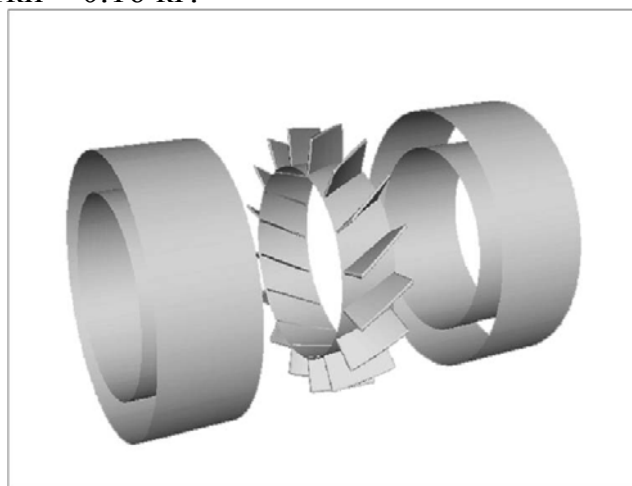
Розглядається витратомір, на вхід якого подається газ як з постійною витратою, так і з витратою, що змінюється в часі. Отримана залежність частоти обертання крильчатки від витрати газу в стаціонарному режимі і в перехідних режимах, що припускають довільну зміну витрати газу на вході витратоміра.

### **Комп'ютерна модель витратоміра**

Даний витратомір (рис. 1) умовно складається з трьох основних частин: вхідний канал, зона обертання крильчатки і вихідний канал. Довжина вхідного і вихідного каналів складає 0.04 м. Внутрішній радіус каналів рівний 0.036 м, зовнішній – 0.051. Висота (товщина) крильчатки – 0.014 м, кількість лопаток в робочому колесі – 16, маса крильчатки – 0.16 кг.



*a)*



*б)*

*a* – Зовнішній вигляд крильчатки витратоміра; *б* – геометричної частини моделі з вхідним і вихідним каналами і лопатками крильчатки

Рисунок 1 – Загальний вигляд витратоміра

Оскільки геометрія задачі є осесиметричною і періодичною в тангенціальному напрямі, то розглядався лише один сектор, рівний 22.5 град. Оскільки в даній роботі нас цікавили лише аеродинамічні процеси, то розв'язувалася ізотермічна задача. На вхід витратоміра поступає газ (повітря) з фізичними властивостями: густина – 1.225 кг/м<sup>3</sup>, динамічна в'язкість – 1.789·10<sup>-5</sup> кг/(м·с). Була використана k-ε модель турбулентності другого порядку.

Для побудови сітки і рішення задачі використовувалася CFD програма FLUENT, число розрахункових елементів моделі сітки складало близько 50000 (рис. 2).

Для моделювання процесу обертання крильчатки використовувалася рухома в зоні обертання крильчатки сітка. В основу розрахунку частоти обертання крильчатки залежно від витрати (рис. 3) покладено рівняння, що виражає рівність моментів сил, діючих на лопатку [2], а саме

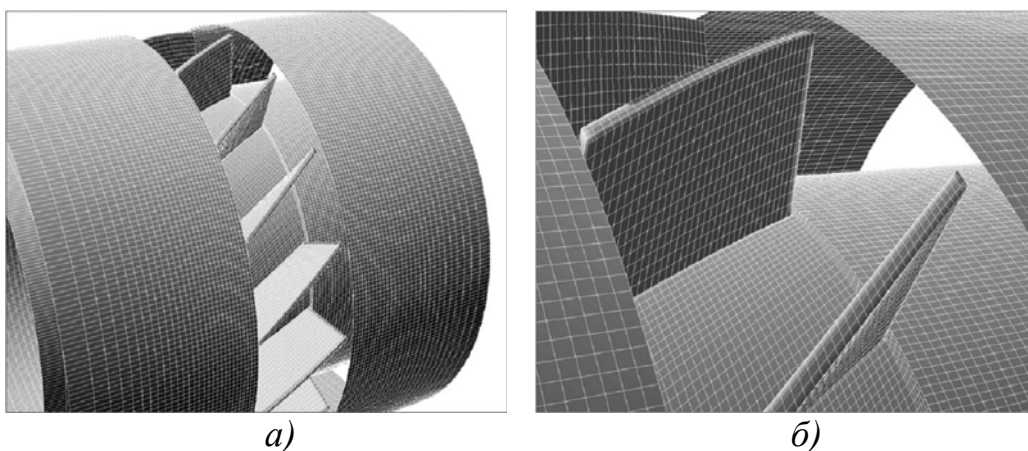
$$I \frac{d\omega}{d\tau} = M_x - M_{тр}, \quad (1)$$

або

$$m_{np} R_{ef}^2 \frac{d\omega}{d\tau} = R_{ef} \cdot (F_x - F_{тр}) \quad (1a)$$

де  $I$  - момент інерції турбіни,  $M_x$ ,  $F_x$  – момент і результуюча гідродинамічна сила тиску потоку на лопатку, що обертається, обумовлена вхідним потоком,  $M_{тр}$ ,  $F_{тр}$  – момент і сила тертя в елементах механізму витратоміра, що обертаються, яка припадає на одну лопатку,  $m_{np}$  – приведена маса сектора частин витратоміра, що обертаються з лопаткою,  $R_{ef}$  – ефективна відстань центру ваги частин витратоміра, що обертаються, з лопаткою до осі обертання,  $\tau$  - час.

Значення сили  $F_x$  у будь-який момент часу  $\tau$  можна визначити засобами FLUENT, оскільки у будь-який момент часу розраховується тиск на всій поверхні лопатки (в будь-якому осередку лопатки), а також відомі площа і вектор нормалі кожного осередку лопатки (вбудовані можливості FLUENT дозволяють визначити ці значення).



а – сліди сітки на поверхнях твердої частини моделі (лопатки і каналу); б – збільшена частина моделі в області лопаток

Рисунок 2 – Побудова моделі сітки

Сила тертя  $F_{тр}$  може бути отримана при експериментальному дослідженні конкретного витратоміра (рис. 4). Величина її змінюється залежно від частоти обертання крильчатки. Пропонується знаходити залежність  $F_{тр}$  від частоти обертання на підставі тарувальних (експериментальних) даних для кожного конкретного витратоміра.

### Стаціонарні характеристики витратоміра

На практиці для конкретного витратоміра в стаціонарних режимах при заданих постійних витратах газу вимірюється частота  $\omega$  обертання крильчатки, тобто відома залежність  $\omega = \omega(G)$ , де  $G$  – вагова витрата. Для стаціонарного режиму ( $\omega = const$ ) рівняння (1) перетвориться в рівність

$$F_x = F_{тр} \quad (2)$$

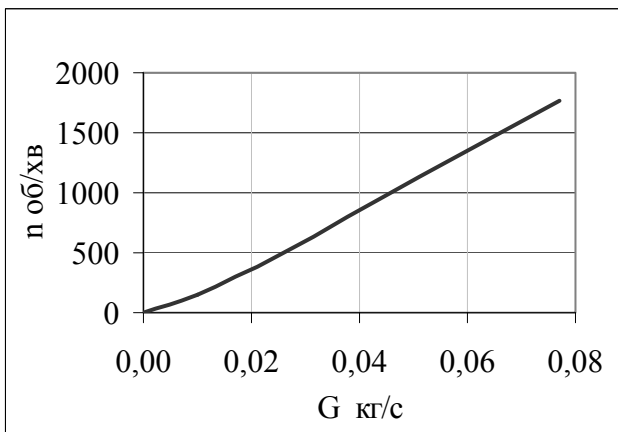
Рівність (2) означає, що, використовуючи експериментальні дані спільно з CFD - моделлю задачі, можна для конкретного витратоміра знайти залежність

$$F_{тр} = F_{тр}(\omega) \quad (3)$$

Процес знаходження залежності (3) можна визначити як налагодження моделі. Алгоритм її полягає в наступному:

- ♦ для кожної тарувальної витрати газу  $G_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , за допомогою побудованої комп'ютерної CFD моделі розв'язується послідовність стаціонарних задач для визначення частот обертання  $\omega_i$ , відповідних витратам  $G_i$ ;

- ♦ внаслідок послідовного рішення  $N$  таких задач обчислюється  $N$  значень сили  $F_x$ , які для стаціонарного процесу на підставі (2) рівні значенням сили  $F_{тр}$ ,



а це, у свою чергу, означає, що для конкретного витратоміра знайдена шукана залежність (3) і рис. 3. Ця залежність для стаціонарного процесу, окрім області низьких витрат, близька до лінійної.

Рисунок 3 – Залежність частоти обертання турбіни витратоміра від вагової витрати в стаціонарних режимах

Із співвідношення (1), записаного у вигляді кінцевих різниць відносно  $\omega$ , для  $k$ -го моменту часу  $\tau_k$ , частота обертання  $\omega_k$  визначається за формулою

$$\omega_k = \omega_{k-1} + \frac{F_x(\omega) - F_{тр}(\omega)}{mR} (\tau_k - \tau_{k-1}) \quad (4)$$

Описана методика дозволяє розраховувати частоту обертання крильчатки витратоміра в стаціонарних режимах для різних витрат газу. Знаючи залежність  $F_{тр}(\omega)$  і враховуючи те, що в стаціонарному режимі виконується рівність  $F_{тр} = F_x$ , для заданої витрати рішенням низки стаціонарних задач, підбираючи

значення частоти обертання, можна добитися виконання умови  $F_x = F_{mp}(\omega)$ . У наслідок реалізації цього алгоритму була побудована залежність частоти обертання від витрати газу (рис. 3).

Запропонована методика дослідження була реалізована в програмі FLUENT у вигляді спеціальної додаткової функції, яка на кожному кроці за часом обчислює частоту обертання по формулі (4). Слід зазначити, що формула (4) була реалізована в явному вигляді, тобто  $F_x$  і  $F_{mp}$  на кожному часовому кроці вибиралися з попереднього кроку за часом. У приведених нижче розрахунках були використані як лінійні залежності сили тертя від частоти:  $F_{mp}(\omega) = 0.0025 \cdot 10^{-3} \omega$ , так і нелінійні, апроксимовані поліномом другого ступеня (рис. 4).

### Метрологічні характеристики витратоміра

Вирішуючи зворотну задачу для кожної витрати і визначаючи відповідну йому частоту, ми одержали залежність сили тертя від частоти (рис. 4), яка дає залежність похибки від витрати (рис. 5), близьку до експериментально визначуваної.

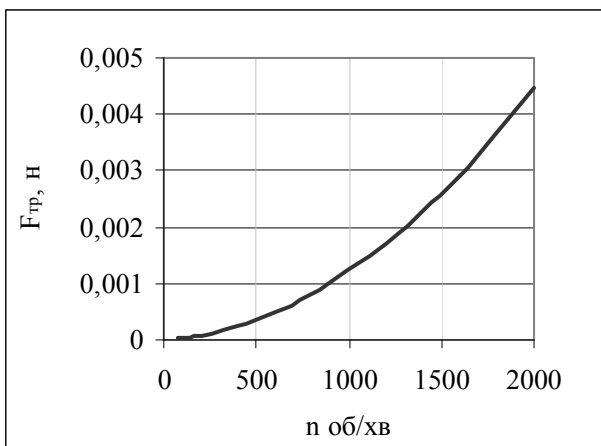


Рисунок 4 – Залежність сили тертя турбіни від частоти обертання

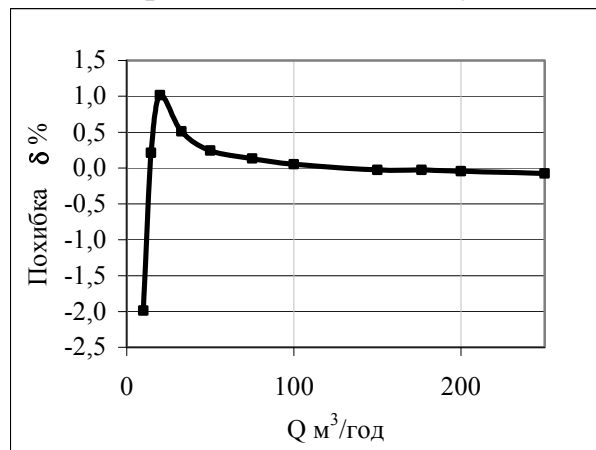


Рисунок 5 – Залежність систематичної похибки витратоміра від об'ємної витрати

Як відомо, похибка  $\delta$  пов'язана з параметром  $n/Q$  наступною залежністю

$$\delta = \frac{\frac{n}{Q} - \left(\frac{n}{Q}\right)_{\text{ср}}}{\left(\frac{n}{Q}\right)_{\text{ср}}}$$

де  $(n/Q)_{\text{ср}}$  – середнє в межах вимірювання ( $Q_{\text{min}} - Q_{\text{max}}$ ) значення  $n/Q$ .

Для цього випадку зміна сили тертя може бути представлена наступною функціональною залежністю  $F_{\text{тр}} = 10^{-9} n^2 + 2 \cdot 10^{-7} n - 5 \cdot 10^{-7}$ , де  $n$  – частота обертання в об/хв,  $n = 2\pi \cdot 60 / \omega$ .

### Динамічні характеристики витратоміра

Причиною тих або інших нестационарних процесів у напірних трубопроводах, оснащених засобами вимірювання, можуть бути розлагодження напірних

пристроїв, а саме: компресорів, вентиляторів, насосів, газотурбінних установок, що перекачують газ, переходи з одного режиму роботи на інший, а також пуски і зупинки.

Для моделювання перехідних режимів розглядалася нестационарна задача аеродинаміки. На вході у витратомір задавалася змінна в часі витрата газу, що змінюється за залежністю, приведеною на рис. 6.

На підставі описаної вище методики були знайдені залежності для окремих сил, діючих на крильчатку в перехідних режимах по витраті повітря (рис. 7). Як видно з рис. 7 гідродинамічна сила тиску потоку на лопатку  $F_x$ , що обертається, і сила інерції  $F_{in}$  змінюються синхронно із зміною витрати і на етапі розгону досить близькі по абсолютному значенню. В той же час сила тертя змінюється набагато більш плавно, і її абсолютні значення лише асимптотично наближаються знизу до гідродинамічної сили в кінці перехідного процесу.

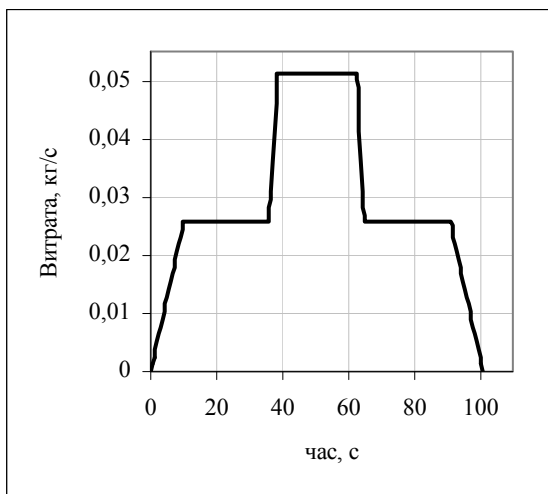
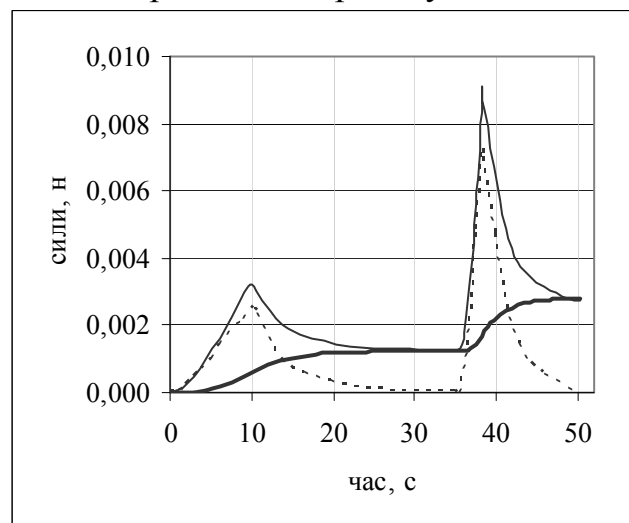


Рисунок 6 – Залежність зміни витрати газу в витратомірі від часу



товста лінія – гідродинамічна сила тиску  $F_x$  потоку на лопатку, що обертається; – сила інерції  $F_{in}$ ; тонка лінія – сила тертя  $F_{tr}$

Рисунок 7 – Залежності діючих на крильчатку сил від часу

На етапі гальмування (зменшення витрати) гідродинамічна сила тиску потоку на лопатку  $F_x$ , що обертається, монотонно змінюється істотно повільніше, в порівнянні з різкішим падінням сили інерції, асимптотично прагнучи до нуля в кінці перехідного процесу. Час релаксації до квазістационарних значень окремих сил істотно більше за час дії збурення (зміни витрати). На підставі описаної вище методики за допомогою комп'ютерної моделі була знайдена залежність частоти обертання крильчатки від часу для перехідних режимів по витраті газу (рис. 8). Результати розрахунків доводять, що похибка визначення витрати в перехідних режимах без урахування сил інерції може складати до 100%.

Були проведені також чисельні дослідження динамічних характеристик турбінного витратоміра, а саме впливи розгону і вибігу турбіни при зміні витрати газу в часі. Розглядалися випадки як симетричної (дзеркальне віддзеркалення)

рис. 6, так і несиметричної в часі залежності розгону і вибігу.

Результати моделювання (рис. 8), показують, що навіть для симетричної в часі залежності зміни витрати (рис. 6) похибка визначення кількості газу, що пройшов через лічильник, на цих етапах не самокомпенсується.

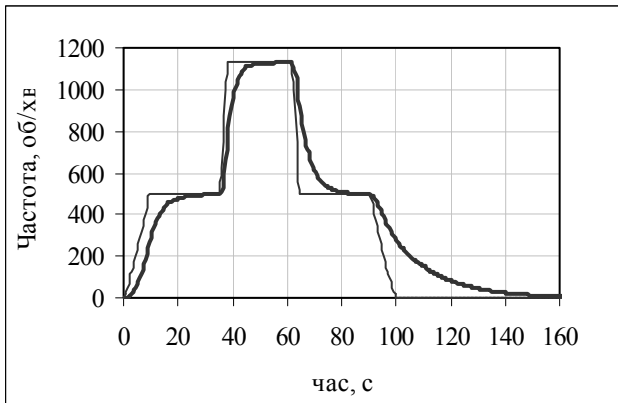


Рисунок 8 – Зміна частоти обертання крильчатки для симетричної залежності зміни витрати (рис. 6) з урахуванням сил інерції (товста лінія) і без урахування сил інерції (тонка лінія) по рис. 3

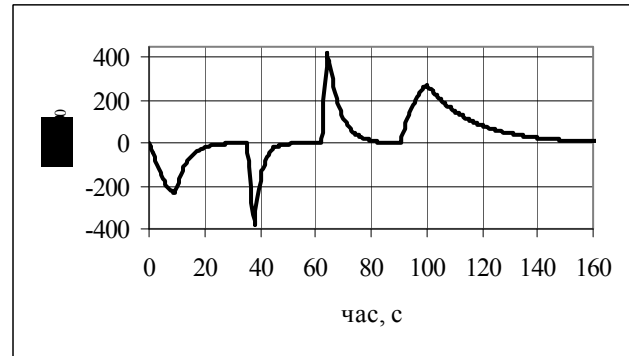


Рисунок 9 – Залежність відхилення частоти обертання крильчатки в нестационарному режимі вимірювання  $\omega$  від частоти обертання  $\omega_0$ , одержаної по тарувальній кривій типу рис. 3 в часі при вибраній (рис. 6) залежності зміни витрати газу в витратомірі від часу

У інтервал часу падіння витрати (похибка позитивна) частота обертання крильчатки змінюється набагато більш плавно у порівнянні з різкішим збільшенням частоти обертання крильчатки на інтервалі часу збільшення витрати (похибка від'ємна). Різниця між першим розгоном і симетричним йому другим спадом (рис. 8) складає 160%, а між другим збільшенням витрати і відповідним йому першим спадом витрати 72%. Тобто при досить повільних нестационарних процесах сумарна похибка, знайдена по тарувальній кривій типу рис. 3, на етапах збільшення і подальшого зменшення витрати позитивна і може перевищувати реальну витрату в 2,6 рази для досліджуваного витратоміра. На рис. 9 показано динаміка зміни такої похибки в часі при вибраній (рис. 6) залежності зміни витрати газу в витратомірі від часу.

Як видно з рис. 9 частота обертання крильчатки, тобто й визначені значення витрати, в нестационарному процесі істотно відрізняються від частоти (витрати), одержаної по тарувальній кривій типу рис. 3 для стаціонарного режиму.

Темп збільшення або зменшення похибки залежить від амплітуди розгойдування витрати і корелює з періодами його збільшення і зменшення. Це відхилення можна врахувати і компенсувати за допомогою коректорів.

### Висновки

Запропонована методика визначення сил тертя для крильчатки витратоміра в перехідних режимах, заснована на експериментально-розрахунковому методі з

використанням CFD технологій. Одержана залежність частоти обертання крильчатки від витрати для стаціонарного режиму.

Запропонована методика розрахунку частоти обертання крильчатки в перехідних режимах. Одержані залежності частоти обертання крильчатки від часу для перехідних режимів. Одержані залежності для сил, діючих на крильчатку, в перехідних режимах.

Представлені результати показують, що час розгону крильчатки витратоміра (зростання витрати) і вибігу (подальшого зменшення витрати до первинного значення) можуть значно відрізнятись, і ця відмінність може досягати 25% і більше. Динаміка розгону і вибігу крильчатки витратоміра залежить від виду функціональної залежності зміни витрати від часу, позитивна похибка вимірювання витрати може досягати 160%.

Для конкретних типорозмірів витратомірів на основі CFD моделювання можуть бути одержані функціональні залежності, які застосовні надалі при створенні автоматичних електронних коректорів похибок вимірювань витрати, пов'язаних з коливаннями витрати в газотранспортних мережах.

#### **Література**

1. European standard EN 12261 "Gas meters. Turbine gas meters".
2. Кремлёвский П.П. «Расходомеры и счетчики количества веществ». I часть, С.-П., 2002, 410 с.
3. Тонконогий Ю., Пядишюс А. Погрешности средств измерения, применяемых для учета газа // Измерительная техника. – 1999. - №5. - С. 35-38.
4. РТВ Technische Richtlinien G-13. Messgeräte für Gas. Einsaue und Betrieb von Turbinenradgaszahlern (Измерения количества газа. Установка и эксплуатация турбинных счётчиков газа), 1994-12.
5. Baker R.C., Turbine flow meters: II. Theoretical and experimental published information. Flow Meas. Instrum. -1993. - 4(3). - P. 123 - 144.
6. Atkinson K. N. A software tool to calculate the over-registration error of a turbine meter in pulsating flow. Flow Meas. Instrum. – 1992. - 3(3). - P. 167 - 172.
7. Cheesewright R., Clark C. Step Response Tests on turbine flow meters in liquid flows. Proceedings of the I MECH E Part A. Journal of Power and Energy. – 1994. - V. 211. - P. 321 – 330.
8. Cheesewright R.; Atkinson K.N., Clark C., Horst C.ter. Field tests of correction procedures for turbine flow meters in pulsate flows. Flow Meas. Instrum. – 1996. - 7(1). - P. 7-17.
9. Lee W.F.Z., Kirik M.J., Bonner J.A. Gas turbine flow meter measurement of pulsating flow. Trans. ASME, J. Eng Power, Oct. – 1975. - P. 531-539.
10. Bronner J. W., McKee R. J. Cogen pulsation effects on turbine metering. AGA, Oper. sect., Proc. – 1991. - P. 625-638.
11. McKee R.J. Pulsation effect on single and two-rotor turbine meters. Flow Meas. Instrum. – 1992. - 3(3). - P. 151-166.
12. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассообмена (общий инженерный подход): Киев: ИТТФ НАН Украины, 1998. – 224 с.
13. Krist S., Biedron R., Rumsey C. CFL3D User's Manual (Version 5.0), NASA/TM-208444, 1998.
14. Durbin P.A. Separated flow computations with the  $k-\epsilon-v_2$  model", *AIAA J.*, **33**, 1995, p. 659.
15. Hand M. M., Robinson C., Balas M. J. Wind Turbine Response to Analytic Inflow Vortex Parameters Variation. Proceedings of 23rd ASME Wind Energy Symposium, November 2003 Reno, Nevada.
16. Laino D.J., Hansen A.C. User's Guide to the Wind Turbine Aerodynamics Computer Software AeroDyn v.12.50, 2002, <http://wind.nrel.gov/designcodes/>.
17. Magnato F., Gabi M. A new adaptive turbulence model for unsteady flow fields in rotating machinery, ISROMAC 8, 2000.



<p><b>Полубинский А.С., Круковский П.Г., Яцевский В.А., Тонконогий Ю.Л. Моделирование стационарных и переходных расходно-частотных характеристик расходомера газа турбинного типа</b></p> <p>На основе разработанной авторами с помощью CFD технологий компьютерной модели турбинного расходомера проанализированы частотно-расходные характеристики в статических и динамических условиях, а также ошибки измерения и предложены пути их уменьшения</p>	<p>Polubynsky A.S., Krukovsky P.G., Yatsevsky V.A., Tonkonogy Yu.L. <b>Design of stationary and transitional expense-frequency descriptions of flow meter gas of turbine type</b></p> <p>On the basis of CFD technology and developed by authors a computer model for turbine flow meter the frequency-expense static and dynamic characteristics were analyzed as well as the measurement errors and the ways of their reducing are offered</p>
--	--

Надійшло до редакції  
27 травня 2005 року

УДК 621.396.6

## АНАЛІЗ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПОХИБОК МОСТОВОГО КОМУТАТОРА ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА СТРУМУ

*Хазановіч Л.Б., Цірук В.Г., Янкелевич Г.Є., ВАТ Київський завод автоматички ім. Г.І.Петровського, м. Київ, Україна*

*Розглянуто інструментальні похибки електронного прецизійного мостового комутатора із стабілізацією струму, котрий використовується в широтно-імпульсних модуляторах. Приведено вираз для оцінки вказаних похибок, які надають також можливість визначити вимоги до похибок параметрів електронних компонентів комутатора*

### **Вступ. Постановка задачі**

Прецизійні широтно-імпульсні модулятори (ШІМ) з мостовим комутатором струму використовуються в багатьох приладах керування з контуром зворотного зв'язку, наприклад датчиках кутової швидкості, акселерометрах. Принцип роботи широтно-імпульсних модуляторів та аналіз інструментальних похибок виконуючого органу приладу, а саме магнітоелектричного чи електромагнітного датчиків моменту з ШІМ наведено в [1]. В роботі [2] викладено принцип роботи мостового комутатора струму, проаналізовано вплив індуктивності обмотки датчика моменту на струм в ланцюгу мостового комутатора. Важливість знаходження похибок завдання величини струму в датчик моменту обумовлено тим, що вони являють собою складові похибок вихідного сигналу відповідних приладів, який пропорційний зазначеному струму.

Метою статті є знаходження та аналіз математичних виразів, що визначають похибки завдання величини струму в ланцюгу навантаження електронного мостового комутатора, які залежать від параметрів зазначеного комутатора.

### **Похибки завдання величини струму мостового комутатора**

Схему електронного мостового комутатора із стабілізацією струму наведено на рис. 1, де позначено:  $L, R$  - індуктивність та опір датчика моменту,  $C, r$  - ємність та опір шунтуючого ланцюга,  $I$  - струм мостового комутатора,  $R_i$  - ви-

мірювальній резистор,  $C_m$  - стабілітрон опорного джерела живлення,  $\Pi$  - підсилювач регулятора струму мостового комутатора,  $P$  - виконуючий орган регулятора струму,  $E$  - джерело живлення мостового комутатора.

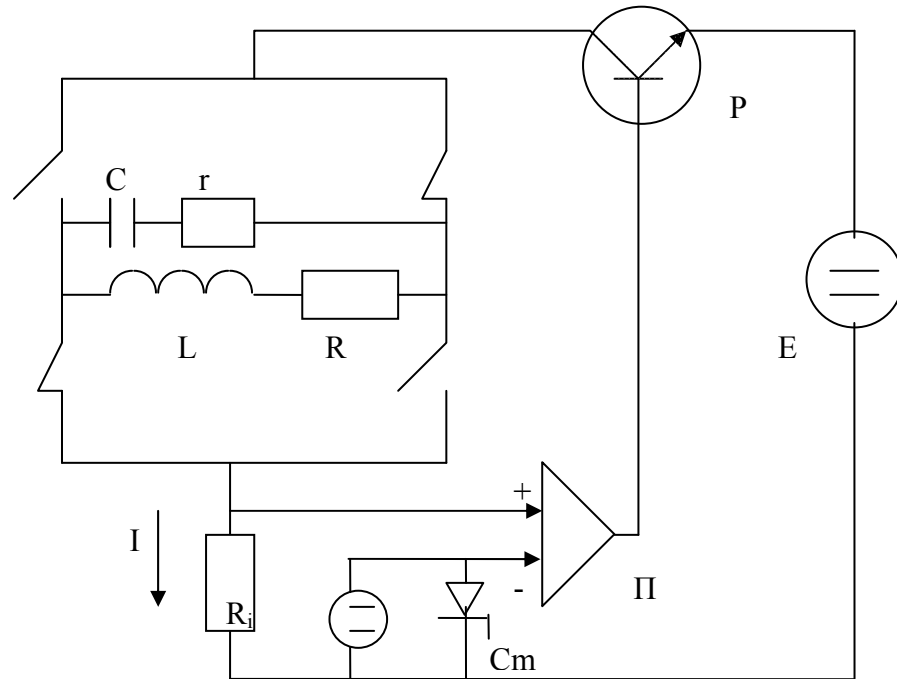


Рисунок 1 - Схема мостового комутатора ШІМ із стабілізатором струму

Стабілізація струму в зазначеному мостовому комутаторі забезпечується шляхом порівняння падіння напруги на резисторі  $R_i$ , яка пропорційна струму  $I$ , з напругою на стабілітроні  $C_m$ . Різниця цих напруг використовується в регуляторі струму для його стабілізації.

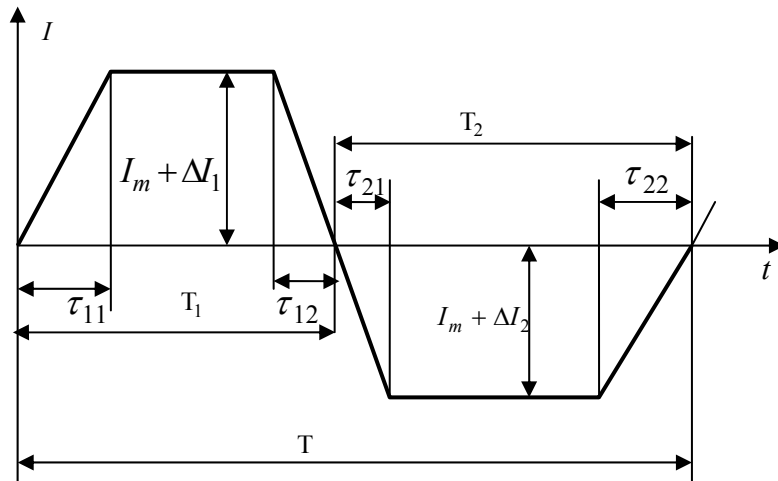
Як відомо з [2] для усунення появи нелінійності між середнім значенням струму та різницею між позитивним та від'ємним імпульсами ШІМ, а також покращення режиму роботи ключів мостового комутатора потрібно параметри шунтуючого ланцюга вибирати наступним чином  $C = \frac{L}{r^2}$ ,  $r = R$ .

Розглянемо форму імпульсів струму в ланцюгу навантаження мостового комутатора, які наведені на рис. 2. Знайдемо середнє значення струму за період ШІМ. Для цього проінтегруємо струм по інтервалах часу відповідно до рис. 2. Матимемо для позитивного імпульсу:

$$I_{11} = \int_0^{\tau_{11}} \frac{I_m + \Delta I_1}{\tau_{11}} t dt = 0,5(I_m + \Delta I_1)\tau_{11},$$

$$I_{12} = \int_{\tau_{11}}^{T_1 - \tau_{12}} (I_m + \Delta I_1) dt = (I_m + \Delta I_1)(T_1 - \tau_{11} - \tau_{12}),$$

$$I_{13} = \int_0^{\tau_{121}} (I_m + \Delta I_1 - \frac{I_m + \Delta I_1}{\tau_{12}} t) dt = 0,5(I_m + \Delta I_1)\tau_{12}.$$



$I_m + \Delta I_1, I_m + \Delta I_2$  - поточні амплітуди позитивного та від'ємного імпульсів струму,  $I_m$  - номінальне значення амплітуди імпульсів струму,  $\Delta I_1, \Delta I_2$  - відхилення поточних амплітуд імпульсів від номінальної,  $T_1, T_2$  - тривалість позитивного та від'ємного імпульсів струму,  $\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22}$  - тривалості фронтів імпульсів струму,  $T$  - період ШІМ

Рисунок 2 - Форма імпульсів струму в ланцюгу навантаження мостового комутатора ШІМ

Аналогічним чином для від'ємного імпульсу струму можна записати

$$\begin{aligned} I_{21} &= 0,5(I_m + \Delta I_2)\tau_{21}, \\ I_{22} &= (I_m + \Delta I_2)(T_2 - \tau_{21} - \tau_{22}), \\ I_{23} &= 0,5(I_m + \Delta I_2)\tau_{22}. \end{aligned}$$

Тоді середнє значення струму за період  $T$  буде дорівнювати

$$I_c = \frac{I_{11} + I_{12} + I_{13} - I_{21} - I_{22} - I_{23}}{T} = \frac{1}{T} \{ (I_m + \Delta I_1)[T_1 - 0,5(\tau_{11} + \tau_{12})] - (I_m + \Delta I_2)[T_2 - 0,5(\tau_{21} + \tau_{22})] \}. \quad (1)$$

Запишемо відхилення амплітуд імпульсів струму так

$$\Delta I_1 = \Delta I + \Delta i_1, \Delta I_2 = \Delta I - \Delta i_2, \quad (2)$$

де  $\Delta I$  - середнє відхилення амплітуди імпульсу за період (низькочастотна складова відхилення імпульсу струму від номінального значення),  $\Delta i_1, \Delta i_2$  - відхилення амплітуд позитивного та від'ємного імпульсів від середнього значення за період (високочастотна складова відхилення імпульсу струму від номінального значення). Підставимо вирази (2) в (1).

Після перетворень матимемо

$$\begin{aligned} I_c &= I_m \frac{T_1 - T_2}{T} + \Delta I \frac{T_1 - T_2}{T} + \Delta i_1 \frac{T_1}{T} + \Delta i_2 \frac{T_2}{T} + 0,5 I_m \frac{\tau_{21} + \tau_{22} - \tau_{11} - \tau_{12}}{T} + \\ &+ 0,5 \Delta I \frac{\tau_{21} + \tau_{22} - \tau_{11} - \tau_{12}}{T} - 0,5 \Delta i_1 \frac{\tau_{11} + \tau_{12}}{T} - 0,5 \Delta i_2 \frac{\tau_{21} + \tau_{22}}{T}. \end{aligned}$$

Нехтуючи членами другого порядку малості з урахуванням того, що фронти імпульсів повинні також бути малими величинами, останній вираз набуває вигляду

$$I_c = I_m \left[ \frac{T_1 - T_2}{T} + \frac{\Delta I}{I_m} \frac{T_1 - T_2}{T} + \frac{\Delta i_1}{I_m} \frac{T_1}{T} + \frac{\Delta i_2}{I_m} \frac{T_2}{T} + 0,5 \frac{\Delta \tau}{T} \right], \quad (3)$$

де  $\Delta \tau = \tau_{21} + \tau_{22} - \tau_{11} - \tau_{12}$  - різниця фронтів імпульсів.

Оскільки точне значення середньої величини струму за період  $T$  дорівнює  $I_T = I_m \frac{T_1 - T_2}{T}$ , то з виразу (3) випливає, що похибка завдання середньої величини струму за період  $T$  буде такою

$$\Delta I_c = I_m \left[ \frac{\Delta I}{I_m} \frac{T_1 - T_2}{T} + \frac{\Delta i_1}{I_m} \frac{T_1}{T} + \frac{\Delta i_2}{I_m} \frac{T_2}{T} + 0,5 \frac{\Delta \tau}{T} \right]. \quad (4)$$

Вираз (4) дозволяє зробити оцінку похибки завдання середнього значення струму ШІМ в залежності від відповідних складових. Складова похибки  $\frac{\Delta I}{I_m}$  визначається нестабільністю опору вимірювального резистора  $R_i$ , нестабільністю напруги стабілізації стабілітрона  $St$ , струмом витоку закритих ключів комутатора, а також похибкою регулятора. Тому в прецизійних комутаторах слід встановлювати високостабільні вимірювальні резистори та стабілітрони опорного джерела живлення. Складова похибки  $\frac{\Delta i_1}{I_m} \left( \frac{\Delta i_2}{I_m} \right)$  визначається похибкою регулятора, його швидкодією (смугою пропускання), нестабільністю опору відкритих ключів комутатора, складова похибки  $\frac{\Delta \tau}{T}$  залежить від різностей тривалості переключення ключів комутатора, смугою пропускання регулятора комутатора, яка може сягати для високочастотного каналу регулятора декілька десятків МГц.

Слід зазначити, що в таких комутаторах доцільно використовувати як ключі мікросхеми 590КН13, 590КН15, 590КН8А.

Якщо врахувати, що вихідний сигнал акселерометрів, датчиків кутової швидкості чи інших приладів можна розрахувати, як величину, що дорівнює  $K_{\Pi} I_c$ , де  $K_{\Pi}$  - коефіцієнт перетворення (для акселерометрів  $K_{\Pi} = K_{DM}$ ,  $K_{DM}$  - крутизна датчика моментів, для датчиків кутової швидкості  $K_{\Pi} = \frac{K_{DM}}{H}$ ,  $H$  - кінетичний момент гіроскопу), вираз (4) можна використовувати для оцінки відповідних складових похибок зазначених приладів.

### **Висновки**

Наведений вираз для визначення інструментальних похибок електронного мостового комутатора ШІМ із стабілізацією струму дає змогу оцінити похибки завдання струму в ланцюгу навантаження зазначеного комутатора та визначити

вимоги щодо похибок параметрів електроелементів цього комутатору.

Перспективним напрямом подальших наукових досліджень є математичне моделювання роботи, наприклад, датчиків кутової швидкості тощо з мостовими комутаторами ШІМ струму з метою зменшення інструментальних похибок.

#### **Література**

1. Пельпор Д.С., Никитин Е. А., Шестов С.А., Матвеев В.А. Гироскопические системы. Элементы гироскопических приборов. - М.: Высш. шк., 1988. - 432с.
2. Коновалов С.Ф., Никитин Е.А. Селиванова Л.М. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. В 3т. – М.: Высш. шк., Т3-1980. -128с.

Хазаноич Л.Б., Цирук В.Г., Янкелевич Г.Е. **Анализ инструментальных погрешностей мостового коммутатора широтно-импульсного модулятора тока**

Рассмотрены инструментальные погрешности электронного, прецизионного, мостового коммутатора со стабилизацией тока, который используется в широтно-импульсных модуляторах. Приведено выражение для оценки указанных погрешностей, дающее также возможность определить требования к погрешностям параметров электронных компонентов коммутатора

L.B. Hazanovich, V.G. Tciruk, G.Ye. Yankelevich. **Instrumental errors analysis of bridge switcher with current width-pulse modulator**

There are considered instrumental errors of electronic, precision bridge switcher with current stabilization, which is used in width-pulse modulators. There is made an expression for specified errors estimation, which is giving also a possibility to determine requirements parameter errors of electronic switcher's components.

*Надійшла до редакції  
28 лютого 2006 року*

УДК 528.7 : 629.78

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИБІР СХЕМИ КАЛІБРОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА ЗІ ЗМІННОЮ ЯСКРАВІСТЮ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ФОТОМЕТРІЇ**

*Микитенко В.І., Міхеєнко Л.А., Петрущенко Л.А. Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

*Проведено порівняльну оцінку ефективності різних алгоритмів роботи й схемотехнічних рішень інтегральних випромінювачів із каліброваною яскравістю. Обґрунтовані найбільш перспективні з погляду вимог прецизійної фотометрії схеми.*

#### **Вступ**

Калібровані випромінювачі зі змінною яскравістю (КВЗЯ) становлять основу сучасної прецизійної фотометрії. Вони широко використовуються при вимірюванні енергетичних характеристик приймачів випромінювання (ПВ), для калібрування фотометричного обладнання, атестації оптико-електронних вимірювальних приладів тощо [1-3]. Однак, незважаючи на останні досягнення у цьому напрямку, існуючі КВЗЯ не задовольняють в повній мірі вимогам сучасної оптичної метрології. В першу чергу це стосується задач атестації багатоелементних ПВ та приладів на їх основі (цифрових відеосистем, матричних мікроскопів, багатозональних скануючих пристроїв повітряного та космічного базування) [4-5]. В Україні стан справ ще гірший у зв'язку з майже повною відсутністю необхідної теоретичної та елементної бази. Тому гостро постала проблема створення КВЗЯ для точної фотометрії.

Ціль даної роботи – порівняльний аналіз відомих та можливих схем побудови КВЗЯ, виявлення їх переваг та недоліків, пошук нових перспективних КВЗЯ, які б відповідали сучасним вимогам до прецизійного фотометричного устаткування.

### **Критерії порівняння КВЗЯ**

КВЗЯ складається з первинного джерела випромінювання (ПДВ), регульованого ослаблювача випромінювання (РОВ), оптичної системи та одного чи декількох вторинних джерел випромінювання (ВДВ). В якості ВДВ можуть бути використані розсіювальні елементи або вихідна апертура оптичної системи.

Найважливішим критерієм для оцінки можливості застосування того чи іншого методу регулювання яскравості КВЗЯ в інтегральному освітлювачі атестаційної метрологічної установки можна вважати точність дотримання залежності яскравості ВДВ від регульованого параметру, тобто градувальну характеристику. При цьому суттєву перевагу мають методи, які забезпечують лінійну градувальну характеристику КВЗЯ, що у багатьох випадках спрощує практичну реалізацію способу.

Крім градувальної характеристики, для порівняльної оцінки випромінювачів з регульованою яскравістю використовувались наступні параметри та критерії:

- максимальна досяжна яскравість ВДВ  $L_{\max}$  ;
- максимальна відносна яскравість  $0 < L_{\max}^0 \leq 1$  – відношення максимальної яскравості розглядуваного КВЗЯ до найбільшого значення яскравості серед всіх порівнюваних каліброваних випромінювачів;
- діаметр лінійної зони вихідної апертури випромінювача, у якій нелінійність розподілу яскравості не перевищує 1...2% ( $K_n \leq 1...2\%$ )  $\Delta d_{\text{лін}}$  ;
- відносний діаметр зони рівномірної яскравості по відношенню до КВЗЯ з максимальною величиною лінійної зони  $0 < \Delta d_{\text{лін}}^0 \leq 1$  ;
- відносна величина габаритів КВЗЯ (по відношенню до схеми з найбільшим об'ємом)  $0 < V_B^0 \leq 1$  ;
- габаритно-енергетичний фактор  $K_{г/е} = \frac{L_{\max}^0 \cdot \Delta d_{\text{лін}}^0}{V_B^0}$  ,  $0 < K_{г/е} \leq 1$  ;
- відносна неселективність  $\Delta \lambda$  – відносна зміна спектру ВДВ по відношенню до ПДВ,  $0 < \Delta \lambda^0 \leq 1$  ;
- відносна похибка встановлення яскравості  $\Delta L$  – відношення похибки розглядуваного випромінювача до випромінювача з максимальною похибкою серед порівнюваних,  $0 < \Delta L^0 \leq 1$  ;
- точнісний (метрологічний) фактор  $K_M = \Delta \lambda^0 \cdot \frac{1}{\Delta L^0}$  ;
- узагальнений показник якості КВЗЯ  $K = K_{г/е}^0 \cdot K_M^0$  .

Очевидно, що найперспективніший КВЗЯ повинен мати максимальне значення  $K$  та максимально задовольняти зазначеним раніше вимогам по максимальній яскравості, динамічному діапазону яскравості, розмірам вихідної апертури тощо.

**Аналіз відомих схем КВЗЯ**

Попередній аналіз різноманітних КВЗЯ дозволив виділити для більш детального дослідження нижченаведені схеми.

Однією з найбільш простих та розповсюджених можна вважати схему [6-8], основану на переміщенні первинного джерела випромінювання відносно розсіювальної площадки (ВДВ) (рис. 1). Коефіцієнт зміни яскравості визначається за законом зворотних квадратів відстаней. Обмеження

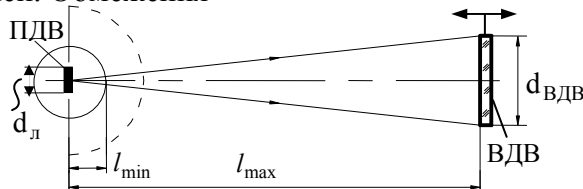


Рисунок 1 – Схема з безпосереднім опроміненням розсіювальної площадки (ВДВ) за законом зворотних квадратів відстаней

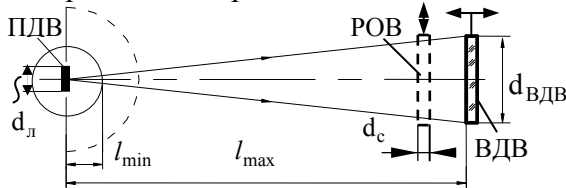


Рисунок 2 – Схема з опроміненням розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней та використанням додаткових РОВ

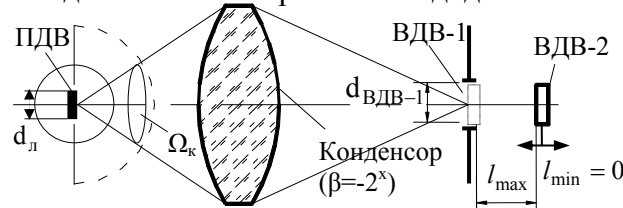


Рисунок 3 – Схема опромінення розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней та конденсором: ВДВ-1 – перше ВДВ, ВДВ-2 – друге ВДВ

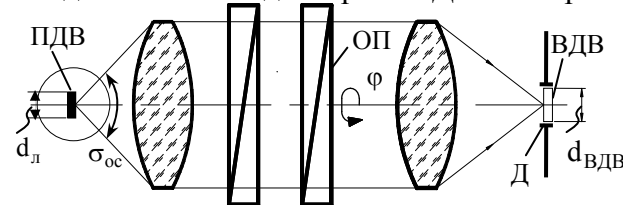


Рисунок 4 – Схема з ослабленням випромінювання за законом Малюса: ОП – обертовий поляризатор, Д – діафрагма

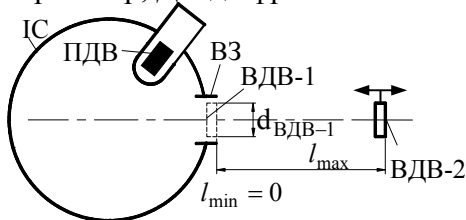


Рисунок 5 – Схема з інтегруючою сферою та опроміненням розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней: ІС – інтегруюча сфера, ВЗ – вихідна зіниця

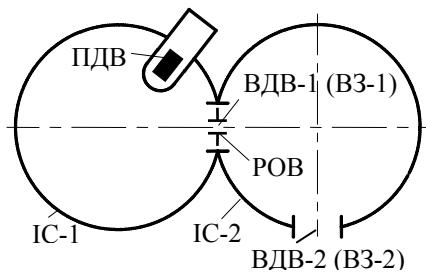


Рисунок 6 – Схема з двома інтегруючими сферами та РОВ: ВЗ-1 – вихідна зіниця першої сфери (ІС-1), ВЗ-2 – вихідна зіниця сфери ІС-2  
діапазону ослаблення світлового потоку в такій установці обумовлено збільшенням її габаритів.

Прикладом КВЗЯ, заснованого на законі адитивності світлових потоків, є набір сіток, гребінок або набір дірчастих діафрагм (рис. 2) [7, 9-11]. У загальному випадку коефіцієнт пропускання дорівнює відношенню площі, займаної отворами, до площі всієї почорненої металеві пластинки. В основному ослаблення здійснюється дискретно. Основним недоліком фотометричного ослаблювача з набору декількох чорнених металевих сіток є муарова картина, що утворюється після ослаблювача, а також багаторазове відбиття між поверхнями окремих сіток, уведених у світловий пучок, що порушує закон адитивності. Також виникає похибка ослаблення випромінювання через неточність виміру діаметрів отворів, дифракцію, нерівності країв тощо.

До КВЗЯ на законі Бугера (так звані "поглиначі") [11] відносяться ослаблювачі, засновані на поглинанні в газах, рідинах й оптичних матеріалах. Для ослаблення незначних потужностей у видимій області використовують нейтральні фільтри й фотометричні клини [7]. Велика кількість нейтральних фільтрів дає велику похибку ослаблення і тому не може використовуватися при точних вимірах. Також внесок в похибку робить наявність відблисків на границі "повітря-скло" та значна селективність методу.

КВЗЯ може бути побудоване на принципі введення в пучок променів оптичного елемента, що має оптичну силу або властивості розсіювача, приводить до збільшення тілесного кута  $\Omega_K$ , у якому розповсюджується потік (рис. 3) [6]. Похибки регулювання яскравості КВЗЯ виникають через аберації оптичної системи, неточність виміру параметрів схеми, внутрішні неоднорідності оптичної системи, неоднаковість кутів падіння променів на ВДВ при різних величинах встановлюваної яскравості.

КВЗЯ з яскравістю, що змінюється шляхом поляризаційного ослаблення [6, 7, 12] за законом Малюса (рис. 4), прості в реалізації та мають невеликі габарити. Недоліки: висока селективність, малий коефіцієнт пропускання та зміна властивостей поляризаторів з часом.

В КВЗЯ на принципі часткового розсіювання випромінювання розсіювання може відбуватися на оптичних поверхнях, у оптичних середовищах та на внутрішній поверхні інтегруючої сфери. У випадку, коли розсіювання відбувається у оптичному середовищі [13], ослаблення випромінювання подібне до ослаблення по закону Бугера. Якщо випромінювання ослаблюється при розсіюванні на оптичній поверхні, то відбувається збільшення тілесного кута, у якому розповсюджується потік. Ослаблювач, який використовує розсіювання випромінювання на внутрішній поверхні сфери, може бути побудований на комбінації таких принципів ослаблення: а) розсіювання на внутрішній поверхні однієї сфери та закону обернених квадратів (рис. 5); б) розсіювання на внутрішніх поверхнях двох сфер та закону адитивності потоків (рис. 6).

Із загальної теорії інтегруючої сфери [14-15] випливає, що навіть при незначній селективності покриття селективність всієї сфери досить значна, що є недоліком таких схем. Але схеми з інтегруючими сферами в якості каліброваного освітлювача приваблюють тим, що мають високу однорідність яскравості вихідної зіниці, дозволяють одночасно засвічувати велику кількість пікселів багатоелементних ПВ, забезпечують незмінність апертури пучка світла, що ослаблюється, та дають можливість використання декількох ПДВ.



**Морфологічний аналіз КВЗЯ**

При чисельних розрахунках та аналізі КВЗЯ використовувалися наступні вихідні дані:

- первинне джерело випромінювання – галогенна лампа КГМ-30-300-2, яка працює при температурі тіла розжарення  $T=2850\text{K}$ , радіус круглого еквівалентного тіла розжарення лампи  $r_{\text{л}} = 2,585 \cdot 10^{-3}$ , м, випромінюваний такою лампою енергетичний потік при зазначених

умовах  $\Phi_{\text{В}} = 130\text{Вт}$ , а яскравість тіла розжарення  $L_{\text{л}} = 9,852 \cdot 10^5, \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$ ;

- коефіцієнт пропускання розсіювальної площадки ВДВ  $\tau = 0,5$ ;
- параметри інтегруючих сфер: радіус сфери  $R_{\text{сф}}=0,1$  м, радіус вихідної зіниці сфери  $R_3=0,025$  м, коефіцієнт дифузійного відбиття внутрішньої поверхні сфери  $\rho=0,95$ ;
- параметри конденсора: збільшення  $\beta=-2^x$ , відносний отвір конденсора  $\frac{D_{\text{к}}}{f'_{\text{к}}} = \frac{1}{1}$ ;
- спектральний діапазон роботи КВЗЯ  $\lambda = 0,4...1,8\text{мкм}$ ;
- коефіцієнт пропускання поляризаційної пластинки  $\tau_{\text{п}} = 0,1$ ;
- параметри РОВ: коефіцієнт пропускання  $\tau_{\text{с}} = 0,5$ , осьова товщина  $d_{\text{с}} = 0,001\text{м}$ .

Для порівняльного розрахунку КВЗЯ за схемою з безпосереднім опроміненням ВДВ за законом зворотних квадратів відстаней (рис. 1), схемою з опроміненням ВДВ за законом зворотних квадратів відстаней та використанням додаткових РОВ, наприклад фотометричних сіток (рис. 2), схемою з опроміненням ВДВ за законом зворотних квадратів відстаней та конденсором (рис. 3) використовувалися наступні фотометричні співвідношення:

$$L_{\text{ВДВ}}(l) = \frac{r_{\text{л}}^2 \cdot L_{\text{л}} \cdot \tau}{l^2} \quad (\text{або } L_{\text{ВДВ-2}}(l) = \frac{(r_{\text{л}} \cdot \beta)^2 \cdot L_{\text{ВДД-1}} \cdot \tau}{l^2}), \quad (1)$$

$$L_{\text{ВДВ}}(l) = \frac{L_{\text{л}} \cdot r_{\text{л}}^2 \cdot \tau}{l^2 + r_{\text{л}}^2} \quad (\text{або } L_{\text{ВДВ-2}}(l) = \frac{L_{\text{ВДД-1}} \cdot (r_{\text{л}} \cdot \beta)^2 \cdot \tau}{l^2 + (r_{\text{л}} \cdot \beta)^2}). \quad (2)$$

Формула (1) використовується, коли розсіювальна площадка перебуває на великій відстані відносно ПДВ (або ВДВ-1 для рис. 3). Формула (2) – для випадку, коли розсіювальна площадка знаходиться на невеликій відстані відносно ПДВ (ВДВ-1).

В схемі з поляризаційними ослаблювачами (рис. 4) зміна яскравості обчислюється наступним чином:

$$L_{\text{ВДВ}}(\varphi) = \frac{\Phi_{\text{ос}} \cdot \tau}{\pi^2 \cdot (r_{\text{л}} \cdot \beta)^2} \cdot \cos^2(\varphi), \quad (3)$$

де  $\Phi_{\text{ос}}$  – потік, що надходить у площину ВДВ через оптичну систему та поляризатори.

Для схеми з опроміненням розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней та інтегруючою сферою (рис. 5) використовуються співвідношення (4) відповідно для невеликих відстаней між вихідною зіницею і розсіювальною площадкою та великих:

$$L_{\text{ВДВ-2}}(l) = \frac{L_{\text{ВДВ-1}} \cdot \tau \cdot R_3^2}{l^2 + R_3^2} \quad (L_{\text{ВДВ-2}}(l) = \frac{L_{\text{ВДВ-1}} \cdot \tau \cdot \pi \cdot R_3^2}{\pi \cdot l^2}), \quad (4)$$

де  $L_{\text{ВДВ-1}}$  – яскравість вихідної зіниці сфери (першого ВДВ), яка розраховується за методикою работ [15-16].

В схемі з двома інтегруючими сферами і РОВ (рис. 6) яскравість вихідної зіниці другої сфери залежить від площі отвору між сферами наступним чином:

$$L_{ВДВ-2}(A_{отв}) = \frac{\rho \cdot L_{ВДВ-1} \cdot A_{отв}}{4\pi \cdot R_{сф}^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \cdot A_{IC-2}^{эф}}, \quad (5)$$

де  $L_{ВДВ-1}$  розраховується аналогічно до попередньої схеми,  $A_{отв}$  – площа отвору РОВ,  $A_{IC-2}^{эф}$  – відносна ефективна площа другої сфери.

В таблиці наведені оцінки характеристик перерахованих схем з урахуванням зазначених вихідних даних.

Оцінку лінійної зони, де нелінійність розподілу яскравості по перетину вихідної зіниці КДЗЯ не перевищує 1...2% для схем на рис. 1 та рис. 2, можна виконати по даним роботи [17]. З відповідного графіку знаходимо, що розмір лінійної зони дорівнює  $\Delta d_{лін}(I_{min}) = 1,8 \cdot 10^{-3}$ , м.

Оскільки збільшення конденсора дорівнює  $2^x$ , то розмір лінійної зони також збільшується вдвічі, тому для схем, показаних на рис. 3, рис. 4  $\Delta d_{лін}(I_{min}) = 3,8 \cdot 10^{-3}$ , м.

Для схем, зображених на рис. 5, рис. 6 лінійною зоною вважається вся вихідна зіниця сфери  $\Delta d_{лін} = 0,05$ , м.

### Висновки

Проведений аналіз схем випромінювачів показав:

- Схема з безпосереднім опроміненням вторинного джерела випромінювання за законом зворотних квадратів відстаней та аналогічна схема з додатковими РОВ забезпечують найбільшу яскравість, найменшу селективність та є найбільш простими, але мають досить великі габарити.

- Схема з конденсором створює меншу ( майже в 4 рази) максимальну яскравість, ніж дві попередні, і при цьому має майже такі ж габарити. Схема потребує ретельного вибору оптичної системи, яка впливає на спектральну характеристику та однорідність яскравості ВДВ.

- Найгіршою є схема з поляризаційними ослаблювачами, яка має найнижчий узагальнений показник. Основні недоліки: спектральне поглинання поляризаційними фільтрами випромінювання, низький рівень створюваної яскравості ВДВ та велика похибка встановлення яскравості.

- Схема, заснована на використанні фотометричних властивостей інтегруючої сфери та закону зворотних квадратів відстаней, має великий розмір лінійної зони, але й найбільші габарити. Зменшення габаритів такої схеми можна досягти шляхом введення допоміжних РОВ, наприклад сіток. Рівень яскравості значно менший, ніж у схемах з безпосереднім опроміненням ВДВ та з додатковими РОВ.

- Схема з двома інтегруючими сферами забезпечує дещо нижчий рівень яскравості, ніж попередня схема, але даний параметр можна покращити за рахунок збільшення кількості ПДВ. Перевагою є можливість використання вихідної зіниці другої сфери без додаткового розсіювача.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що найбільш перспективними можна вважати схему на законі зворотних квадратів відстаней з додатковими РОВ (сітками) та схему з двома інтегруючими сферами, які мають значні резерви покращення характеристик.

В подальшому планується більш детально дослідити ці схеми з урахуванням вимог конкретних фотометричних пристроїв і наявної в Україні елементної бази та розробити КВЗЯ для прецизійної метрології.

### Література

1. Воропай Е. С., Торпачев П. А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. – Минск: Университетское, 1988. – 223с.

2. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике. – М.: Радио и связь, 1990. – 254с.
3. Измерение параметров приёмников оптического излучения / Под ред. Л. Н. Курбатова, Н. В. Васильченко. – М.: Радио и связь, 1983. – 320с.
4. Hand W. G. A practical Guide to Digital Microscopy // Photonics Spectra. – 2001. – № 1. – P. 100 – 104.
5. Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Міхеєнко Л. А. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2003. – №3. – С. 98 – 104.
6. Воронков Г. Л. Ослабители оптического излучения. – М.: Радуга, 1976. – 216с.
7. Смолько Г. П., Фаерман Г. П. Сравнительный анализ фотометрических систем ослабления света // ОМП. – 1978. – № 1. – С. 53 – 58.
8. Сафаров Г. А. Исследование погрешности аттестации градуировочного клина методом квадратов расстояний // Изм. техн. – 1970. – № 6. – С. 64 – 68.
9. Андреева Н. В., Филимонов В. С. Сетчатые ослабители света с чёрным хромовым покрытием // ОМП. – 1971. – №2. – С. 51 – 52.
10. Епанешников М. М. Общие принципы конструирования и расчёт светильников с решётчатыми затенителями // Светотехника. – 1957. – № 6. – С. 39 – 43.
11. Воронков Г. Л. Ослабители излучения о. к. г. (обзор) // ПТЭ. – 1973. – № 2. – С. 16 – 22.
12. Фаерман Г. П., Година Д. А., Савко С. С. Современные поляризационные светофильтры // ОМП. – 1967. – № 12. – С. 49 – 53.
13. Войшвилло Н. А. Новое стекло для рассеивания направленного проходящего излучения // ОМП. – 1971. – № 5. – С. 40 – 43.
14. Гуревич М. М. Фотометрия. – Л.: Энергия, 1983. – 272с.
15. Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Міхеєнко Л. А. та ін. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2005. – №4. – С. 106 – 114.
16. Теоретичне обґрунтування принципів створення багатоканальних оптикоелектронних систем // Звіт про НДР 2636ф.- НТУУ "КПІ". – 2005. – № держреєстрації 0103U000294.- 194 с.

Таблиця. Основні характеристики схем КВЗЯ

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ  
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 539

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА  
РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

*Усачев П.А., Национальный технический университет Украины «Киевский  
политехнический институт», г. Киев, Украина*

*В статье получены соотношения сил, действующих на рабочих поверхностях режущего  
инструмента*

**Введение. Постановка задачи**

Определение силы резания, то есть силы, которую необходимо приложить к режущему инструменту для снятия слоя материала с обрабатываемой поверхности расчетным методом явилось одной из первых задач, которую решает наука о резании материалов. Исследованием силы резания и изучением влияния на ее величину и направление различных параметров процесса металлообработки занимались: Н.Н. Зорев [1], М.И. Клушин [2], Т.Н. Лоладзе [3], А.Н. Бетанели [4], С.П. Выслоух [5] и другие ученые в нашей стране и за рубежом.