

The following designations are introduced into the variation (26):

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{\Gamma} \overset{\circ}{\Gamma} &= \Phi_{10*} \overset{\circ}{R} \Phi_{10} + \overset{\circ}{C}; \quad \overset{\circ}{D} \overset{\circ}{D}^* = S'_{\eta_0 \eta_0}; \\ \overset{\circ}{\Gamma} &= \overset{\circ}{T}_0 + \overset{\circ}{T}_+ + \overset{\circ}{T}_- = (\overset{\circ}{\Gamma}^*)^{-1} \Phi_{10*} \overset{\circ}{R} \{ \Phi_{10} [S'_{\eta_0 \eta_0} + \\ &+ (\overset{\circ}{G}_0 \overset{\circ}{K}_0)^{-1} S'_{\theta_0 \theta_0} (\overset{\circ}{G}_0 \overset{\circ}{K}_0)^{-1}] - \Phi_0 S'_{\eta_0 \eta_0} \} (D_*)^{-1}. \end{aligned} \quad (27)$$

Using the designations (27), the variation (26) will take the following form:

$$\begin{aligned} \delta \overset{\circ}{e} &= \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} [\overset{\circ}{\Gamma}^* (\overset{\circ}{\Gamma} \overset{\circ}{F}_{\dot{v}_0} \overset{\circ}{D} + \overset{\circ}{T}) \overset{\circ}{D}^* \delta \overset{\circ}{F}_{\dot{v}_0} + \\ &+ \delta \overset{\circ}{F}_{\dot{v}_0} \overset{\circ}{D} (\overset{\circ}{D}^* \overset{\circ}{F}_{\dot{v}_0} \overset{\circ}{\Gamma} + \overset{\circ}{T}_*) \overset{\circ}{\Gamma}] ds, \end{aligned}$$

and the condition of equality of the variation (26) to zero will be as follows:

$$\overset{\circ}{\Gamma} \overset{\circ}{F}_{\dot{v}_0} \overset{\circ}{D} = -(\overset{\circ}{T}_0 + \overset{\circ}{T}_+).$$

The synthesis algorithm for the optimum structure of matrix $\overset{\Delta}{F}_{\dot{v}_0}$ should be written as follows:

$$\overset{\Delta}{F}_{\dot{v}_0} = -\overset{\circ}{\Gamma}^{-1} (\overset{\circ}{T}_0 + \overset{\circ}{T}_+) \overset{\circ}{D}^{-1}.$$

The equation of constraints of matrices $\overset{\circ}{F}_{\dot{v}_0}$ and $\overset{\circ}{F}_{\dot{x}_0}$ has the following form:

$$\overset{\circ}{F}_{\dot{x}_0} = \Phi_{10} \overset{\circ}{F}_{\dot{v}_0} + P_0^{-1}.$$

The optimum structure of the regulator in the equivalent stabilization system of the stand simulator motion is defined by the following expression:

$$\overset{\Delta}{W}_0 = \overset{\Delta}{F}_{\dot{v}_0} (\overset{\Delta}{F}_{\dot{x}_0})^{-1} = \overset{\Delta}{F}_{\dot{v}_0} (\Phi_{10} \overset{\Delta}{F}_{\dot{v}_0} + P_0^{-1})^{-1}. \quad (28)$$

Hereby, the problem of synthesis of the optimum structure of the regulator $\overset{\Delta}{W}_0$ in the equivalent stabilization system of the stand simulator motion is solved.

Conclusion

This paper provides a practically effective methodology of analytic design of the optimum stochastic control system of five-degree-of-freedom stand simulator of the spacecraft motion. The stand simulator is required for preflight training of the spacecraft crew.

This paper addresses and strictly solves the issues of synthesis of the optimum structures of regulators in control systems under determinate and random stationary actions on examined objects.

REFERENCES

1. Azarskov V. N., Blokhin L. N., Zhiteckii L. S. Methodology of designing optimal stochastic stabilization systems. Monografiya. K.: NAU – 2006. – 432 p. (In Russian).
2. Azarskov V. N., Blokhin L. N. About One Problem of Analytic Design of Regulators. // Cybernetics and computer engineering. – K.: Scientific Idea, 1981. – Ed. 51. – pp. 59–61.
3. Gantmaher F. F. Matrix Theory. – M.: Science, 1967. – 575 p.
4. Davis M. C. Factoring the Spectral Matrix. – IEEE Trans. Auto. Cont., 1963, AG-8, No. 4. – pp. 296–305.

УДК

- © Скрипещь А. В., канд. техн. наук, професор, академік ТAU (НАУ);
 © Краснов В. М., канд. техн. наук, доцент (НАУ);
 © Сагідаєв Ю. М., канд. техн. наук, академік ТAU (НДІ «Укראєропроект»);
 © Лужбін В. М., канд. техн. наук, доцент (НАУ), чл.-кор. ТAU;
 © Мельніков Д. Є., викладач (НАУ);
 © Кіреєв М. Е., магістр (НАУ);
 © Смолич Д. В., магістр (НАУ)

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОБІЛЬНОГО АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАЧА УХИЛІВ

Анотація. Безпека здійснення етапів зльоту і посадки повітряних суден значною мірою залежить від нерівностей і кутів нахилу злітно-посадкової смуги (ЗПС) в поперечній і поздовжній площинах. Вимірювання нерівностей і ухилів ЗПС є досить трудомістким процесом. Тому важливим і актуальним є розробка пристроїв, які б дозволили механізувати і частково автоматизувати процес вимірювання нерівностей і ухилів ЗПС.

Ключові слова: злітно-посадкова смуга, нерівності, ухили, вимірювач, акселерометр, гіроскоп, мобільний.

Аннотация. Безопасность осуществления этапов взлета и посадки воздушных судов в значительной степени зависит от неровностей и углов наклона взлетно-посадочной полосы (ВПП) в поперечной и продольной плоскостях. Измерение неровностей и наклонов ВПП являются достаточно трудоемким процессом. Поэтому важным и актуальным является разработка устройств, позволяющих механизировать и частично автоматизировать процесс измерения неровностей и наклонов ВПП.

Ключевые слова: Взлетно-посадочная полоса, неровности, наклоны, измеритель, акселерометр, гироскоп, мобильный.

Abstract. Security implementation phases of aircraft takeoffs and landings largely depend on irregularities and angles of the runway (RWY) in transverse and longitudinal planes. Measuring irregularities and deviations of runway is a very time-consuming process. Therefore an important and urgent thing is the development of devices that will enable to mechanize and partly automate the process of measuring irregularities and runway deviations.

Keywords: runway, irregularities, slopes, measuring device, accelerometer, gyroscope, mobile.

Вступ

У процесі будівництва ключового елемента аеропорту — злітно-посадкової смуги (ЗПС) — важливе значення має дотримання норм її проектування за кутами нахилу в поперечній і поздовжній площинах.

Так, згідно з вимогами будівельних норм і правил [1] поздовжній ухил ділянки штучної ЗПС повинен бути не більше 0,08, тобто не більше 28 кутових мінут. При цьому довжина кінцевих ділянок ЗПС (у цьому випадку початкова ділянка) повинна дорівнювати 1/6 довжини ЗПС, тобто 416 м. На цій ділянці поздовжній ухил має бути одного напрямку (або висхідний, або низхідний).

Поперечний ухил для надійного стікання дощових і талих вод із поверхні штучної ЗПС повинен бути більше 0,015, тобто більше 52' (кутових мінут).

Наразі поздовжні і поперечні ухили ЗПС у геодезичній практиці вимірюються за допомогою далекоміра, нівеліра, вимірювальної рейки і рулетки з наступним визначенням ухилів розрахунковим шляхом. Якщо довжина ЗПС становить від 2,5 до 4-х кілометрів, крок вимірювань вибирається порядку 60 м, тобто в цьому проміжку, що дорівнює 8 плитам (розмір плити 7,5×7,5 м₂), не контролюються ні ухили, ні нерівності кожної плити.

Величина ухилу між двома точками розраховується так:

$$\alpha = h/D, \quad (1)$$

де h — перевищення, яке визначається за допомогою нівеліра і рейки, яка встановлюється у точках вимірювання ухилів; D — горизонтальне положення, яке обчислюється за виміряним перевищенням h і відстанню S між точками, виміряною рулеткою:

$$D = h_2/2S. \quad (2)$$

Вимірювання нерівностей геодезичними методами здійснювати важко. Нерівності вимірюють триметровою лінійкою за кожною плитою ЗПС шляхом вимірювання зазорів під лінійкою через кожні 10 см.

Таким чином, вимірювання ухилів і нерівностей є досить трудомістким процесом, що вимагає великого відшкодування часу.

Інформаційний та патентний пошуки показують, що в цьому напрямку ведуться інтенсивні розробки пристроїв, які б дозволили механізувати і частково автоматизувати процес вимірювання ухилів.

До механічних пристроїв, які вимірюють ухили, можна віднести «ватерпас» [2], що включає до себе вимірювальну рейку та вертикальну вішку, на яких нанесені сантиметрові поділки, причому на вимірювальній рейці встановлений рівень з можливістю переміщення у вертикальному напрямку і відліковий пристрій для приведення рейки в горизонтальне положення. Для вимірювання ухилів ЗПС та схилів вимірювальна рейка встановлюється вздовж напрямку вимірюваного ухилу на опори (п'ятки), розміщені на її кінцях, а бульбашка рівня приводиться механічно в горизонтальне положення його поворотним механізмом. При цьому відбувається розворот відлікового барабана відносно відлікового

індексу, і таким чином визначається величина вимірюваного ухилу.

До частково автоматичних пристроїв, що вимірюють ухили, можна віднести розглянуті в патентах Росії [3, 4, 5]. Це пристрої, які або містять панель з підвишеним на ній маятником і шкалу, закріплену на панелі, або — інерційну масу у вигляді сталеві кулі на гладкій основі та фіксованої з боків майже вертикальними попередньо напруженими видолінками, на які наклеєні тензодатчики опору, або містять плоску вимірювальну поверхню, на якій розташований чутливий до її орієнтації елемент у вигляді датчика лінійних прискорень, електронну схему перетворення сигналу і засоби індикації на рідкому кристалі.

Їхнім загальним недоліком є мала надійність і недостатня оперативність вимірювання у зв'язку з неможливістю за одне встановлення визначити величину і напрям максимального кута нахилу досліджуваного об'єкта.

Відома також одновісна колісна транспортна платформа — вимірювач ухилів ОКТП-ВУ аеродромних покриттів, що є робототехнічною системою, яка теоретично розроблена в Московському авіаційному університеті. Такі системи розробляються в Московському державному університеті ім. М. В. Ломоносова, в США, Японії і Канаді для завдань транспортування, охоронних і військових цілей [6].

Сьогодні у різних країнах ведуться розробки пристроїв, які дозволяють частково механізувати процедуру вимірювання ухилів за допомогою механічних пристосувань, або автоматично вимірювати напрям та величину ухилу за однією координатою шляхом використання досягнень новітніх технологій. Мобільних пристроїв для автоматичного вимірювання ухилів та нерівностей як злітно-посадкових смуг, так і дорожніх покриттів одночасно за двома координатами в практичному дорожньому та аеродромному будівництвах, а також в експлуатаційних підрозділах аеропортів України не існує.

Основна частина

Авторами пропонується використовувати для зазначених цілей сучасні акселерометри і гіроскопи.

Вони є основними датчиками інерціальних навігаційних систем (ІНС), які надають інформацію про рух під дією активних сил. Застосовуються акселерометри, різноманітні як за принципом дії, так і за конструктивним виконанням. Зазвичай, це акселерометри, які вимірюють лише одну складову прискорення уздовж осі обраної системи координат.

Обов'язковим елементом акселерометра є чутлива маса — певне фізичне тіло, яке має певну масу. Цей елемент називається тягарець, якір, інерційна маса, чутливий елемент тощо. Чутлива маса акселерометра здебільшого має правильну геометричну форму, наприклад форму циліндра, і пружно пов'язана за допомогою механічних пружин або «електричної пружини» компенсаційного типу з корпусом пристрою.

Залежно від характеру переміщення чутливого елемента відносно корпусу пристрою розрізняють акселерометри з лінійним переміщенням чутливого елемента відносно

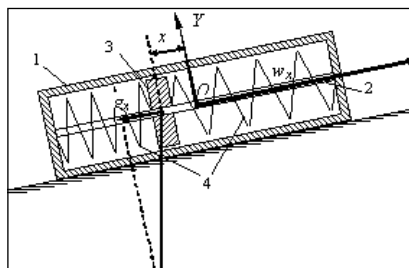


Рис. 1. Кінематична схема однокомпонентного осьового акселерометра

корпусу — це осьові акселерометри, і акселерометри з кутовим переміщенням чутливого елемента відносно корпусу — маятникові акселерометри [2].

За способом підвісу чутливого елемента відносно корпусу пристрою є багато конструктивних рішень, наприклад, акселерометри з механічним підвісом чутливого елемента на жорсткій опорі (на підшипниках, призмах, роликах тощо); з гнучким підвісом (на торсіонах); з гідростатичним або гідродинамічним підвісом чутливого елемента (поплавкові). Можливі також магнітні, електростатичні, кріогенні, а також комбіновані підвіси. В інерціальних системах зазвичай застосовують прецизійні поплавкові осьові та маятникові акселерометри з «електричною пружиною» компенсаційного типу.

Аби зробити зручним сполучення акселерометра з цифровим обчислювачем, сигнал на його виході повинен бути дискретним. Перетворення вихідного сигналу в дискретний може бути виконане або за допомогою спеціальних перетворювачів типу АЦП — аналого-цифрових перетворювачів, або безпосередньо за допомогою пристроїв, що вимірюють переміщення чутливої маси. За цією ознакою як осьові, так і маятникові акселерометри класифікуються як аналогові, аналогові з дискретними приставками та дискретні. До дискретних акселерометрів належать струнні, імпульсно-інерціальні й електронно-пучкові акселерометри.

Вихідний сигнал акселерометра несе в собі інформацію про силу взаємодії чутливого елемента акселерометра і його корпусу в напрямку відповідної осі — осі чутливості пристрою.

На рис. 1. наведена кінематична схема однокомпонентного осьового акселерометра.

У корпусі 1 по напрямній 2 може переміщуватися чутливий елемент 3, який зв'язаний з корпусом за допомогою пружини 4. Корпус пристрою заповнюють рідиною, яка забезпечує демпфірування коливань чутливого елемента відносно корпусу.

У високоточних акселерометрах замість механічних пружин, які не можуть забезпечити у великому діапазоні високу точність вимірювання прискорень, широке розповсюдження знайшли «електричні пружини», які реалізують замкнені контури компенсаційного зворотного зв'язку. Але більш широке застосування в інерціальних системах знайшли маятникові акселерометри з «електричною пружиною» і гідравлічним підвісом інерційної маси [7].

Описані вище компенсаційні схеми побудови пристроїв знаходять застосування в прецизійних високоточних акселерометрах. Але, окрім них, все більшого поширення набуває застосування досить грубих, але мініатюрних датчиків первинної інформації. Перевага таких систем, насамперед, у надзвичайно малих розмірах, масі, енергоспоживанні.

Серед мікромеханічних датчиків особливо слід відзначити датчики, які виготовлені з використанням MEMS-технологій. MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) — фотолітографічна технологія, яка дозволяє виготовляти кремнієві мікросхеми з мініатюрними механічними елементами. Вона є перспективним напрямком розвитку мікроелектроніки, оскільки за її допомогою вдається побороти обмеження, які довгий час були перешкодою з мікромініатюризації деяких компонентів, які утримують механічні деталі.

Прикладом таких датчиків може бути акселерометр об'ємної конструкції. Цей датчик (рис. 2) складається з кремнієвої рамки 1 і інерційної маси 2. Двома тонкими торсіонами 3 і 4 інерційна маса з'єднана з кремнієвою рамкою. Ця маса з'єднується з одного краю кремнієвої рамки механічно, а з іншого — через пару імплантованих п'єзорезисторів 5 і 6, які створюють напівміст. Два напівмости з'єднуються в мостову схему. За умови впливу прискорення a (рис. 2) інерційна маса переміщується, згинаючи торсіони та викликаючи деформацію п'єзорезисторів. Таким чином, датчик і розташована поза кристалом електронна схема обробки сигналів через деформацію п'єзорезисторів, включених за схемою моста Уїтстона, створюють за умови впливу прискорення вихідний сигнал, який надходить до споживачів, зокрема в схему безплатформної ІНС.

Компанія Analog Devices виготовляє сім'ю акселерометрів ADXL поверхневої конструкції на полікристалічному кремнії. Увесь кристал акселерометра розміром $3,05 \times 3,05$ мм зайнятий головним чином схемами формування сигналу, які оточують мініатюрний датчик прискорення розміром 1×1 мм, розташований у його центрі. Датчики виготовляються методом поверхневої обробки, яка передбачає осадження тонких плівок певного матеріалу на основу кристала з наступним витравленням необхідної конструкції рухомої діафрагми. Нижче наведені схема (рис. 3, а), конструкція (рис. 3, б) і багаторазово збільшені елементи кристала акселерометра (рис. 3, в).

Датчик вихідних сигналів акселерометра — це диференціальна конденсаторна структура з повітряним діелектриком, обкладки якого витравлені із плоского елемента полікремнієвої плівки товщиною 2 мкм. Нерухомі обкладки цього конденсатора — прості алюмінієві консольні стрижні, що розташовані на висоті 1 мкм від поверхні кристала в повітрі на полікремнієвих стовпчиках-анкерах, приварених до кристала на молекулярному рівні. Рухомі обкладки конденсатора утворюються пальцеподібними виступами інерційної маси.

На рис. 4 показаний конструктивний блок елементарної ємнісної комірки датчика. Фактично датчик має 54 елементарні комірки для вимірювання прискорення, але для простоти на рисунку показано тільки одну комірку. Інерційна маса 1 датчика прискорення в умовах зміни швидкості переміщення кристала зміщується відносно основної частини кристала. Її пальцеподібні виступи 2 утворюють рухому обкладку конденсатора. З кожного кінця ця структура змінної ємності спирається на стовпчики-анкери 3, які ана-

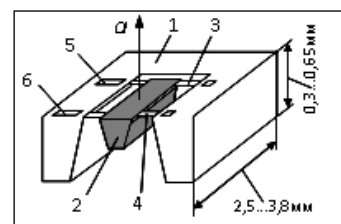


Рис. 2. Акселерометр об'ємної конструкції

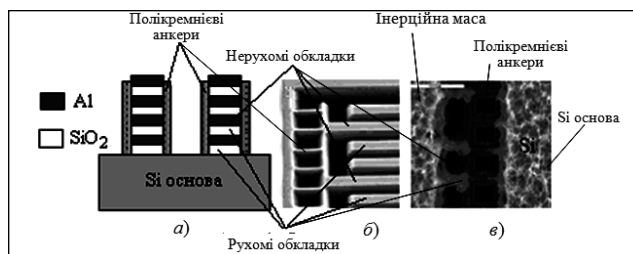


Рис. 3. Кристал акселерометра

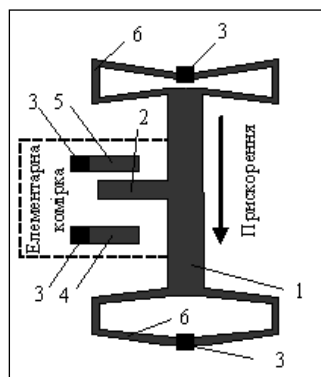


Рис. 4. Елементарна ємнісна комірка датчика

то вісь чутливості датчика лежить у цій площині і вона паралельна площині друкованої плати, до якої припаюється датчик.

Кожен з наборів (54 набори) нерухомих обкладок конденсатора електрично з'єднаний паралельно усередині схемного кристала. В результаті створюється пара незалежних конденсаторів, рухома обкладка яких утворена всією сукупністю пальцеподібних виступів інерційної маси. Усередині кристала ці три обкладки підключені до вбудованих схем формування сигналу акселерометра. У спокійному стані (рух зі сталою швидкістю) усі пальці рухомої обкладки завдяки розтяжкам перебувають на однаковій відстані від пар пальців нерухомих обкладок. За будь-якого прискорення рухомі пальці наближаються до одного з наборів нерухомих пальців і віддаляються від іншого набору. В результаті цього відносного переміщення відповідні відстані стають неоднаковими і ємності між рухомою обкладкою і кожною з нерухомих обкладок змінюються, тобто змінна ємність є вихідним сигналом мініатюрного датчика прискорення. Мікросхеми, що оточують датчик, формують вихідний сигнал акселерометра за схемою, наведеною на рис. 5.

Датчик акселерометра і схема формування сигналу є замкнутим контуром зі зворотним зв'язком для зрівноваження сил. Протифазні сигнали прямокутної форми частотою 1 МГц однакової амплітуди надходять від гене-

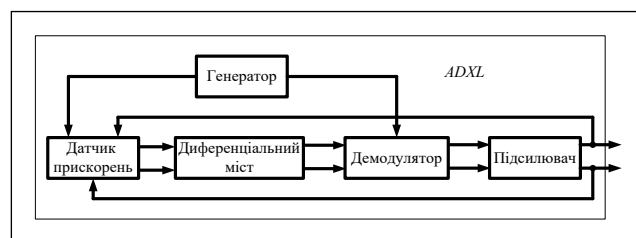


Рис. 5. Формування вихідного сигналу акселерометра

ратора відповідно на верхню і нижню нерухомі обкладки конденсатора датчика. Ємності між нерухомими і рухомими обкладками при відсутності прискорення однакові, тому сигнал з диференціального моста, у плечі якого включено конденсатори датчика, дорівнює нулю. Під дією прискорення змінюються ємності конденсаторів датчика і на виході диференціального моста з'являється сигнал, причому його амплітуда залежить від величини зміщення рухомої обкладки, тобто від різниці ємностей конденсаторів датчика, а фаза визначається знаком прискорення.

Фазочутливий демодулятор перетворює цей сигнал у низькочастотний (смугою від 0 до 1000 Гц), який характеризує величину і знак прискорення. Далі сигнал у вигляді напруги надходить на підсилювач, а з його виходу — на зовнішній вивід ADXL.

Щоб зменшити вплив температури навколишнього середовища, тимчасові зміни параметрів, знизити нелінійність перехідної характеристики акселерометра, розробники ввели негативний зворотний зв'язок за положенням інерційної маси. Для цього напруга з виходу підсилювача подається на рухомі обкладки датчика, створюючи електростатичні сили між рухомими і нерухомими обкладками, які прагнуть установити інерційну масу у вихідне положення. Оскільки в цьому випадку система стеження має високу добротність, інерційна маса ніколи не буде відхилитися від свого вихідного положення більш, ніж на 0,01 мкм.

До числа таких малогабаритних MEMS-датчиків слід віднести цифрові нанометрові кремнієві акселерометри, конструкція яких аналогічна вищенаведеній, і які вже використовуються як основні датчики прискорень, наприклад, у безплатформній курсовертикалі БКВ-95.

Цифровий кремнієвий датчик має дві основні складові: компактний акселерометр з маленькою інертною масою, підвішеною на мініатюрних пружинах, який виготовлений за MEMS-технологією, і спеціальну керівну мікросхему.

Три ортогональні компоненти створюють ядро цифрового тривісного датчика перевантаження.

Крім розглянутих варіантів, в нашій країні виготовляються мікромеханічні п'єзоплівкові акселерометри низької точності, п'єзоелектричні акселерометри підвищеної точності, а також інші менш розповсюджені конструкції.

Уперше в практиці геодезичного приладобудування розроблено двокоординатний мобільний автоматичний вимірювач ухилів, наявний макетний зразок якого [10] пройшов експериментальну апробацію у вимірюванні поздовжніх і поперечних ухилів, а також нерівностей на нещодавно побудованій штучній злітно-посадковій смузі в аеропорту м. Харкова.

Пристрій розміщується на рухомій платформі, яка може бути виконана за двома варіантами. Перший варіант — на триколісній платформі з ручним приводом. Другий може бути виконаний на гусеничному шасі з незалежним приводом на кожну гусеницю, він керується дистанційно по радіоканалу і фактично є робототехнічною системою.

У діючому макеті використовується триколісна платформа, на якій встановлено спеціальний двовісний рухомий кронштейн. Платформа і кронштейн горизонтуються в двох площинах. Рухомий кронштейн виконує функцію калібрувального пристрою, за допомогою якого виставляються нульові значення у вихідній точці вимірювання. Зовнішній вигляд макету зображено на рис. 6.

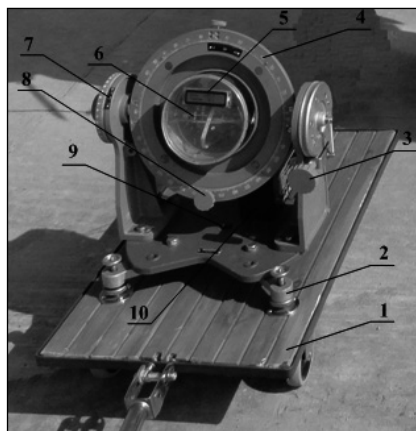


Рис. 6. Конструкція вимірювального модуля: 1 — основа; 2 — регульована опора; 3 — маховик по тангажу; 4 — лімб; 5 — LCD-індикатор; 6 — MEMS-датчики; 7 — лімб; 8 — маховик по крену; 9 — двокоординатний датчик горизонту; 10 — акумулятор

Кутові розугодження визначаються за допомогою оригінального програмного забезпечення в мікроконтролері.

Діапазон вимірювання ухилів за кожною координатою — $\pm 45^\circ$ (кутових градусів). Ціна молодшого розряду — ± 3 (кутові мінути).

Габарити мобільного автоматичного вимірювача ухилів ВУ-01 — $710 \times 420 \times 600$ мм. Маса вимірювача — 12 кг.

Структурна схема пристрою наведена на **рис. 7**.

Пристрій вимірює поздовжній та поперечний кути ухилу (крену і тангажу) за допомогою мікроелектромеханічних датчиків — акселерометра та гіроскопа. Ці датчики за умови застосування певних алгоритмів фільтрації, обробляючи інформацію від них, забезпечують достатню точність у визначенні кутів [9].

Працездатність вимірювача ВУ-01 було апробовано в процесі вимірювання поздовжніх і поперечних ухилів на окремих фрагментах щойно збудованої ЗПС довжиною 2,5 км та шириною 45 м в міжнародному аеропорту м. Харкова.

Експериментально досліджувалися такі фрагменти ЗПС:

- ▶ початкова ділянка ЗПС довжиною 660 м з метою визначення величини та знаку поздовжнього ухилу з одного боку відносно осі ЗПС;
- ▶ нерівності плити, виявлені у процесі вимірювання традиційним методом (триметровою лінійкою з кроком вимірювання 10 см).

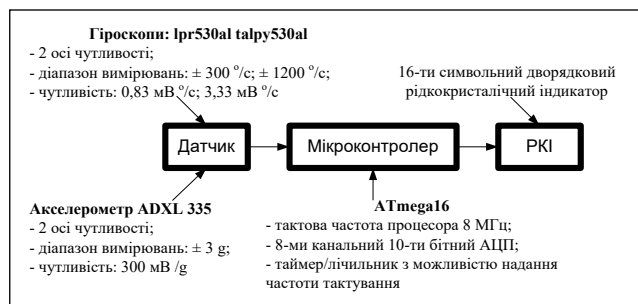


Рис. 7. Структурна схема пристрою

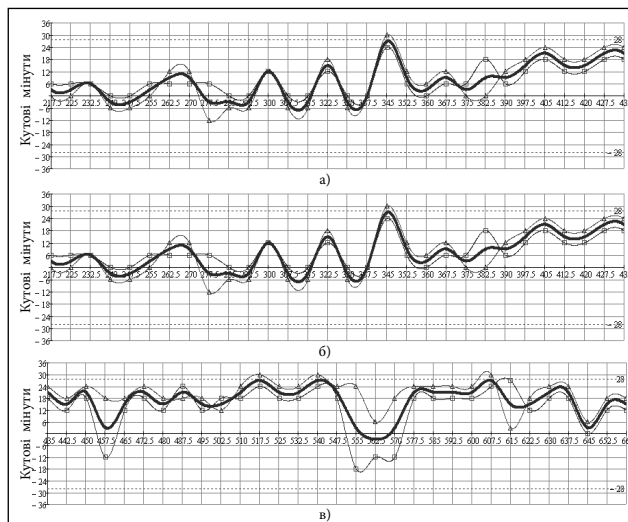


Рис. 8. Результати вимірювання: а) на ділянці від 0 до 217 м; б) на ділянці від 217 м до 435 м; в) на ділянці від 435 м до 660 м

Дослідження проводилися одночасно з вимірюванням традиційними геодезичними методами шляхом нівелювання поверхні ЗПС. Крок нівелювання дорівнював 60 м, а за допомогою вимірювача ВУ-01 вимірювалися ухили кожної плити з кроком 7,5 м.

Дослідження поздовжнього ухилу ЗПС

Дослідження вимірювачем ВУ-01 виконувалися таким чином. У вихідній (нульовій) точці початкової ділянки ЗПС проведено горизонтування вимірювача, після чого проведено переміщення платформи вздовж першої плити, не дійшовши одного метра до її стику з другою плитою, де були зняті перші вимірювання. Далі вимірювання проводилися на наступних плитах в аналогічних точках. Кожному вимірюванню передувала зупинка не більше 10 секунд для фіксації декількох результатів.

Так був пройдений шлях 660 м в одному напрямі по кожній плиті, а потім назад з розворотом вимірювача та вимірюваннями в тих самих точках.

Результати вимірювання наведені на **рис. 8**, де пунктиром позначена межа $\pm 28'$ (кутових мінут), а позначками Δ — значення ухилів за умови переміщення «вперед» і \square — за умови переміщення «назад».

Зв'язок між дискретними значеннями ухилів по плитах виконано за методом лінійної апроксимації.

З наведених графіків видно, що поздовжній ухил на відстані 660 м не перевищує 0,08, тобто $28'$ (кутових мінут), а поздовжній ухил на початковій ділянці ЗПС у межах 416 м здебільшого один напрям. Крім того, є ділянки (55–105 м, 130–160 м, 215–255 м, 345–380 м) з виявлени-

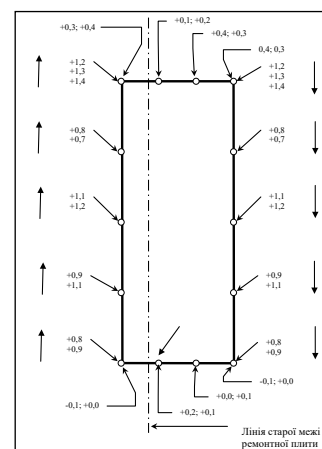


Рис. 9. Схема дослідження ремонтного фрагмента ЗПС

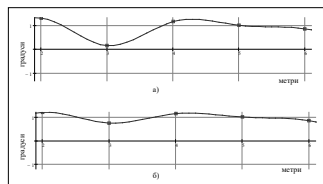


Рис. 10. Результати вимірювань поперечних ухилів:
а) правий бік; б) лівий бік

під якою через 10 см вимірюють зазори. Якщо зазори перевищують 0,5 см, частина плити вирізається і знову бетонується. Ремонтна ділянка дорівнювала площі 30 м² (6×5 м). Провести нівелювання на такій ділянці можна, але це досить трудомістко.

Ремонтний фрагмент мав інтерес для вимірювання нерівномірностей ухилів за двома координатами. Пристрій ВУ-01 переміщувався всередині прямокутника на відстані 1 м від кожного краю фрагмента (рис. 9).

На рис. 10 наведені результати вимірювань поперечних, а на рис. 11 — поздовжніх ухилів ремонтного фрагмента. Графіки виконані методом лінійної апроксимації.

Вимірювання проводилися переміщенням модуля за стрілкою годинника. В кутах прямокутника модуль розвертався на 90 градусів.

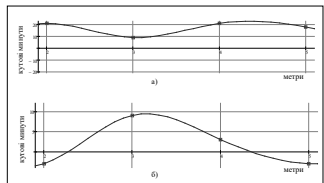


Рис. 11. Результати вимірювань поздовжніх ухилів:
а) верх; б) низ

ми кутівими відхиленнями по плитах, які будуть викликати ударну вібрацію під час зльоту та посадки літаків.

Дослідження ремонтного фрагмента ЗПС

Традиційно нерівності плит вимірюються лінійкою довжиною 3 м,

під якою через 10 см вимірюють зазори. Якщо зазори перевищують 0,5 см, частина плити вирізається і знову бетонується. Ремонтна ділянка дорівнювала площі 30 м² (6×5 м). Провести нівелювання на такій ділянці можна, але це досить трудомістко.

Ремонтний фрагмент мав інтерес для вимірювання нерівномірностей ухилів за двома координатами. Пристрій ВУ-01 переміщувався всередині прямокутника на відстані 1 м від кожного краю фрагмента (рис. 9).

На рис. 10 наведені результати вимірювань поперечних, а на рис. 11 — поздовжніх ухилів ремонтного фрагмента. Графіки виконані методом лінійної апроксимації.

Вимірювання проводилися переміщенням модуля за стрілкою годинника. В кутах прямокутника модуль розвертався на 90 градусів.

Результати вимірювань

Поздовжні ухили ремонтного фрагмента не перевищують 0,008, тобто 28' (кутових мінут), та відповідають вимогам СН і П.

Поперечні ухили виконані більше 0,015, тобто 52' (кутових мінут), та перебувають у діапазоні 1,2–0,75° (кутових градусів).

У процесі вимірювання зліва виявлена одна точка 0,75° (кутових градусів), яка на 6' (кутових мінут) менша за допуск.

Висновки

1. Розроблено малогабаритний пристрій на сучасній елементній базі, яка використовується для акселерометрів та гіроскопів.

2. Обробка інформації з виходу пристрою за допомогою мікроконтролера та оригінального програмного забезпечення дозволила отримати інформацію одночасно за двома координатами в діапазоні ± 45° (кутових градусів) з ціною молодшого розряду ± 3' (кутові мінут).

3. Проведені дослідження фрагментів ЗПС у міжнародному аеропорту м. Харкова показали, що за допомогою пристрою ВУ-01 можна оперативно та достовірно проводити вимірювання ухилів і нерівностей як кожної плити, так і окремих її фрагментів без використання геодезичних приладів та лінійки, що значно зменшує трудомісткість вимірювань.

4. Експериментальні дослідження також показали, що початкова ділянка нової ЗПС у міжнародному аеропорту м. Харкова виконана в межах допуску, тобто з ухилом не більше 0,008 (28') і має практично один знак ухилу, але кожна плита має невеликі кутові відхилення одна від одної. Дослідженнями також визначено декілька нерівностей на окремих плитах у діапазоні 0-28' (кутових мінут).

5. Розроблена макетна конструкція пристрою показала, що на основі макету можливо розробляти конструкторську документацію мобільного двокоординатного вимірювача ухилів для виготовлення дослідної партії пристроїв, які можна використовувати як для дослідження якості ЗПС, так і сучасних дорожніх покриттів, залізничних колій, тунелів, гірських виробок, стічних колекторів тощо.

6. Проведені також певні дослідження з розробки малогабаритного мобільного вимірювача-робота, який може сам за програмою або по каналу радіокерування виконувати вимірювання в тих місцях, де людині-оператору важко або зовсім неможливо пересуватися.

ЛІТЕРАТУРА

1. СНиП 2.05.08.85. Аэродромы /Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 59 с.
2. Патент України №22079 А МПК G 01 B 3/02, G 01 C 9/00, 2006.
3. Патент РФ № 2142613, МКИ G 01 C 9/00, 1998.
4. Авт. свид. СССР № 187324, МКИ G 01 C 9/16, 1966.
5. Свидетельство РФ на полезную модель № 12607, МКИ G 01 C 9 / 06, 20.01.2000.
6. Щилова М. А., Черноморский А. И. Одноосная колесная платформа-измеритель уклонов аэродромных покрытий. Проектно-конструкторские и производственные вопросы создания перспективной авиационной техники / Под ред. проф. Ю. Ю. Комарова. — М.: Изд-во МАИ, 2009. — 424 с.
7. Філяшкін М. К., Рогожин В. О., Скрипець А. В., Лукінова Т. І. Інерціально-супутникові навігаційні системи: навч. посіб. — К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. — 272 с.
8. Мельников Д. Е., Кіреєв М. Е., Смолич Д. В. Пристрій для визначення кутового положення літака в просторі на основі MEMS-акселерометра та гіроскопа. — Наука і молодь. Прикладна серія: збірник наукових праць/МОН; Національний авіаційний університет. — К.: 2010. — Вип. 10. — С. 27-30.
9. Мельников Д. Е., Кіреєв М. Е., Смолич Д. В., Волков О. Е., Волошенко Д. О., Самокіша Т. В., Черноус Т. М. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 38841 — Комп'ютерна програма «Комплексування інформації, отриманої від MEMS-акселерометрів та гіроскопів для визначення кутового положення літака в просторі на основі оптимального рекурсивного фільтра Калмана». — 2011.
10. Звіт про науково-дослідну роботу «Розробка діючого модуля для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності поверхні аеродромних покриттів. Проведення замірів ухилів та рівності на новій злітно-посадковій смузі в міжнародному аеропорту «Харків» (Основа)» (Договір про створення (передачу) науково-технічної продукції між Українським державним проектно-технологічним, науково-дослідним інститутом цивільної авіації «Украеропроект» і Національним авіаційним університетом від 23.06.2011 р. № 753-ХІІ).