

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**БУРЛЄСВ ОЛЕГ ЛЕОНІДОВИЧ**



УДК 531.74: 628.92

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
ПЕРЕМІЩЕНЬ В КОМП’ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ КУТОВИХ  
ПАРАМЕТРІВ ЛІТАКА**

Спеціальність 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі авіаційних приладів та вимірювань у Національному аерокосмічному університеті імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Кошовий Микола Дмитрович,**  
Національний аерокосмічний університет  
ім М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
завідувач кафедри авіаційних приладів та вимірювань

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Семенов Сергій Геннадійович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри обчислювальної техніки та програмування

кандидат технічних наук, доцент  
**Кошман Сергій Олександрович,**  
Харківський національний технічний університет сільського  
господарства ім. П. Василенка,  
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих  
технологій

Захист відбудеться 25 лютого 2016 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, ауд.54 ЕК.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 20 січня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



І.Г. Ліберг

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** З точки зору надійності та безпеки, задача діагностики та верифікації працездатності літака перед польотом стоїть на першому місці серед інших. Для прискорення процесу контролю доцільно застосовувати швидкодіючі комп'ютерні системи, що працюють на спеціалізованому програмному забезпеченні. Сучасні комп'ютерні системи контролю та діагностики забезпечують високі вимоги при визначенні величини досліджуваного параметра, в першу чергу, завдяки первинним перетворювачам, що входять до їх складу.

Одним з найважливіших показників, який вимагає контролю при технічному обслуговуванні літака, є кутове переміщення його рульових поверхонь. В першу чергу, це пов'язано з тим, що при пілотуванні літального апарату від точності відпрацювання рульових відхилень залежить, наскільки точно він зможе витримувати заданий напрямок руху. Наявність похибки між заданим кутовим переміщенням рульової поверхні і фактичним приведуть до більших витрат палива, збільшення часу перельоту, а також створення аварійних ситуацій при зльоті та посадці. При цьому процес контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака на вітчизняних авіазаводах зводився до ручного вимірювання досліджуваного параметра за допомогою кутомірів. Такі дослідники, як: Гордієнко В. О., Оганесян А. С., Цеховський М. В., Субота О. М. займалися задачею автоматизації цього процесу, використовуючи фотоелектричні перетворювачі для збору інформації про кутові переміщення, але створені вимірювальні засоби мають великі габарити та низький рівень адаптації до різноманітних конструкцій рульових поверхонь, що не дає можливості підвищити точність вимірювання і розширити галузь їх застосування. Виходячи з цього, виникає необхідність в усуненні вказаних недоліків вимірювальних пристроїв для комп'ютерних систем контролю.

Таким чином, вдосконалення фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень комп'ютерних систем контролю для інтеграції в процес тестування повітряного судна є актуальною науково-практичною задачею, що визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі авіаційних приладів та вимірювань у Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» згідно з планом держбюджетної НДР МОН України «Методологія проектування елементів та інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів авіаційних двигунів і промислових паливно-енергетичних комплексів» (№ ДР 0111U001072), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і завдання дослідження.** *Мета дослідження* – вдосконалення процесу вимірювання і контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака за рахунок розробки та оптимізації фотоелектричних перетворювачів з можливістю інтеграції у комп'ютерні системи контролю.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів перетворення кутового переміщення і пристроїв, що їх реалізують.

2. Вдосконалити методи фотоелектричного вимірювання кутових переміщень для комп'ютерних систем контролю та розробити пристрої, що їх реалізують.

3. Розробити комплекс алгоритмів оптимізації планів багатофакторного експерименту з врахуванням вартісних та часових показників.

4. Розробити програмні засоби, що забезпечують оптимізацію планів багатофакторного експерименту вибраним методом.

5. Провести експериментальне дослідження розроблених фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень і розробити архітектуру комп'ютерної системи контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака.

6. Впровадити результати досліджень в практику промислових підприємств та організацій.

*Об'єкт дослідження* – процеси вимірювання і контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака.

*Предмет дослідження* – фотоелектричні перетворювачі кутових переміщень в комп'ютерних системах контролю.

**Методи дослідження.** При створенні перетворювачів кутового переміщення використовувався метод синтезу цифрових пристроїв. Дослідження і вдосконалення фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень, а також комп'ютерних систем контролю відхилень рульових поверхонь літака проводилось із застосуванням методу математичного, імітаційного та напівнатурного моделювання. Для генерації оптимальних за вартісними і часовими показниками планів експерименту застосовувались наступні методи: аналіз перестановок строк матриці, метод випадкового пошуку, метод гілок і меж. Отримання математичних моделей вимірювальних пристроїв здійснювалось з використанням планування експерименту і методів математичної статистики, а знаходження екстремумів – методу спряжених градієнтів.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

– *вдосконалені* методи фотоелектричного вимірювання кутових переміщень у комп'ютерних системах контролю, в яких, на відміну від існуючих, застосовуються такі компоненти, як: дзеркало, блок підтримки рівня, кодовий диск з трьома кодуючими доріжками, утримувачі оптичних елементів, що дозволяють проводити високоточні вимірювання і контроль кутових переміщень при відсутності технологічної можливості змінювати конструкцію об'єкту обертання, зменшити габаритні параметри вимірювальних пристроїв;

– *отримав подальший розвиток* синтез оптимальних планів багатофакторного експерименту для моделювання об'єктів за рахунок використання метода гілок та меж, що дає можливість підвищити точність та швидкодію мінімізації вартісних та часових показників при кількості факторів впливу ( $k > 3$ );

– *вперше* одержано математичні моделі роботи фотоелектричного перетворювача кутових переміщень рульової поверхні літака в кожній контрольній точці діапазону вимірювань, в яких враховано залежність чутливості фотоелектричного перетворювача від геометричного розміщення фотоприймачів відносно джерела випромінювання, що дозволяють підвищити точність вимірювального засобу до 1' та адаптувати його чутливість до особливостей конструкції рульової поверхні літака.

**Практичне значення отриманих результатів** для розробки комп'ютерної техніки полягає у створенні перспективних фотоелектричних перетворювачів як компонентів комп'ютерних систем контролю, що дозволяють швидко і з високою точністю проводити вимірювання кутового переміщення без внесення змін у конструкцію об'єкта дослідження. Розроблено алгоритмічні та програмні засоби для оптимізації планів багатофакторного експерименту при дослідженні систем, пристроїв та технологічних процесів, що потребують значних вартісних і часових витрат на їх реалізацію. Визначені оптимальні з точки зору рівномірності параметри розподілу торців світловодів фотоелектричного перетворювача кутових переміщень із застосуванням дзеркала, що дозволяють підвищити технологічність його виготовлення. Розроблена архітектура комп'ютерної системи контролю кутового переміщення рульових поверхонь літака, що дозволяє управляти геометричним розташуванням фотоприймача на координатній площині відносно джерела випромінювання. Отримані за математичними моделями координати розміщення фотоприймачів можуть застосовуватися при проектуванні перетворювачів кутових переміщень комп'ютерних систем контролю.

Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи підтверджена 5 патентами України та зареєстрованим в Державній службі інтелектуальної власності України свідоцтвом авторських прав на комп'ютерну програму.

Результати теоретичних і практичних досліджень дисертації впроваджені в практику підприємств і організацій: Харківського державного авіаційного виробничого підприємства (м.Харків), ПрАТ «Авіаконтроль» (м.Харків), Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» (м.Харків).

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення дисертаційної роботи, що подано до захисту, є самостійними розробками здобувача, серед них: розробка методів фотоелектричного вимірювання кутових переміщень для комп'ютерних систем контролю та функціональних схем пристроїв, що їх реалізують; розробка оригінального способу з'єднання вимірювального пристрою комп'ютерної системи контролю кутових переміщень з об'єктом обертання; розробка алгоритмічних засобів на базі методу гілок і меж для оптимізації планів багатофакторних експерименту та комп'ютерної програми для їх реалізації; синтез оптимальних планів експерименту за вартісними і часовими показниками за допомогою розробленої комп'ютерної програми; вибір елементної бази для фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень; конструювання експериментальної установки для моделювання функціонування рульової поверхні літака та знаходження коефіцієнтів математичних моделей роботи фотоелектричного перетворювача кутових переміщень в кожній контрольній точці діапазону вимірювання; визначення критерію оптимізації та оптимальних з точки зору рівномірності параметрів розподілу вхідних торців світловодів фотоелектричного перетворювача із застосуванням дзеркала; розробка архітектури комп'ютерної системи контролю кутового переміщення рульових поверхонь літака.

**Апробація результатів дослідження.** Наукові результати представлені у дисертаційній роботі розглядалися і обговорювалися на конференціях і конкурсах: Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт за напрямом

«Приладобудування 2007/2008» (м. Харків, 2008); Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ - 2008» (м. Харків, 2008); Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ - 2009» (м. Харків, 2009); III Міжнародній науковій конференції «Функціональна компонентна база мікро-, опто-, наноелектроніки» (Харків - Кацивелі, 2010); Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ - 2010» (м. Харків, 2010); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (м. Київ, 2013); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (м. Київ, 2015).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 20 роботах, з них: 7 – у фахових виданнях України, 1 – у закордонному періодичному фаховому виданні (SCOPUS), 1 свідоцтво Державної реєстрації прав автора на твір (комп'ютерна програма), 5 патентів України, 6 – у матеріалах конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу та 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 143 сторінки, включаючи: 46 рисунків за текстом, 6 рисунків на 2 окремих сторінках, 29 таблиць за текстом, 157 найменувань використаних науково-технічних джерел на 19 сторінках, 3 додатки на 10 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, показано її практичну спрямованість та зазначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами. На основі сформульованої мети роботи поставлено задачі дослідження, які потрібно вирішити для її досягнення. Дана характеристика об'єкту та предмету досліджень. Зазначено наукову новизну і подано коротку характеристику результатів дослідження, їх апробації та опублікування.

**Перший розділ** містить аналіз сучасних методів перетворення кутового переміщення. Серед них: потенціометричний, тензометричний, гравітаційний, ємнісний, п'єзоелектричний, магнітний метод на основі ефекту Хола, магніторезистивний, індуктивний, трансформаторний, магнітострикційний, оптичний методи. Наведено фізичний принцип дії, переваги та недоліки кожного метода. Для подальшого дослідження було обрано фотоелектричні пристрої, що базуються на оптичному методі вимірювання кутових переміщень, завдяки таким перевагам, як: висока точність, швидкодія, зручність конструювання малогабаритних конструкцій та з'єднання з комп'ютерними системами контролю.

Проаналізовано найбільш характерні конструкції фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень, представлена їхня класифікація за принципом дії, а також характерні недоліки. Визначено недостатність пристроїв, що одночасно об'єднують декілька з наведених переваг: малогабаритність конструкцій, можливість проводити високоточні вимірювання без внесення змін у конструкцію об'єкта дослідження, невелика кількість оптичних елементів.

Обґрунтовано доцільність розробки фотоелектричних перетворювачів, що використовуються у комп'ютерних системах контролю переміщень кутових параметрів літака. За основу взято дослідження пристроїв кутового переміщення рульових поверхонь літака.

У **другому розділі** вдосконалені методи фотоелектричного вимірювання кутових переміщень для комп'ютерних систем контролю. Запропоновано функціональні схеми вимірювальних пристроїв, що реалізують ці методи, описано принципи їхньої дії.

Удосконалено фотоелектричний метод за рахунок використання такого компонента як дзеркало, що встановлюється на відстані  $B$  від осі обертання об'єкта дослідження до точки дотику променя до дзеркала, коли об'єкт дослідження знаходиться в початковому положенні, і під кутом  $\beta$  до горизонталі, що проходить через центр осі обертання.

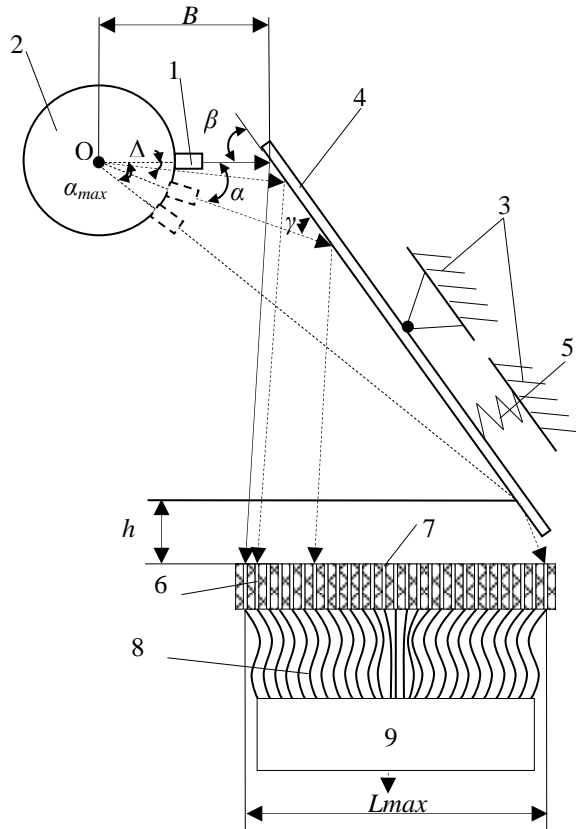


Рисунок 1 – Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень із застосуванням дзеркала

конкретному куту повороту об'єкта, вихідні торці 8 зібрані в джгути і оптично пов'язані з фотоприймальний блоком 9.

Кількість світловодів 6, вхідні торці 7 яких укладені по горизонтальній лінії, визначається за формулою

$$n = \frac{\alpha_{max}}{\Delta\alpha}, \quad (1)$$

Використання удосконаленого фотоелектричного методу у комп'ютерній системі контролю кутових переміщень дає можливість інтелектуалізувати процес збору даних про кутові переміщення, проводити високоточні вимірювання, не змінюючи конструкцію рульових поверхонь літака, зменшити габаритні параметри вимірювального пристрою у 2,5 рази. Точність методу досягає 2,5'.

На рис.1 представлена функціональна схема фотоелектричного перетворювача кутових переміщень з використанням дзеркала (патент України № 33044).

Пристрій складається з джерела світла 1, що закріплене на об'єкті дослідження 2, розміщених в одному корпусі 3 дзеркала 4, що за допомогою пружини 5 встановлено під кутом  $\beta$  до горизонтальної осі, яка проходить через центр обертання об'єкта дослідження 2, світловодів 6, вхідні торці 7 яких укладені по горизонтальній лінії таким чином, щоб положення кожного торця відповідало

де  $\alpha_{max}$  – максимальний кут повороту об'єкту;  $\Delta\alpha$  – розподільна здатність фотоелектричного перетворювача.

Залежність відстані, що проходить промінь по горизонтальній лінії укладки вхідних торців 7 світловодів 6, від кутового переміщення  $\alpha$  об'єкта дослідження (див. рис.1) має наступний вигляд

$$L = \frac{H}{\operatorname{tg}(2\beta - \alpha)} + \frac{B \sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \left( \cos \beta - \frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(2\beta - \alpha)} \right), \quad (2)$$

де  $H = \frac{B \cdot \sin \alpha_{max}}{\sin(\beta - \alpha_{max})} \cdot \sin \beta + h$ ;  $h$  – відстань від горизонтальної осі, яка проходить через точку дотику променя до дзеркала, коли об'єкт дослідження знаходиться в кінцевому положенні, до вхідних торців світловодів;  $B$  – відстань від осі обертання об'єкта до точки дотику світлового променя до дзеркала, коли об'єкт дослідження знаходиться в початковому положенні;  $\beta$  – кут нахилу дзеркала по відношенню до горизонтальної осі, яка проходить через центр обертання об'єкта дослідження ( $\beta > \alpha_{max}$ );  $\alpha$  – кутове переміщення об'єкта дослідження.

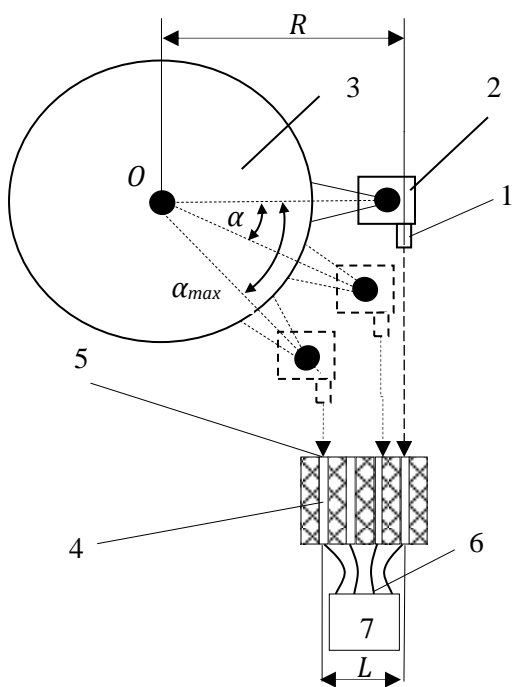


Рисунок 2 – Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень з блоком підтримки рівня

На рис.2 представлена функціональна схема фотоелектричного перетворювача кутових переміщень з блоком підтримки рівня (патент України № 61840). Пристрій складається з джерела світла 1, яке встановлюється на блоці підтримки рівня 2, що з'єднаний з об'єктом дослідження 3. Джерело світла 1 оптично пов'язане з світловодами 4, вхідні торці 5 яких укладені по горизонтальній лінії таким чином, щоб положення кожного торця відповідало конкретному куту повороту об'єкта дослідження 3, вихідні торці 6 зібрані в дугу та оптично пов'язані з фотоприймальним блоком 7.

Удосконалено фотоелектричний метод за рахунок використання такого компонента як блок підтримки рівня, який встановлюється на об'єкті обертання і дозволяє зберігати перпендикулярність напрямку променя від джерела світла по відношенню до вхідних торців світловодів, з'єднаних з фотоприймальним блоком. Використання удосконаленого методу у комп'ютерній системі контролю кутових переміщень дає можливість спростити математичну залежність (2), проводити високоточні вимірювання, не змінюючи конструкцію рульових поверхонь літака, зменшити в 4 рази габаритні параметри вимірювального пристрою. Точність методу досягає 4,8'.



Залежність відстані, що проходить промінь по горизонтальній лінії укладки вхідних торців 5 світловодів 4, від кутового переміщення  $\alpha$  об'єкта дослідження 3 має наступний вигляд

$$L = R(1 - \cos\alpha), \quad (3)$$

де  $R$  – відстань від осі обертання об'єкта до точки з'єднання джерела світла з об'єктом дослідження (див. рис. 2);  $\alpha$  – кутове переміщення об'єкта дослідження.

Запропоновано подальше удосконалення фотоелектричного методу та конструкції пристрою, що його реалізує, за рахунок використання кодового диску, на трьох кодуєчих доріжках якого з дискретністю  $q$  виконано отвори. Завдяки застосуванню кодового диску розширюється діапазон вимірювання кутових переміщень до  $360^\circ$ , зменшується до шести кількість світловодів. Точність методу досягає  $1,4'$ .

Для удосконаленого фотоелектричного методу з кодовим диском розроблено спосіб з'єднання компонентів комп'ютерної системи контролю між собою, зокрема об'єкту обертання та вимірювального пристрою. Завдяки цьому процес вимірювання кутових переміщень можна проводити, не змінюючи конструкції об'єкта обертання. Вказаний спосіб з'єднання захищено патентом України № 61854.

На рис.3 зображена функціональна схема фотоелектричного перетворювача кутових переміщень, що реалізує удосконалений метод з кодовим диском (патент України № 40489). Перетворювач кутових переміщень з кодовим диском має у

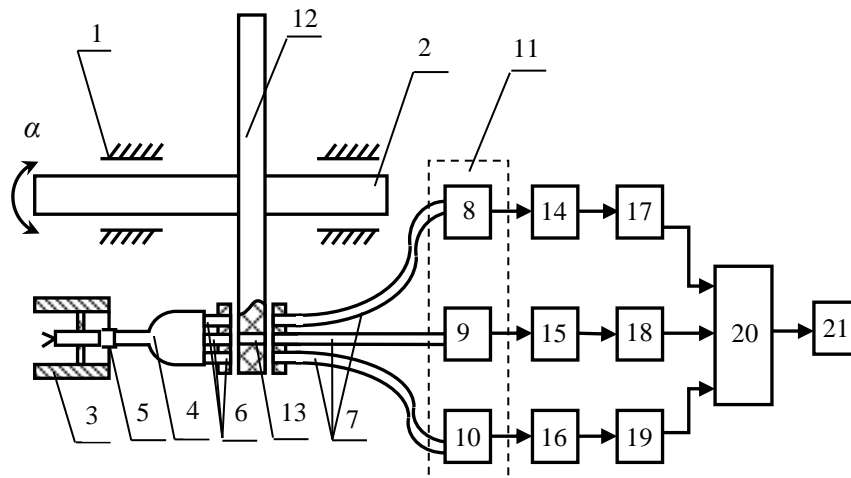


Рисунок 3 – Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень з кодовим диском

своєму складі корпус 1, розміщений в ньому і призначений для зв'язування з об'єктом вал 2, оптично пов'язані освітлювач 3, фокон 4, що кріпиться за допомогою фіксатора 5 до вихідного отвору освітлювача 3, в якому розміщені вхідні торці першої групи світловодів 6, другу групу світловодів 7, які своїми вихідними торцями оптично пов'язані з відповідними трьома фотоприймачами 8, 9, 10 фотоприймального блоку 11, диском 12 з отворами 13, що встановлений на валу 2 і розміщений між вихідними торцями першої групи світловодів 6 і вхідними торцями другої групи світловодів 7, причому виходи фотоприймачів 8, 9, 10

приєднанні до відповідних ланцюгів з послідовно з'єднаних підсилювача (14, 15, 16) та фільтра (17, 18, 19), що своїми виходами підключені до мікропроцесорного блоку 20, який приєднаний до пристрою відображення 21, а отвори диска 12 виконані на трьох доріжках 22 з дискретністю  $q$ .

Враховуючи високу вартість виготовлення кодового диска та оптоволоконних компонентів, що використовуються у вищевказаних методах фотоелектричного вимірювання кутових переміщень, доцільно використовувати більш дешеві компоненти у комп'ютерних системах контролю функціонування рульових поверхонь літака. Прийнято рішення удосконалити фотоелектричний метод, в якому не використовуються оптичні компоненти з високою вартістю, але зберігається можливість проведення високоточних вимірювань кутових переміщень без зміни конструкції об'єктів обертання. Поставлена задача вирішена за рахунок використання двох утримувачів з трьома оптичними елементами. На одному з них розміщено джерело випромінювання з драйвером живлення, а на іншому – два фотоприймача, що оптично зв'язані з джерелом випромінювання і розташовані на відстані  $R$  один від одного.

Запропоновано функціональну схему фотоелектричного перетворювача (рис. 4), що реалізує удосконалений метод вимірювання кутових переміщень рульової поверхні літака.

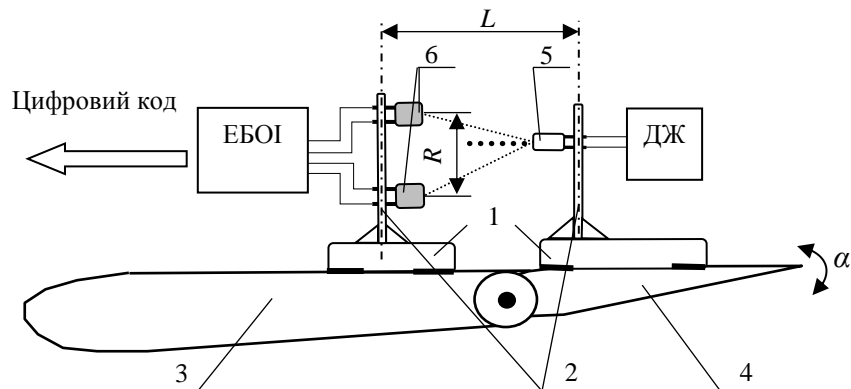


Рисунок 4 – Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень рульової поверхні літака

Пристрій містить дві підставки 1 з утримувачами 2, які приєднані за допомогою клею до крила літака 3 і рульової поверхні 4. У початковому положенні утримувачі 2 знаходяться на відстані  $L$  один від одного. Джерело випромінювання 5 з'єднане з драйвером живлення (ДЖ) і закріплюється на утримувачі 2 підставки 1, встановленої на рульовій поверхні літака 4. Два фотоприймача 6, розташовані на відстані  $R$  один від одного в одній площині, з'єднуються з електронним блоком обробки інформації (ЕБОІ), на вихід якого надходить цифровий код відповідний кутовому переміщенню рульової поверхні 4.

Практична значимість розроблених фотоелектричних перетворювачів, що реалізують удосконалені методи, полягає у можливості інтеграції у комп'ютерні системи контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака.

Таким чином, підвищено ефективність процесів вимірювання та контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака за рахунок інтеграції у комп'ютерні

системи контролю фотоелектричних первинних перетворювачів на базі удосконалених методів. Обґрунтовано використання розроблених вимірювальних пристроїв у тих галузях промисловості, де застосовуються об'єкти обертання, конструкції яких неможливо змінювати у процесі вимірювання та контролю кутових параметрів за допомогою комп'ютерних систем.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячено розробці комплексу алгоритмів та їх програмній реалізації для оптимізації за вартісними та часовими показниками планів багатофакторного експерименту при дослідженні пристроїв, інформаційно-вимірювальних систем і технологічних процесів.

Задача оптимізації планів багатофакторного експерименту з врахуванням вартісних та часових показників зводиться до вирішення двох екстремальних задач

$$S_0 = \sum_{i=1}^k V_i^{a_{i,1}} + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}} + \sum_{i=1}^k V_i^{a_{i,n}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$t_0 = \sum_{i=1}^k T_i^{a_{i,1}} + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}} + \sum_{i=1}^k T_i^{a_{i,n}} \rightarrow \min, \quad (5)$$

де  $S_0$  – сумарна вартість експерименту;  $k$  – кількість факторів;  $n$  – кількість дослідів;  $a_{i,j}$  – значення  $i$ -го фактору в  $j$ -м досліді;  $V_i^{a_{i,1}}$  – вартість установки  $i$ -го фактору в стан  $a_{i,1}$  у першому досліді;  $V_i^{a_{i,n}}$  – вартість установки  $i$ -го фактору в початковий стан  $a_{i,n}$  в останньому досліді;  $S_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}}$  – вартість установки  $i$ -го фактору в  $j$ -м досліді;  $t_0$  – сумарний час проведення експерименту;  $T_i^{a_{i,1}}$  – час установки  $i$ -го фактору в стан  $a_{i,1}$  у першому досліді;  $T_i^{a_{i,n}}$  – час установки  $i$ -го фактору в початковий стан  $a_{i,n}$  в останньому досліді;  $t_{i,j}^{a_{i,j-1}, a_{i,j}}$  – час установки  $i$ -го фактору в  $j$ -м досліді. Якщо необхідно врахувати обмеження на сумарний час або сумарну вартість проведення експерименту, екстремальні задачі (4,5) мають вигляд

$$S_0 \rightarrow \min \quad \text{при } t_0 \leq t_{обм}, \quad (6)$$

$$t_0 \rightarrow \min \quad \text{при } S_0 \leq S_{обм}. \quad (7)$$

де  $t_{обм}$  – обмеження на сумарний час проведення експерименту;  $S_{обм}$  – обмеження на сумарну вартість експерименту.

Рішення (4-7) здійснено методом гілок та меж, що має наступні переваги при його використанні в інших оптимізаційних задачах: вища збіжність, висока точність.

Запропоновано алгоритмічні та програмні засоби на основі метода гілок та меж. Перевірена працездатність алгоритмічних і програмних засобів при дослідженні пристроїв, інформаційно-вимірювальної системи та технологічного процесу (табл.1). Проведено порівняльний аналіз методів оптимізації планів багатофакторного експерименту на прикладі досліджень вимірювальних пристроїв та технологічного процесу (табл.2).

Таблиця 1 – Перевірка працездатності розроблених алгоритмічних та програмних засобів

№ з/п	Дослідження	Виграш за часовими та вартісними витратами
1	Безконтактні вимірювачі постійного струму і густини струму	1,33 рази (при $U_{жив} = 9В$ ) за вартістю 1,58 рази (при $U_{жив} = 5В$ ) за вартістю
2	Переносні діелькометричні вологоміри	1,14 рази за вартістю
3	Система витрат палива у двигунах внутрішнього згорання	1,2..1,3 рази за вартістю
4	Технологічний процес вимірювання площі металізації друкованих плат	1,5 рази за вартістю 1,2 рази за часовими витратами
5	Шорсткість поверхні кремнію при процесах глибокого плазмохімічного травлення елементів МЕМС	1,28 рази за вартістю при обмеженні 150 хвилин на сумарний час проведення експерименту

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз методів оптимізації планів багатofакторного експерименту

№ з/п	Дослідження	Вартість оптимізованого плану зазначеним методом, у.о.		
		Аналіз перестановок	Випадковий пошук	Метод гілок та меж
1	Вихротокові перетворювачі	112,85	101,8	53,05
2	Технологічний процес мідніння друкованих плат	86,62	70,15	43,84
3	Пристрій для контролю якості діелектричних матеріалів: а) електроспоживання б) точність	24,9	30	20,8
		24,7	29,4	20,8

Доказано ефективність використання алгоритмів на базі методу гілок та меж для об'єктів з кількістю факторів  $k > 3$ , а при  $k \leq 3$  оптимальні плани співпадають з планами, що отримані методом аналізу перестановок.

Практична значимість отриманих результатів підтверджується авторським свідоцтвом № 48821, що зареєстровано у Державній службі інтелектуальної власності України.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень розроблених фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень, обґрунтовано і розроблено архітектуру комп'ютерної системи контролю функціонування рульових поверхонь літака.

Досліджено фотоелектричний перетворювач кутових переміщень із застосуванням дзеркала для визначення параметрів  $B$ ,  $h$ ,  $\beta$ , що входять до математичної залежності (2), за яких розподіл торців світловодів укладених по горизонтальній лінії є найбільш рівномірним, що дає можливість підвищити

технологічність виготовлення вимірювального пристрою. В якості критерію оптимізації вибрано модуль максимальної різниці (рис.5) між  $\Delta L_i$  та  $\Delta L_{сер}$

$$\Delta_{max} = |\Delta L_i - \Delta L_{сер}|. \quad (8)$$

де  $\Delta L_i = L_i - L_{i-1}$ ;  $L_i$  – положення  $i$  – того вхідного торця світловода;  $L_{i-1}$  – положення  $(i - 1)$  – го вхідного торця світловода;  $\Delta L_{сер}$  – відстань між сусідніми вхідними торцями світловодів при їх рівномірному розподілі ( $\Delta L_{сер} = const$ ).

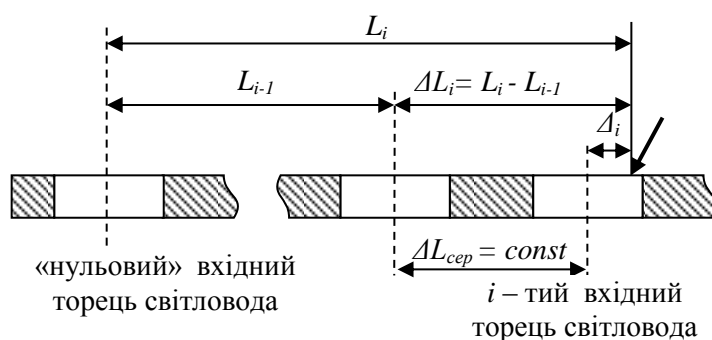


Рисунок 5 – Ілюстрація, яка пояснює величини, що формують критерій оптимізації

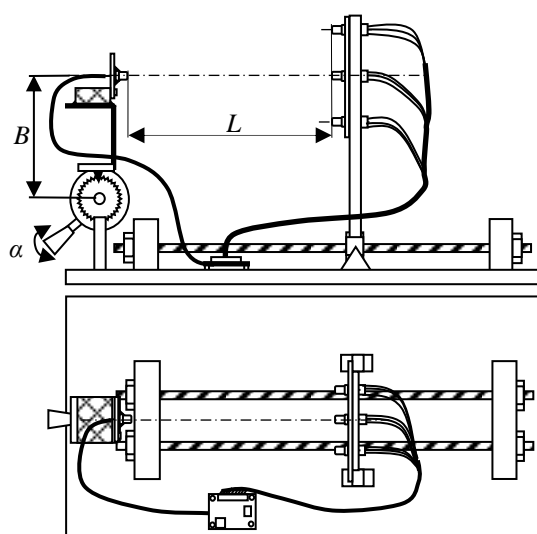


Рисунок 6 – Експериментальна установка для дослідження роботи рульової поверхні літака

Отримано наступні значення параметрів перетворювача:  $B = 30$  мм,  $h = 30$  мм,  $\beta = 53^\circ$ ,  $\Delta_{max} = 44$  мкм. При цьому за допомогою розроблених програмних засобів проведена оптимізація плану експерименту за вартісними показниками. Виграш оптимального плану склав 1,3 в порівнянні з початковим планом та 14% при обмеженні на час реалізації цього плану – 120 хв.

Досліджено фотоелектричний перетворювач кутових переміщень рульової поверхні літака (див. рис.4) для підвищення точності вимірювання та адаптації чутливості вимірювального пристрою до особливостей конструкції об'єкту обертання.

Спроековано експериментальну установку (рис.6), за допомогою якої змодельовано роботу рульової поверхні літака.

Розроблено принципову схему експериментальної установки. Зазначено перелік основних елементів, що входять до її складу. Вимірювання проведено при трьох різних значеннях відстані між утримувачем джерела випромінювання і утримувачем фотоприймачів  $L$ , а саме:  $L_1 = 110$  мм;  $L_2 = 150$  мм;  $L_3 = 220$  мм. Відстань від осі рульової поверхні літака до головної осі джерела випромінювання  $B = 150$  мм.

В якості параметра, що описує роботу фотоелектричного перетворювача, вибрано напругу на фотоприймачі –  $U_{VT}$ . Діапазон вимірювання кутового переміщення:  $\alpha \in [-30^\circ; 30^\circ]$  з кроком  $\Delta\alpha = 5^\circ$ . Обрано фактори, що впливають

на вказану характеристику:  $X_1$  – зміщення по горизонтальній осі відносно головної осі джерела випромінювання  $X$ , мм;  $X_2$  – зміщення по вертикальній осі відносно головної осі джерела випромінювання  $Y$ , мм

Прийнято рішення синтезувати квадратичну модель для заданого параметру оптимізації. Для цього фотоприймачі розміщені в точках ортогонального центрального композиційного плану (ОЦКП). В кожній контрольній точці діапазону вимірювання математична модель роботи вимірювального пристрою має вигляд

$$U_{VT}(\alpha_k) = \tilde{b}_0 + \sum_{j=1}^2 b_j(\alpha_k)X_j + \sum_{j=1}^2 \sum_{u=j+1}^2 b_{ju}(\alpha_k)X_jX_u + \sum_{j=1}^2 b_{jj}(\alpha_k)(X_j^2 - c), \quad (9)$$

$$\tilde{b}_0(\alpha_k) = b_0(\alpha_k) + c \sum_{j=1}^m b_{jj}(\alpha_k), \quad (10)$$

де  $U_{VT}(\alpha_k)$  – значення напруги  $k$ -тій контрольній точці діапазону вимірювання;  $\alpha_k$  –  $k$ -та контрольна точка діапазону вимірювання;  $c$  – параметр зміщення, що для двох факторів дорівнює  $c = 0,667$ ;  $b_0(\alpha_k)$ ,  $b_j(\alpha_k)$ ,  $b_{ju}(\alpha_k)$ ,  $b_{jj}(\alpha_k)$  – коефіцієнти математичної моделі в  $k$ -тій контрольній точці діапазону вимірювання.

Отримано математичні моделі роботи фотоелектричного перетворювача з врахуванням залежності чутливості пристрою від геометричного розміщення фотоприймачів відносно джерела випромінювання в кожній контрольній точці діапазону вимірювання. За допомогою методу спряжених градієнтів знайдено максимуми параметра оптимізації. В таблиці 3 показано значення  $U_{max}(\alpha_k)$  знайдені за адекватними математичними моделями з урахуванням безперервності вимірювань для  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , а на рисунку 7 їх представлено графічно.

Таблиця 3 – Значення  $U_{max}(\alpha_k)$  для  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$

$\alpha_k$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
$L_1$													
$U_{max}(\alpha_k)$	0,446	0,767	1,042	1,477	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$L_2$													
$U_{max}(\alpha_k)$	0,21	0,478	0,702	0,959	1,297	1,989	2,712	3,168	-	-	-	-	-
$L_3$													
$U_{max}(\alpha_k)$	0,05	0,342	0,575	0,655	0,9	1,12	1,438	1,718	1,807	2,079	2,829	-	-

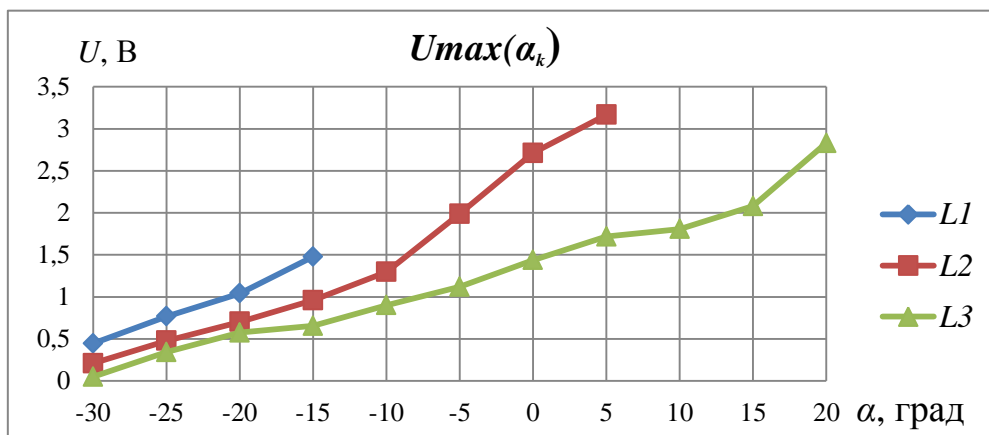


Рисунок 7 – Графічне представлення  $U_{max}(\alpha_k)$  для  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$

В таблиці 4 подано порівняльний аналіз основних результатів досліджень для  $L_1, L_2, L_3$ .

Таблиця 4 – Порівняльний аналіз основних результатів досліджень для  $L_1, L_2, L_3$

№ з/п	Відстань між джерелом випромінювання (ДВ) та фотоприймачем (ФП), мм	Мін. Чутл., В/град.	Макс.точність вимірювання, кутові хвилини	Діапазон вимірювання, град	Кількість ФП*, шт.
1	110	0,055	1	15	3
2	150	0,045	1,23	35	7
3	220	0,016	3,45	50	6

\* – кількість фотоприймачів визначається з урахуванням геометричних розмірів фототранзисторів, що використовуються ( $d = 4$  мм).

Визначено кількість фотоприймачів за рахунок використання пристрою керування (ПрК), що переміщує один фотоприймач згідно з координатами по одній осі при умові, що друга координата залишається незмінною (табл.5).

Таблиця 5 – Кількість ФП з використанням ПрК

№ з/п	Відстань між ДВ та ФП, мм	Кількість ФП, шт.	Кількість ФП, що переміщуються
1	110	1	1 ФП по осі X ( $Y = 70$ мм)
2	150	5	1 ФП по осі X ( $Y = 70$ мм)
3	220	2	1 ФП по осі Y ( $X = -30$ мм)

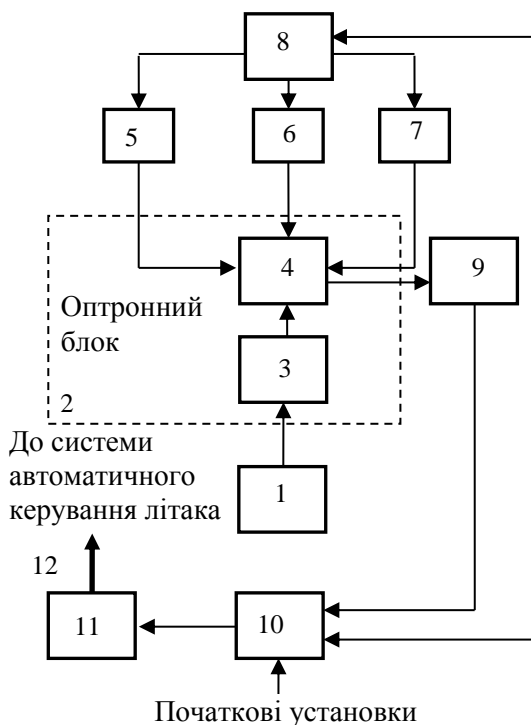


Рисунок 8 – Архітектура комп'ютерної системи контролю

Таким чином, в результаті експерименту: підвищено точність фотоелектричного перетворювача до 1' і адаптована чутливість вимірювального пристрою до конструктивних особливостей об'єкта обертання (рульових поверхонь літака).

На рис.8 показана архітектура удосконаленої комп'ютерної системи, яка має у своєму складі наступні компоненти: 1 – об'єкт контролю, 2 – оптронний блок, 3 – джерело випромінювання, 4 – фотоприймач, 5 – переміщувач по осі X, 6 – переміщувач по осі Y, 7 – переміщувач по осі Z, 8 – керуючий пристрій, 9 – перетворювач, 10 – персональний комп'ютер, 11 – з'єднувальний інтерфейс, 12 – вихідна шина.

Комп'ютерна система контролю кутового переміщення рульової поверхні літака може працювати в двох режимах: ручному та автоматичному. Якщо система автоматичного

управління літака дозволяє приєднання зовнішніх пристроїв, тоді комп'ютерна система контролю буде працювати в автоматичному режимі у такий спосіб. Персональний комп'ютер передає код номера контрольної точки кутового переміщення в керуючий пристрій, який по ньому формує сигнал для переміщувачів по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  для установки фотоприймача оптронного блока у відповідне положення. Керуючий пристрій сигналізує про завершення установки персональному комп'ютеру, який після цього передає контрольне значення кутового переміщення через з'єднувальний інтерфейс на вихідну шину, з якої ця інформація зчитується системою автоматичного управління літака. Об'єкт контролю при переміщенні змінює положення джерела інфрачервоного випромінювання  $Z$  відносно фотоприймача оптронного блока, в результаті чого на виході фотоприймача з'являється сигнал пропорційний кутовому переміщенню об'єкта контролю. Цей сигнал надходить на вхід перетворювача, де формується цифровий код, що передається для подальшої обробки до персонального комп'ютера. При ручному режимі роботи сигнал з комп'ютера до вихідної шини не надходить.

У пам'яті персонального комп'ютера зберігаються наступні дані: кількість контрольних точок, їхнє числове значення, відповідні кодові значення координат фотоприймача для кожної контрольної точки відповідного типу літака, що визначається експериментально, функція перетворення отриманого коду у величину кутового переміщення.

Комп'ютерна система контролю кутового переміщення рульової поверхні літака дає можливість використовувати лише один фотоприймач для вимірювання кутових переміщень, відтворювати реальні умови у процесі контролю, змінювати кількість контрольних точок вказаного діапазону вимірювання, отримувати візуальну загальну характеристику відхилення від норми кутового переміщення по всіх контрольних точках. Комп'ютерна система контролю рульових поверхонь літака запатентована у Державній службі інтелектуальної власності України (патент України № 96478).

## ВИСНОВКИ

Результатом дисертаційної роботи є вирішення задачі вдосконалення процесу вимірювання і контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака за рахунок розробки та оптимізації фотоелектричних перетворювачів з можливістю інтеграції у комп'ютерні системи контролю.

Зроблено наступні науково-практичні висновки:

1. Проаналізовано одинадцять сучасних методів перетворення кутових переміщень, що застосовуються у вимірювальних пристроях комп'ютерних систем контролю. Обґрунтовано доцільність подальшого аналізу пристроїв, що базуються на оптичному методі вимірювання кутових переміщень.

2. Вдосконалено методи фотоелектричного вимірювання кутових переміщень для комп'ютерних систем контролю та розроблено пристрої для їх реалізації. Застосування вказаних методів дозволяє інтелектуалізувати процес збору даних про кутові переміщення; зменшені в 2,5-4 рази габаритні параметри вимірювальних пристроїв; проводити високоточні вимірювання (від  $4,8'$  до  $1,4'$ ), не змінюючи



конструкції рульових поверхонь літака. Обґрунтовано розширення галузі застосування запропонованих фотоелектричних перетворювачів.

3. Розроблено комплекс алгоритмів для оптимізації планів багатофакторного експерименту з урахуванням вартісних та часових показників. Алгоритмічні засоби побудовано на базі методу гілок та меж. Реалізована можливість отримати альтернативні плани: з мінімальним значенням основного критерію; з мінімальним значенням додаткового показника.

4. Створено програмні засоби, що реалізують роботу розроблених алгоритмів, і доведена працездатність і ефективність застосування методу гілок і меж при дослідженні вимірювальних пристроїв, систем та технологічних процесів. Діапазон вигащів за вартістю реалізації оптимальних планів склав 1,14 - 1,58 рази. При використанні методу гілок та меж отримано діапазон вигащів оптимальних за вартістю планів багатофакторного експерименту 1,2 – 1,92 рази у порівнянні з методом випадкового пошуку та методом аналізу перестановок. Показано, що для дослідження об'єктів з кількістю факторів  $k > 3$  оптимальні плани експерименту доцільно отримувати методом гілок і меж, а при кількості факторів  $k \leq 3$  оптимальні плани, отримані методом гілок і меж і методом аналізу перестановок рядків матриці планування, співпадають.

5. Знайдено оптимальні з точки зору рівномірності параметри розподілу торців світловодів фотоелектричного перетворювача кута повороту в код із застосуванням дзеркала, зокрема:  $B = 30$  мм,  $h = 30$  мм,  $\beta = 53^\circ$ ,  $\Delta_{max} = 44$  мкм. За допомогою розроблених програмних засобів отримано вигащ оптимального за вартістю плану в порівнянні з початковим 1,3 рази, 14% з урахуванням обмеження на показник часу  $T_{обм} = 120$  хв. Знайдені математичні моделі роботи фотоелектричного перетворювача кутових переміщень з утримувачами оптичних елементів в кожній контрольній точці діапазону вимірювання. Визначено наступні параметри вимірювального пристрою: чутливість  $S_{min}=0,055$  В/град, точність  $1'$ , діапазон вимірювання  $\alpha \in [-30^\circ; -15^\circ]$  при  $L_1 = 110$  мм; чутливість  $S_{min}=0,045$  В/град, точність  $1,23'$ , діапазон вимірювання  $\alpha \in [-30^\circ; 5^\circ]$  при  $L_2 = 150$  мм; чутливість  $S_{min}=0,016$  В/град, точність  $3,45'$ , діапазон вимірювання  $\alpha \in [-30^\circ; 20^\circ]$  при  $L_2 = 220$  мм. Обґрунтовано і розроблено архітектуру комп'ютерної системи контролю кутового переміщення рульової поверхні літака, що дозволяє використовувати один фотоприймач для вимірювання кутових переміщень, відтворювати реальні умови у процесі контролю, змінювати кількість контрольних точок вказаного діапазону вимірювання, отримувати візуальну загальну характеристику відхилення від норми кутового переміщення по всіх контрольних точках.

6. Розроблені фотоелектричні перетворювачі, програмні засоби, комп'ютерна система контролю зареєстровані в Державній службі інтелектуальної власності України. Результати виконаних теоретичних та експериментальних досліджень підтверджуються їх апробацією і впровадженням у практику підприємств і організацій: Харківського державного авіаційного виробничого підприємства (м.Харків), ПрАТ «Авіаконтроль» (м.Харків), Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» (м.Харків).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бурлеев О.Л. Применение метода ветвей и границ для оптимизации многофакторных экспериментов / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев, Е.М. Костенко // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2010. – №1. – С.67-70.

*Здобувачем розроблено алгоритм метода гілок та меж для оптимізації планів багатofакторного експерименту і представлена його схема.*

2. Бурлеев О.Л. Сравнительный анализ методов оптимизации многофакторных планов эксперимента / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев, Е.М. Костенко // АСУ и приборы автоматики. – техн. сб. – Харьков: ХНУРЭ. – 2010. – Вып.150. – С.60-64.

*Здобувачем синтезовано оптимальні плани експерименту за вартісними та часовими витратами за допомогою метода гілок та меж. Проведено порівняльний аналіз синтезованих планів з оптимальними планами, що отримані методами випадкового пошуку та аналізом перестановок строк.*

3. Бурлеев О.Л. Оптимальное планирование эксперимента с введением ограничения по дополнительному критерию / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев, Е. М. Костенко // Вісник Сумського державного університету. – 2010. – №3. – Т. 2. – С. 63–67.

*Здобувачем розроблено алгоритм методу гілок та меж із введенням обмеження на додатковий показник для оптимізації планів багатofакторного експерименту і представлена його схема.*

4. Бурлеев О.Л. Применение метода ветвей и границ с введением ограничения по дополнительному критерию / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев, Е.М. Костенко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2010.– Вип. №28. – С.29-31.

*Здобувачем синтезовано оптимальні плани експерименту за вартісними і часовими витратами за допомогою метода гілок та меж із введенням обмеження на додатковий показник.*

5. Бурлеев О.Л. Оптимизация параметров распределения торцов световодов оптоволоконного преобразователя угла поворота в код / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев, Е.М. Костенко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – №4 – С.110-112.

*Здобувачем запропонована методика та проведено дослідження вимірювального пристрою, визначено критерій оптимізації параметрів розподілу торців світловодів з точки зору рівномірності, синтезовано оптимальний за вартісними витратами план експерименту, графічно представлені результати дослідження.*

6. Бурлеев О.Л. Програмні засоби для оптимізації планів експерименту за часовими і вартісними витратами / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, В. А. Дергачов, О. Л. Бурлеев, О. С. Чуйко// Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Д.: НГУ, 2011.– Вип. №36. – Т. 1. – С.76-82.

*Здобувачем розроблена комп'ютерна програма пошуку оптимальних планів багатofакторного експерименту методом гілок та меж, а також комп'ютерна*

*програма пошуку оптимальних планів багатофакторного експерименту методом гілок та меж при використанні одного із показників в якості обмеження.*

7. Burleiev O.L. Photoelectric methods of measuring the steering angle in aviation / N. D. Koshevoy, O. L. Burleiev, V. A. Gordienko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2012. – Vol. 71. – № 4. – pp. 759-762.

*Здобувач вибрав елементну базу для фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень.*

8. Бурлеев О.Л. Оптимизация геометрического расположения фотоприемников при контроле углового перемещения рулевых поверхностей самолета / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2014.– Вип. №.46 – С.36-44.

*Здобувачем запропонована методика дослідження, сконструйована експериментальна установка, знайдені коефіцієнти математичних моделей роботи вимірювального пристрою в кожній контрольній точці діапазону вимірювання, надані рекомендації щодо оптимізації кількості та геометричного розташування фотоприймачів відносно джерела випромінювання з точки зору максимізації чутливості.*

9. Пат. 33044 Україна, МПК(2006) G01B11/26. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень / М.Д. Кошовий, О.Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського «ХАІ». – № u200801273; заявл. 01.02.08; опубл.10.06.08, бюл. №11. – 4 с.

*Здобувачем розроблені фотоелектричний метод вимірювання кутового переміщення із застосуванням дзеркала і функціональна схема пристрою для його реалізації.*

10. Пат. 40489 Україна, МПК(2009) G01B11/26. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень / М.Д. Кошовий, М.В. Цеховський, О.Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського «ХАІ». – № u200813330; заявл. 18.11.08; опубл.10.04.09, бюл. №7. – 4 с.

*Здобувачем розроблені фотоелектричний метод вимірювання кутового переміщення з кодовим диском і функціональна схема пристрою для його реалізації.*

11. Пат. 61840 Україна, МПК(2006) G01B11/26. Фотоелектричний перетворювач кутових переміщень / М.Д. Кошовий, О.Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u201102380; заявл. 28.02.11; опубл.25.07.11, бюл. №14. – 4 с.

*Здобувачем розроблені фотоелектричний метод вимірювання кутового переміщення з використанням блока підтримки рівня і функціональна схема пристрою для його реалізації.*

12. Пат. 61854 Україна, МПК(2006) G01B11/26. Спосіб вимірювання кутових переміщень / М.Д. Кошовий, О.Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського «ХАІ». – № u201103265; заявл. 21.03.11; опубл.25.07.11, бюл. №14. – 4 с.

*Здобувачем розроблено схему з'єднання перетворювача кутового переміщення з об'єктом дослідження.*

13. Пат. 96478 Україна, МПК(2015.01) G06N99/00. Комп'ютерна система контролю кутового переміщення рульової поверхні літака / М.Д. Кошовий, О.Л. Бурлеев (Україна); заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u201408705; заявл. 01.08.14; опубл. 10.02.15, бюл. №3. – 3 с.

*Здобувачем розроблена архітектура комп'ютерної системи контролю кутових переміщень рульової поверхні літака.*

14. Комп'ютерна програма «Програма оптимізації послідовності реалізації планів багатофакторного експерименту» / М. Д. Кошовий, О. Л. Бурлеев // Свідоцтво про реєстр. авторського права на твір № 48821. – Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України Мін.освіти і науки, молоді та спорту 18.04.13.

*Здобувачем розроблено процедуру формування альтернативних оптимальних планів, процедуру формування робочої матриці та матриці значень переходів рівнів факторів обраного критерію оптимізації, процедуру генерації стандартного плану експерименту та інтерфейс програми.*

15. Бурлеев О.Л. Волоконно-оптический преобразователь угла поворота в цифровой код // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2008»: тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2008. – С. 103.

16. Бурлеев О.Л. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2009»: тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2009. – Том 2. – С. 74.

17. Бурлеев О.Л. Фотоэлектрические преобразователи для измерения неэлектрических величин / Т. Г. Рожнова, Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев, Е. М. Костенко // Сборник научных трудов III Международной научной конференции «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники»: тези доповідей. – Харьков-Кацивेलли, 28 сентября – 2 октября 2010. – С. 290-293.

*Здобувачем розроблені функціональні схеми фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень.*

18. Бурлеев О.Л. Оптимальное планирование эксперимента с введением ограничения по дополнительному критерию // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2010»: тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2010. – Том 2. – С. 93.

19. Бурлеев О.Л. Фотоэлектрический преобразователь для измерения угла поворота рулевой поверхности самолета / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013). VI міжнар. наук.-практ. конф., 27-29 травня 2013 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2013. – С. 77-78.

*Здобувачем розроблені фотоелектричний метод вимірювання кута повороту рульової поверхні літака і функціональна схема пристрою для його реалізації.*

20. Бурлеев О.Л. Усовершенствование компьютерной системы контроля углового перемещения рулевой поверхности самолета / Н. Д. Кошевой, О. Л. Бурлеев // Интегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2015). VII міжнар. наук.-практ. конф., 18-19 травня 2015 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2015. – С. 100-102.

*Здобувачем розроблена архітектура комп'ютерної системи контролю кутового переміщення рульової поверхні літака, а також сформульовано її принцип дії.*

## АНОТАЦІЇ

**Бурлеев О.Л. Вдосконалення фотоелектричних перетворювачів переміщень в комп'ютерних системах контролю кутових параметрів літака.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 - комп'ютерні системи та компоненти. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі вдосконалення процесу вимірювання і контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака.

Вдосконалено методи фотоелектричних вимірювань кутових переміщень рульових поверхонь літака для комп'ютерних систем контролю та розроблено функціональні схеми пристроїв, що їх реалізують. Розроблено алгоритмічні та програмні засоби, що реалізують оптимізацію планів багатofакторних експериментів з використанням методу гілок і меж. Знайдено оптимальні, з точки зору рівномірності, параметри розподілу торців світловодів фотоелектричного перетворювача кутових переміщень із застосуванням дзеркала. Вперше одержано математичні моделі роботи фотоелектричного перетворювача кутових переміщень рульової поверхні літака в кожній контрольній точці діапазону вимірювань, що дозволяють підвищити точність фотоелектричного перетворювача до 1' і адаптувати чутливість вимірювального пристрою до конструктивних особливостей рульових поверхонь літака. Обґрунтовано і розроблено архітектуру комп'ютерної системи контролю кутових переміщень рульових поверхонь літака.

**Ключові слова:** комп'ютерні системи контролю, програмні засоби, оптимізація, архітектура комп'ютерної системи, кутове переміщення, рульові поверхні літака, фотоелектричний перетворювач, експериментальне дослідження.

**Бурлеев О.Л. Усовершенствование фотоэлектрических преобразователей перемещений в компьютерных системах контроля угловых параметров самолета.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - компьютерные системы и компоненты. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи усовершенствования процесса измерения и контроля угловых перемещений рулевых поверхностей самолета.

Проанализированы современные методы преобразования угловых перемещений. Описан физический принцип их действия, указаны достоинства и недостатки каждого метода. Рассмотрены наиболее характерные конструкции преобразователей, реализующих оптический метод измерения. В результате анализа устройств определена нехватка преобразователей, которые одновременно объединяют несколько преимуществ, среди которых: малые габариты конструкций, возможность производить высокоточные измерения без внесения изменений в конструкцию объекта исследования, малое количество световодов.

Усовершенствованы методы фотоэлектрических измерений угловых перемещений рулевых поверхностей самолета для компьютерных систем контроля. В них, в отличие от существующих, используются такие компоненты, как: зеркало, блок поддержки уровня, кодовый диск с тремя кодирующими дорожками, держатели с оптическими элементами. Применение указанных компонентов позволяет проводить высокоточные измерения и контроль угловых перемещений при отсутствии технологической возможности изменять конструкцию объекта вращения, уменьшить габаритные параметры измерительных устройств.

Предложены функциональные схемы устройств, реализующих усовершенствованные методы, а также описаны принципы их действия. Обосновано расширение области их применения. Повышена эффективность процесса измерения угловых перемещений рулевых поверхностей самолета за счет интеграции в компьютерные системы контроля разработанных фотоэлектрических преобразователей.

Разработан комплекс алгоритмов для оптимизации планов многофакторного эксперимента с учетом стоимостных и временных показателей. Алгоритмические средства построены на базе метода ветвей и границ. Реализована возможность получать два альтернативных оптимальных плана: с минимальным значением основного критерия, с минимальным значением дополнительного показателя. Созданы программные средства, которые реализуют работу разработанных алгоритмов, для синтеза оптимальных по стоимостным и временным показателям планов многофакторного эксперимента. Показано, что для исследования объектов с количеством факторов  $k > 3$  оптимальные планы эксперимента целесообразно получать методом ветвей и границ, а при количестве факторов  $k \leq 3$  оптимальные планы, полученные методом ветвей и границ и методом анализа перестановок строк матрицы планирования, совпадают.

Определены оптимальные с точки зрения равномерности параметры распределения торцов световодов фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений с применением зеркала, в частности:  $B = 30$  мм,  $h = 30$  мм,  $\beta = 53^\circ$ ,  $\Delta_{max} = 44$  мкм. Впервые получены математические модели работы фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений рулевой поверхности самолета в каждой контрольной точке диапазона измерений, которые позволяют повысить точность измерительного устройства до  $1'$  и адаптировать его чувствительность к особенностям конструкции рулевых поверхностей самолета.

Обоснована и разработана архитектура компьютерной системы контроля угловых перемещений рулевых поверхностей самолета, позволяющая использовать один фотоприемник для измерения угловых перемещений, воссоздать реальные

условия в процессе контроля, изменять количество контрольных точек указанного диапазона измерения, получать визуальную общую характеристику отклонений от нормы угловых перемещений по всем контрольным точкам.

Разработанные измерительные преобразователи, программные средства, компьютерная система зарегистрированы в Государственной службе интеллектуальной собственности Украины.

**Ключевые слова:** компьютерные системы контроля, программные средства, оптимизация, архитектура компьютерной системы, угловое перемещение, рулевые поверхности самолета, фотоэлектрический преобразователь, экспериментальное исследование.

**Burleev O.L. Improvement of photoelectric converters movements in computer systems control the angular parameters of the aircraft. - Manuscript.**

Thesis for scientific the Degree candidate of technical sciences in the specialty 05.13.05 - computer systems and components. - National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, 2016.

The dissertation is devoted to solving scientific and applied tasks of efficiency rising measuring and control processes of angular displacement the aircraft steering surfaces.

The methods for photoelectric measuring the angular displacement the aircraft steering surfaces are improved and functional schemes of devices that implement them. The algorithmic tools and software that implements optimization multivariate experiments plans using branch and bound method is developed. The optimal parameters in term of uniform distribution of optical fiber butt ends the angular displacement photoelectric converters with application of mirror are found. First synthesized mathematical models of work the photoelectric converter the aircraft surface steering angle in each control point of the measuring range, which allow to increase accuracy photovoltaic 1' and adapt sensitivity of the measuring device to the design features the aircraft steering surfaces. The architecture of the computer system angular displacement steering control surfaces of the aircraft is and developed.

**Keywords:** computer control systems, software, optimization, computer system architecture, angular displacement, the aircraft steering surfaces, the photoelectric converter, experimental research.



Відповідальний за випуск: к.т.н., доц. кафедри авіаційних приладів та вимірювань  
Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»  
Потильчак О.П.