

УДК 681.586:620.172.21:629.735.05(045)

А. П. Козлов, канд. техн. наук,
Г. Г. Вальденмайер**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА КРИТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПОВІТРЯНОГО КОРАБЛЯ**

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: valdenmayer@gmail.com

Обґрунтовано потребу у впровадженні систем неперервного контролю технічного стану конструкції повітряного корабля. Розглянуто принцип побудови та конструктивні рішення неконтактного датчика деформацій елементів конструкції повітряного корабля. Наведено результати експериментальних досліджень статичних характеристик датчика мікропереміщень та виконано їх аналіз. Розглянуто конструкцію ємнісного перетворювача, що дозволяє отримати лінійну статичну характеристику, а також структурну схему трикоординатного вимірювача мікропереміщень як основного елемента системи.

Вступ. Як показує статистика авіаційних аварій та катастроф, однією з причин їх виникнення є руйнація елементів конструкції повітряного корабля (ПК). Тому одним з пріоритетних напрямів розвитку авіаційної техніки для забезпечення високого рівня безпеки польотів є створення та впровадження систем неперервного контролю технічного стану конструкції ПК.

Одними з основних характерних властивостей літальних апаратів є надійність, живучість їх конструкцій, які виявляються в процесі експлуатації і залежать не тільки від міцності конструкції, але й від інтенсивності зовнішніх впливів на ПК.

Натепер контроль експлуатаційно-технічного стану ПК здійснюється згідно з регламентом. Терміни проведення регламентних робіт визначаються за статистикою досліdnих випробувань з максимально можливою ймовірністю безвідмовності. Однак, як показує світова практика, не завжди окремі елементи конструкції ПК здатні нормально функціонувати протягом передбаченого регламентом періоду експлуатації, що, в свою чергу, може призвести до виходу з ладу основних вузлів чи їх руйнування [1].

Під час експлуатації на конструкцію ПК діють різноманітні навантаження, складні за характером та змінні в часі. В результаті дії цих сил нагромаджуються втомні деформації, що характеризуються поступовим накопиченням незворотних змін у структурі матеріалу і виникненням пластичних деформацій та мікротріщин з наступним утворенням магістральної

макротріщини, що призводить до руйнування конструкції. Більшість деталей та основних елементів конструкції ПК виготовлені з різноманітних металів, які мають різні характеристики пластичності, твердості та міцності матеріалів.

Загальну залежність деформацій пружних металів від навантаження (закон Гука), використовуваних при створенні основних вузлів конструкції ПК, показано на рис. 1. Як видно з цього графіка, ділянка OA відповідає пружній деформації елементів конструкції ПК, а ділянка AB характеризує виникнення пластичної деформації. Більшість елементів конструкції мають високий ступінь твердості та міцності матеріалу і відповідно дуже низький ступінь пластичності. Тому, роблячи висновок викладеного, зрозуміло,

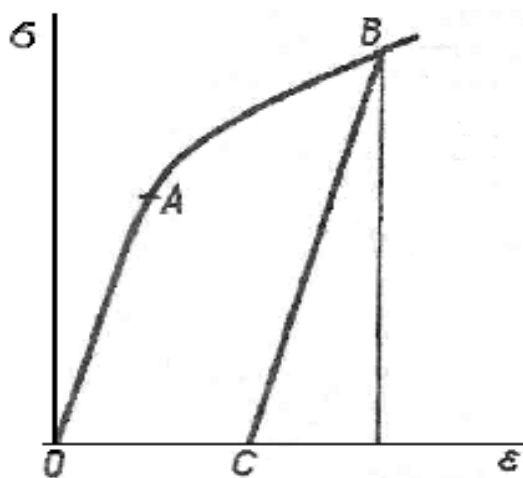


Рис. 1. Графік залежності деформації пружних металів:

σ — навантаження, ϵ — деформація

що будь-яке виникнення пластичної деформації досить небезпечно, оскільки може надалі призвести до виникнення мікротріщин і як наслідок – до руйнування конструкції ПК. Такі пластичні деформації в авіації називають критичними деформаціями конструкції ПК. Тому контроль появи критичних деформацій основних елементів надзвичайно важливий для попередження руйнування конструкції ПК.

Суттєвим недоліком проведення контролю експлуатаційно-технічного стану ПК за регламентом є те, що інколи певні елементи та вузли ПК, ресурс яких закінчився, можна і надалі експлуатувати, оскільки їх технічний стан відповідає всім встановленим нормам, але їх знімають з експлуатації через закінчення ресурсного терміну експлуатації.

І саме тому контроль деформацій конструкцій ПК є важливим, оскільки це доцільно у сенсі як безпеки польотів, так і економічної вигідності.

На сучасних ПК застосовують діагностичні системи автоматичного розпізнавання технічних відмов обладнання з видачею мовного попередження пілота. Однак дотепер на жодному сучасному ПК немає системи неперервного контролю стану конструкції ПК. Тому створення ефективних систем для здійснення неперервного контролю стану вузлів та елементів конструкції ПК є одним з пріоритетних напрямів розвитку сучасної авіаційної техніки. Неперервний контроль знизить ймовірність аварійного руйнування конструкції під час експлуатації і дозволить подовжити термін експлуатації ПК у разі штатного стану конструкції після закінчення регламентного терміну.

Аналіз засобів вимірювання деформацій елементів конструкції ПК та обґрунтування необхідності розроблення. В авіації розрізняють два типи контролю стану основних елементів ПК:

- проведення регламентних перевірок і заміни основних вузлів та елементів;
- контроль “за станом”.

Перші дослідження пов’язані зі створенням ефективної системи контролю “за станом” були розпочаті ще на початку 70-х років XX ст. Однак на той час рівень розвитку вимірювальної техніки тогочасних технологій не дозволили здійснити їх реалізацію.

У сучасній техніці та промисловості існує широкий спектр датчиків різного призначення для вимірювання деформацій та мікропереміщень контрольованої поверхні. Всі ці датчики за способом вимірювання поділяють на дві великі групи:

- контактні;
- безконтактні.

Основними перевагами контактних датчиків є простота виготовлення та висока точність вимірювання, однак такі датчики мають ряд суттєвих недоліків – чутливість до зовнішніх кліматичних умов, вплив на контрольовану поверхню тощо. Найбільш поширеними видами контактних датчиків у промисловості і в авіації є тензодатчики, ємнісні датчики з використанням п’єзокераміки для вимірювання деформацій контрольованої поверхні та ємнісні датчики для вимірювання переміщень за трьома координатами [2; 3] тощо.

За безконтактного методу вимірювання первинний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуванним об’єктом і не спотворює його параметрів. За фізичними властивостями, що покладені в основу принципу дії, безконтактні перетворювачі неелектричних величин в електричні поділяють на індуктивні, ємнісні, оптичні і ультразвукові [3; 5].

Ємнісні датчики ґрунтуються на перетворенні вхідної величини в зміну ємності конденсатора. Ємність конденсатора визначається його конструктивними параметрами і відносною діелектричною проникністю середовища між обкладками. Однак величина ємності датчика через мініатюрність конструкції зонда датчика дуже мала, що ускладнює вимірювання. Це змушує створювати конструкцію ємнісного датчика і вимірювальну схему придатними для вирішення поставленої задачі.

У зв'язку з цим на сьогодні постала важлива проблема, пов'язана зі створенням ефективного, надійного та точного датчика деформацій контрольованої поверхні. Найбільш близьким за технічним рішенням є вимірювач мікропереміщень, розроблений для контролю формозмін конструкції під час електрозварювання [1].

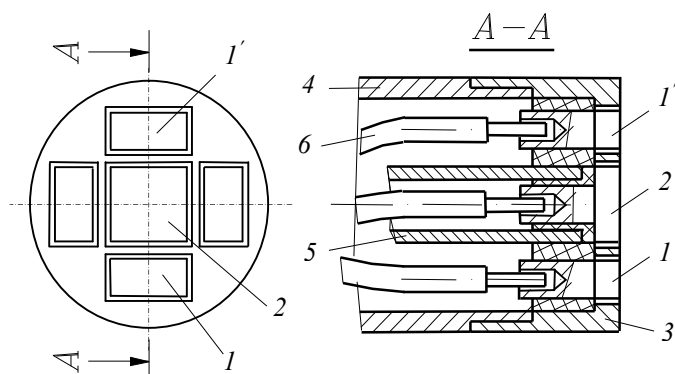


Рис. 2. Зонд ємнісного датчика мікропереміщень:

- 1, 1' – високопотенційні електроди;
 2 – низькопотенційний електрод; 3 – “маска” зонда;
 4 – корпус; 5 – екран низькопотенційного електрода;
 6 – виводи

Датчик вимірювання формозмін призначено для вимірювання відхилення форми конструкції, отриманої після зварювання, від заданої форми. Пристрій складається із зонда датчика, корпуса з відповідними порожнинами для розміщення плати високочастотного генератора живлення, вимірювального моста, плечового трансформатора і вимірювальної схеми, двокоординатної платформи, призначеної для точної початкового виставлення і тарування датчика. Конструкція зонда (рис. 2) є системою електродів перетворювача ємності, яка формує електромагнітне

поле, що взаємодіє з контрольованою поверхнею. Вимірювач інформаційної ємності складається з генератора живлення Г, чотириплечового трансформаторного моста Т, С1, С2, системи електродів, що створюють ємнісний перетворювач, контрольної точки КТ, вхідного підсилювача П.

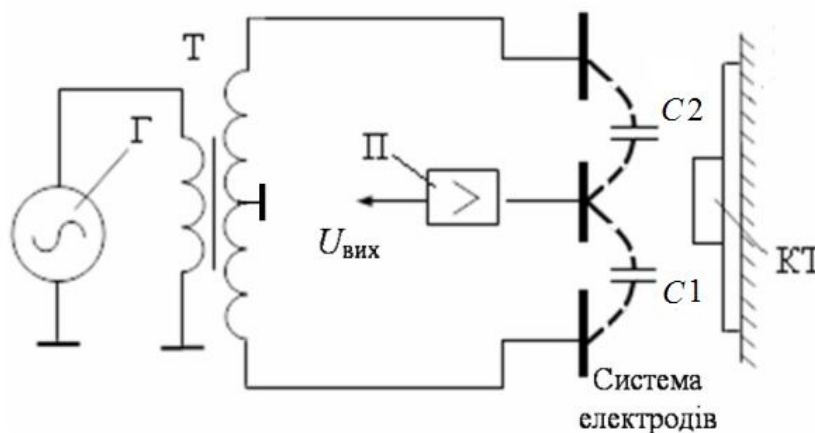


Рис. 3. Узагальнена структурна схема ємнісного перетворювача

Постановка завдання. Для проведення неперервного контролю технічного стану конструкції ПК було запропоновано створення системи контролю критичних деформацій елементів конструкції ПК [1]. До складу цієї системи входить комплект датчиків мікропереміщень, що розміщені на відповідних контрольованих елементах конструкції ПК та визначають величини критичних деформацій цих елементів. За обробленими сигналами з цих датчиків формується повна інформаційна картина про технічно-експлуатаційний стан конструкції ПК.

Однак для ефективною і надійною роботи такої системи необхідно, щоб вимірювальні пристрої максимально швидко, точно й однозначно оцінювали ситуацію і вимірювали величину деформації конструкції.

Експериментальні дослідження. Для вирішення цієї проблеми було проведено експериментальні дослідження вимірювального елемента запропонованої системи та побудовано його статичні характеристики (рис. 4).

Проведені експериментальні досліди та отримані дані показують, що форма статичних характеристик є нелінійною. Також з наведених результатів експериментів видно, що статичні характеристики несиметричні відносно нульової точки – коли деформації немає і вимірювальний міст перебуває в стані рівноваги.

Наявність несиметричності прослідковується для різних висот вимірювання критичних деформацій, але за формою вони схожі. Несиметричність статичних характеристик експериментальних даних може виникати через недосконалість конструкції вимірювального чутливого зонда та похибки вимірювань під час проведення експериментальних досліджень.

Нелінійність статичної характеристики – це ще одна проблема, що особливо гостро може постати під час створення системи контролю критичних деформацій конструкцій ПК, яка включає декілька датчиків критичних деформацій, розташованих у місцях, де стається найбільше руйнувань.

Оскільки нелінійність може призвести до неоднозначності між сигналами з різних датчиків та виникнення неправильних показань вимірювальних приладів, то це, в свою чергу, означає помилковий аналіз технічного стану конструкції ПК. Наслідком такої ситуації може бути невизначення небезпечної критичної деформації конструкції літака, що може спричинити її руйнацію.

Отже, вирішення проблеми нелінійності ємнісного датчика та розроблення перетворювача з лінійною статичною характеристикою – важливе завдання зі створення ефективної та надійної системи неперервного контролю критичних деформації конструкцій ПК.

Форма та характер вихідного сигналу залежать від конфігурації системи електродів вимірювального зонда – розміщення і розмірів випромінювального високопотенціального та вимірювального низькопотенціального електродів, форми і розмірів контрольної точки.

Основним принципом, що пропонується для вирішення проблеми нелінійності, є вибір форми, розмірів та взаєморозміщення системи електродів, геометричних параметрів контрольної точки, вибір оптимальної висоти розміщення зонда для отримання статичної характеристики, близької до лінійної.

Дослідження функції перетворення. Принцип дії ємнісних датчиків ґрунтується на перетворенні вхідної величини, тобто механічного переміщення, в зміну ємності конденсатора. Ємність конденсатора визначається його конструктивними параметрами і відносною діелектричною проникністю середовища між обкладками. Характер статичної характеристики залежить від форми контрольної точки та схеми розміщення випромінювального та приймального електродів на вимірювальному зонді. З огляду на це було досліджено три варіанти форм контрольної точки та схем розміщення випромінювальних та приймальних електродів (рис. 5).

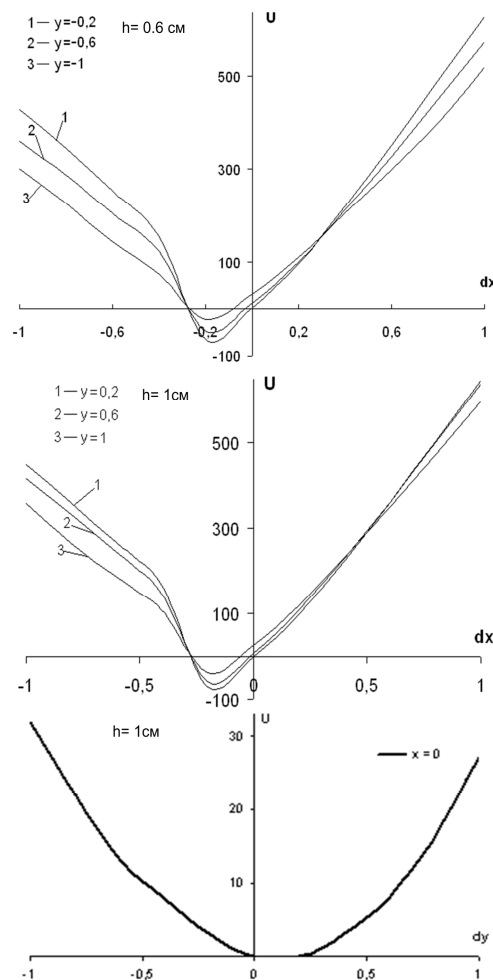


Рис. 4. Статичні характеристики датчика мікропереміщень

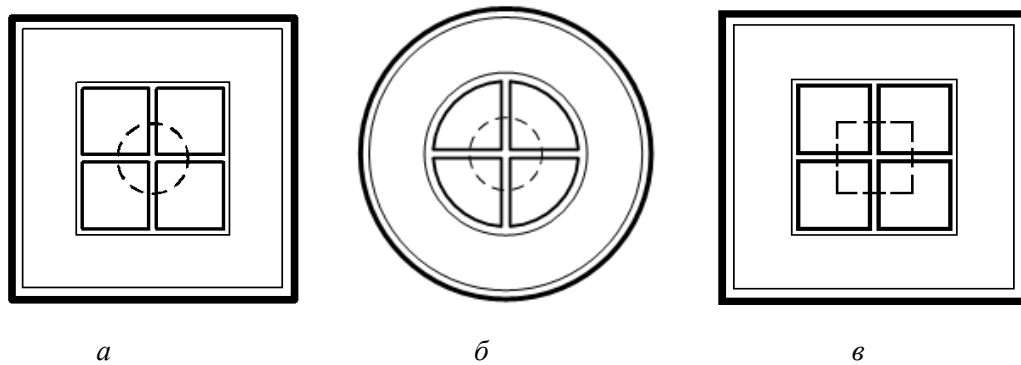


Рис. 5. Варіанти форм контрольної та схем розміщення випромінювальних і приймальних електродів

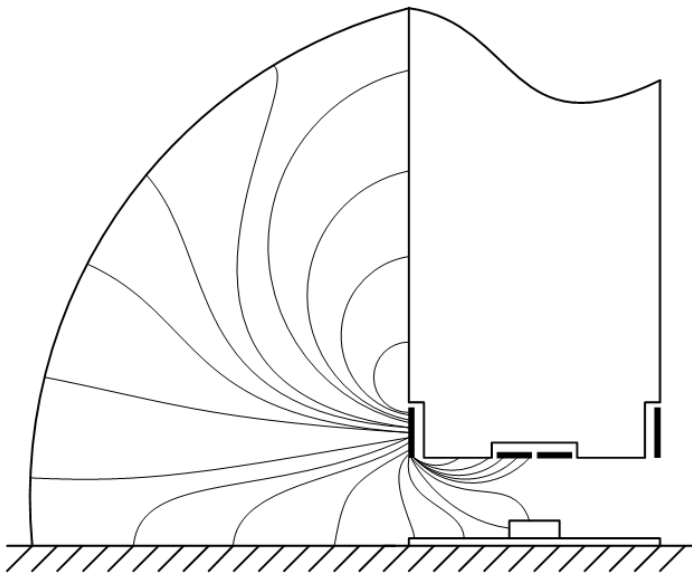


Рис. 6. Схема силових ліній електромагнітного поля випромінювальго електрода

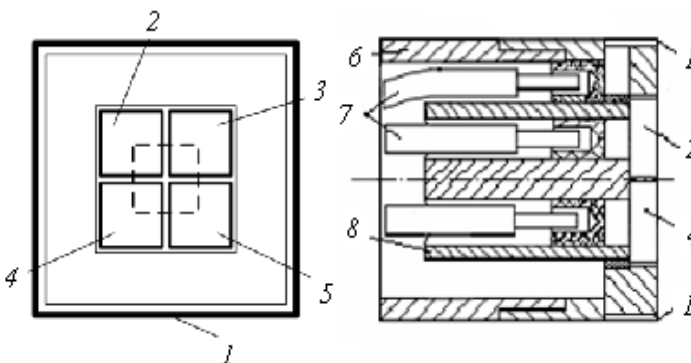


Рис. 7. Зонд ємнісного датчика критичних деформацій:
1 – високопотенціальний електрод; 2, 3, 4, 5 –
низькопотенціальні електроди; 6 – корпус; 7 – виводи;
8 – екран низькопотенціальних електродів

Як найбільш прийнятний визначено варіант *в* (рис. 5). Картину силового поля, що створюється системою електродів, показано на рис. 6. Аналіз силового поля показав, що основною причиною нелінійності статичної характеристики є наявність крайових ефектів приймальних електродів, тобто нелінійність розподілення щільності потоків електростатичної індукції на краях приймальних електродів. Для вирішення проблеми нелінійності статичної характеристики пропонується зменшити розміри контрольної точки. Як видно з аналізу експериментальних даних, лінійність статичної характеристики залежить також від відстані між приймальним зондом і контрольною точкою. Для того щоб величини вихідного сигналу були лінійнозалежні для різних поздовжніх та поперечних переміщень контрольної точки розглядається варіант форми контрольної точки, квадратної форми.

Розроблення конструкції чутливого елемента. Пристрій складається із зонда датчика, корпусу з відповідними порожнинами для розміщення плати чотириканального вимірювача інформаційних ємностей, кріплення для встановлення у місцях найбільш імовірних руйнувань.

Конструкція зонда (рис. 7) являє собою високопотенціальний електрод 1 у вигляді металевої смуги, що обгинає корпус зонда квадратного перерізу, та чотири квадратні низькопотенціальні

електроди, розділені один від одного ізолятором. Така схема розміщення електродів дозволяє досягнути лінійності статичної характеристики та її незалежності від положення контрольної точки у поперечному напрямі. Це досягається завдяки зменшенню розмірів контрольної точки відносно розмірів вимірювального зонда. Лінійність – дуже важлива характеристика для створення ефективної системи неперервного контролю стану елементів конструкції ПК.

Розроблення функціональної схеми вимірювача. Для високоточного і надійного вимірювання критичних деформацій з використанням розглянутої схеми розміщення електродів розроблено чотириканальний безконтактний датчик критичних деформацій, функціональну схему якого показано на рис. 8. Вимірювальна схема складається з таких частин: ємнісного перетворювача, генератора живлення вимірювального моста, багатоплевого трансформаторного моста, до якого підключено електроди системи; чотирьох підсилювачів, вісьмох суматорів; чотирьох опорних конденсаторів.

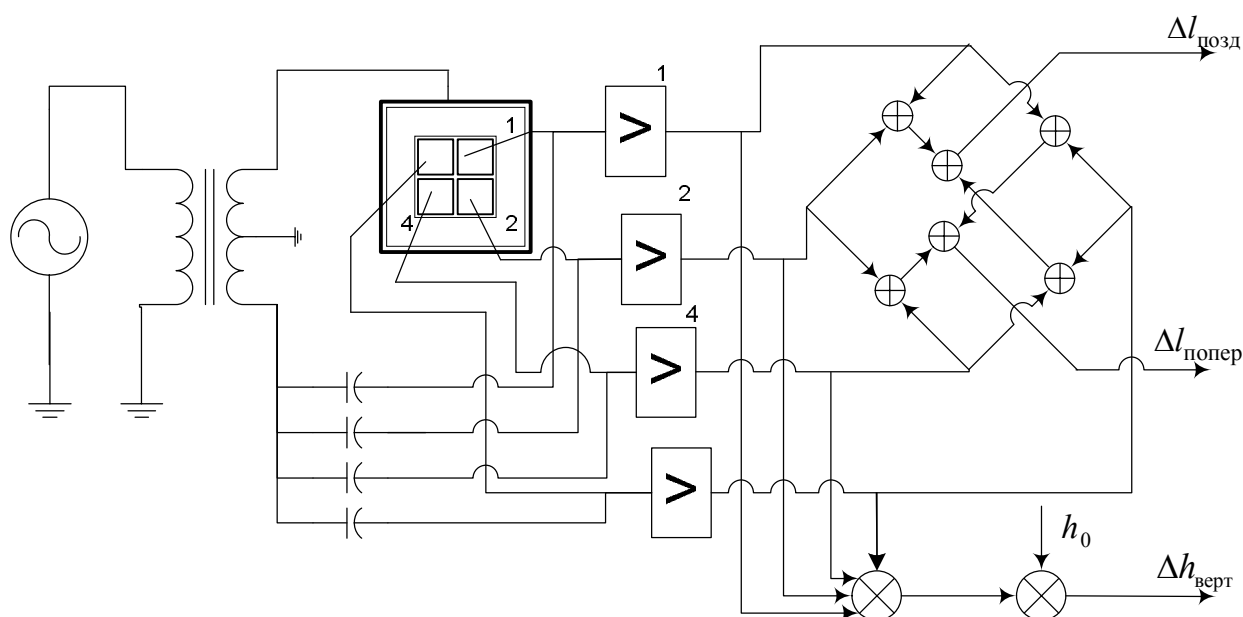


Рис. 8. Функціональна схема чотириканального безконтактного датчика критичних деформацій

Цим пристроєм вимірюють переміщення контрольної точки в місці найбільш імовірної деформації за трьома координатами; для отримання інформації про деформацію у поздовжньому напрямку – різниця сум інформаційних ємностей з електродів 1, 2 та 3, 4 відповідно; для отримання інформації про деформацію у поперечному напрямку – різниця сум інформаційних ємностей з електродів 1, 3 та 2, 4 відповідно; сума інформаційних ємностей зі всіх електродів містить інформацію про деформацію у вертикальному напрямку. Недолік розглянутої схеми – використання мостового трансформатора, виготовлення якого потребує додаткових технологічних витрат. Але для вимог високої точності це технічне рішення залишається. Якщо точність отриманої інформації, що задовольняє експлуатаційні потреби, можна зменшити, тоді вимірювальну схему буде створено відповідно до принципів побудови компенсаційних мостових вимірювальних пристроїв [4]. У цьому разі витрати часу на виготовлення елементів системи значно менші.

Висновки. Запропонований датчик дозволить створити більш ефективну і точну систему контролю критичних деформацій елементів конструкції ПК для забезпечення неперервного контролю експлуатаційно-технічного стану конструкції ПК.

Список літератури

1. Козлов А. П. Система контролю критичних деформацій конструкцій повітряних суден // Електроніка та системи управління. – 2007. – №2(12). – С. 41 – 46.
2. Аблесимов А. К., Гайдамака А. З., Козлов А. П. Бесконтактное измерение микроперемещений // Електроніка та системи управління. – 2005. – №3(5). – С. 141 – 146.
3. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин, методы измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
4. Гриневич Ф. Б., Новик А. И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. – К.: Наук. думка. 1987. – 112 с.
5. Пат. SU 1428908 A1, МПК G 01 B 7/22. Емкостный датчик для измерения перемещений по трем координатным осям / Г. Р. Леиашвили. – №4087721/25-28; заявл. 18.07.86; опубл. 07.10.86, Бюл. №37.

А. П. Козлов, Г. Г. Вальденмайер

Исследование характеристик датчика критических деформаций элементов конструкции воздушного судна

Дается обоснование необходимости внедрения систем непрерывного контроля технического состояния конструкции воздушного судна. Рассмотрен принцип построения и конструктивные решения неконтактного датчика деформации элементов конструкции воздушного судна. Приведены результаты экспериментальных исследований статической характеристики датчика микроперемещений и выполнен их анализ. Рассмотрена конструкция емкостного преобразователя, что позволяет получить линейную статическую характеристику, а также структурную схему трёхкоординатного измерителя микроперемещений, как основного элемента системы.

A. P. Kozlov, G. G. Valdenmayer

Research of characteristics of sensor of critical deformation of elements of airplanes construction

The basing of necessity of introduction systems of the continuous checking of the technical state of air ship construction is given. Principle of action and structural solving of uncontact deformations sensor of elements air ship construction is considered. The results of experimental researches of static characteristics of sensor of micro moving are resulted and their analysis is accomplished. The construction of capacity transformer, which allows to get linear static characteristic. The struture scheme of three-coordinate measuring device of micro moving, which is the basic element of the system is considered.