

УДК 620.178.6(043.2)

Олефір О.І., Олефір А.О.

Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

СИСТЕМА ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАН КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОКРИТТІВ ЗЛІТНИХ СМУГ І АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Розроблена і виготовлена система збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг для безконтактного експрес-аналізу стану покриття на великих ділянках шляху із обраною частотою зняття проб за допомогою мобільного автоматизованого пристрою, в якості якого може використовуватись, зокрема, відповідно обладнаний автомобільний причіпний пристрій.

Ключові слова: композиційні матеріали; дорожні покриття; якість зчеплення; шорсткість поверхні; неруливний контроль; бази даних.

Постановка проблеми

Авіаційно-промисловий комплекс як сукупність установ та організаційних процесів діяльності із розробки, виготовлення та експлуатації повітряних суден являє собою складну територіально розподілену систему, що вимагає наявності розвинутої наземної інфраструктури транспортного сполучення для свого успішного функціонування. Дана система включає у себе як призначені безпосередньо для експлуатації авіаційної техніки злітні смуги, стартові майданчики, платформи морського старту, так і допоміжні системи транспортних шляхів. Якщо у створенні літальних апаратів застосування композиційних матеріалів має на меті зменшення ваги конструкції при забезпеченні достатнього рівня міцності, то наземна інфраструктура дорожніх сполучень ставить за мету оптимізацію параметрів міцності, довговічності, витривалості та опору зношуваності при зменшенні матеріальних затрат на виробництво та забезпеченні якості зчеплення поверхні із шасі транспортних засобів.

Сучасними шляхами вирішення поставленої проблеми являється застосування бетонних композиційних матеріалів із армуючим зміцненням та модифікованими спеціальними присадковими матеріалами поверхнями для виготовлення покриттів злітних смуг. Проте впровадження нових технологій та необхідність регулярного контролю якості зчепних властивостей і зовнішніх та внутрішніх дефектів покриттів потребують проведення великого обсягу польових досліджень впроваджених у експлуатацію дорожніх елементів, що пов'язано як із проблемами надійного визначення стану і якості покриття, так і з трудомісткістю проведення випробувань.

Мета дослідження

На основі проведеного аналізу була поставлена задача розробки системи збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг, що забезпечить можливість безконтактного експрес-аналізу стану покриття на великих ділянках шляху із обраною частотою зняття проб за допомогою мобільного автоматизованого пристрою, в якості якого може використовуватись, зокрема, відповідно обладнаний автомобільний причіпний пристрій.

Розробка дослідного обладнання

Як показано вище, важливим джерелом інформації про стан злітного чи дорожнього покриття є дані про його нерівність та шорсткість, які безпосередньо пов'язані із якістю зчеплення поверхні. В залежності від структури матеріалу нерівності поверхні характеризуються певною формою та розмірами, зокрема видовженням та усередненими діаметром або шириною і товщиною поперечного перетину. В якості моделі шорсткого нерівнісного виступу поверхні покриття можна використати модель защемленої з одного кінця пружної балки, як показано на рис. 1.

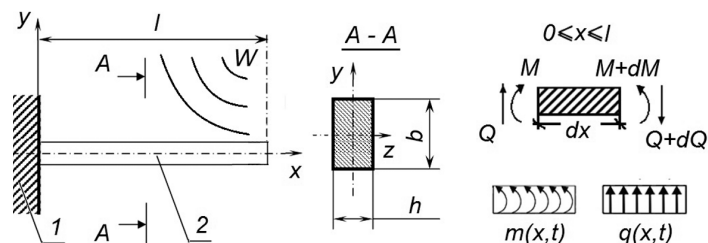


Рис. 1. Модель шорсткого нерівнісного виступу поверхні покриття: 1 – базовий рівень поверхні; 2 – виступ розмірами $l \times b \times h$

Дія на поверхню покриття зовнішньої звукової хвилі W еквівалентна впливу нерівномірно розподіленого навантаження $q(x,t)$. Відповідно до рівнянь теорії згину стержнів та плит з урахуванням зсувних деформацій, при застосуванні прийнятого правила знаків, як показано на рис. 1, рівняння рівноваги малого елемента балки приймуть вигляд:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t), \quad \frac{\partial M}{\partial x} - Q + m(x,t) = 0. \quad (1)$$

Нехай $y = y(x,t)$ – рівняння вигнутої осі балки, тоді розподілене навантаження $q(x,t)$ і момент $m(x,t)$ визначаються наступними співвідношеннями:

$$m(x,t) = -\rho J \frac{\partial^3 y}{\partial t^2 \partial x}, \quad q(x,t) = -\rho F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (2)$$

де ρ – густина матеріалу, $F = b \times h$ – площа поперечного перетину виступу, J – момент інерції поперечного перетину виступу. Отже, прогин геометричних форм виступів залежить як від параметрів зовнішньої звукової хвилі, так і від розмірів нерівності.

Розглянемо вільні коливання нерівнісних виступів поверхневого покриття. Вважається, що дотичні напруження, які відповідають куту зсуву γ , не призводять до виникнення моменту. Тоді величину згинального моменту визначає кут повороту ψ . При врахуванні інерційних навантажень і деформацій зсуву можна доповнити рівняння рівноваги елемента балки (1), рівнянням, що описує кут повороту поперечного перерізу відповідно до теорії С.П. Тимошенко:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \psi + \gamma. \quad (3)$$

Отже, на основі (1-3), отримуємо систему рівнянь рівноваги в переміщеннях з шуканими функціями $y(x,t)$ і $\psi(x,t)$:

$$\begin{aligned} -\frac{GF}{n} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \rho F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= 0, \\ EJ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{GF}{n} \left(\frac{\partial y}{\partial x} - \psi \right) - \rho J \frac{\partial^3 y}{\partial t^2 \partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Кінематичні граничні умови формулюються для переміщень X і кутів повороту Ψ , що забезпечує виконання закону збереження енергії і теореми взаємності робіт, тому розв'язок рівнянь (4) повинен задовольняти граничним умовам:

$$X(0) = \Psi(0) = Q(1) = M(1) = 0. \quad (5)$$

Вирішуючи приведену систему рівнянь рівноваги в переміщеннях (4), отримуємо частотне рівняння на основі теорії Тимошенко:

$$A + B \cosh \gamma_1 \cos \gamma_2 + C \sinh \gamma_1 \sin \gamma_2 = 0. \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} A &= \gamma_1^2 (\gamma_1^2 - a_{11} + k^4 \alpha) + \gamma_2^2 (\gamma_2^2 + a_{11} - k^4 \alpha), \\ k^4 \alpha &= \rho \cdot l^2 \omega^2 / E \\ B &= [\gamma_1^2 (\gamma_2^2 + a_{11})^2 + \gamma_2^2 (\gamma_1^2 - a_{11})^2] - \\ &- k^4 \alpha \cdot \frac{\gamma_2^2 (\gamma_1^2 - a_{11})^2 - \gamma_1^2 (\gamma_2^2 + a_{11})^2}{(\gamma_1^2 - a_{11}) \cdot (\gamma_2^2 + a_{11})}, \\ C &= -\gamma_1 \gamma_2 \cdot (\gamma_1^2 - \gamma_2^2 - 2a_{11} + 2k^4 \alpha). \end{aligned} \quad (7)$$

Якщо не враховувати деформації зсуву γ і величину кута повороту поперечного перерізу ψ , частотне рівняння та його розв'язок можна отримати відповідно до теорії Бернуллі-Ейлера, розглядаючи рівняння рівноваги в переміщеннях:

$$\frac{\partial^4 X}{\partial \xi^4} - \frac{\rho F}{EJ} \omega^2 l^4 X = 0. \quad (8)$$

Граничні умови, яким має задовольняти розв'язок рівняння рівноваги в переміщеннях (8), можна представити у вигляді:

$$X(0) = X'(0) = Q(1) = M(1) = 0. \quad (9)$$

Розв'язок цього рівняння, як відомо, приводить до частотного рівняння:

$$1 + \cosh k \cos k = 0. \quad (10)$$

на основі якого можна визначити спектр власних кругових частот за формулою:

$$\omega_i = \frac{k_i^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}}, \quad i \in N \quad (11)$$

де i – номер коренів частотного рівняння (10) і відповідної власної частоти. Таким чином, з рівняння (11) видно, що власна частота коливань модельованих нерівнісних виступів поверхні покриття залежить від розмірів та форми виступу. Зокрема, зростання довжини виступу l призводить до зниження цієї частоти, так само, як і зменшення їх жорсткості. Зміна площі поперечного перерізу має неоднозначний вплив на власну частоту коливань, так як значення має також форма поперечного перерізу. Проте аналогічним чином вказані параметри впливають на гнучкість нерівностей поверхні, а отже, і на поведінку покриття при докладанні сили притиснення. Остання, як відомо, відіграє безпосередню роль у визначенні результуючої сили тертя відносного руху поверхонь транспортного засобу і композиційної смуги руху. Вища гнучкість нерівностей визначає збільшення площі контакту поверхонь тертя на мікрорівні, а отже, зростання впливу сил міжмолекулярного зчеплення на результуючі параметри руху.

На основі запропонованого припущення про можливість встановлення взаємозв'язку зчіпних якостей композиційної поверхні дорожнього покриття із власною частотою коливань її шорсткісних нерівностей спеціально для оцінки стану композитних покриттів був спроектований і виготовлений дослідний комплекс приладів, заснований на принципі збудження механічних коливань активованої поверхні досліджуваного покриття. Розроблений комплекс формує собою сутнісний блок реєстрації даних системи збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг. Принцип роботи розробленого комплексу приведений на рис. 2.

На рис. 2. позначені 1 – шорстка поверхня досліджуваного покриття; 2 – активована ділянка шорсткої поверхні досліджуваного покриття із розподілим поверхневим електричним зарядом; 3 – зона активації ультрафіолетовим випромінюванням; 4 – блок активації електричного поверхневого заряду досліджуваної поверхні поверхні ультрафіолетовим випромінюванням; 5 – блок реєстрації електромагнітного випромінювання; 6 – блок активації механічних коливань досліджуваної поверхні покриття із джерелом ультразвуку; 7 – ультразвукова хвиля W збудження механічних коливань досліджуваного матеріалу; 8 – електромагнітне випромінювання; 9 – тріщини композиційному дорожньому покритті; 10 – блок підсилення зареєстрованого сигналу; 11 – блок синхронізації систем активації та ультразвукового збудження поверхні; 12 – комплексний блок управління і контролю, збереження і аналізу даних дослідження.

Принцип роботи системи збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг полягає у наступному. Під управлінням блоку 12 шорстка поверхня досліджуваного покриття 1 збуджується механічними коли-

ваннями за допомогою блоку 6. Присутні в матеріалі ділянки зосередженого електричного заряду стають джерелом випромінювання електромагнітних коливань. Такими ділянками можуть являтися заряджені бічні поверхні тріщин у матеріалі по границі його складових компонентів та ін. За допомогою блоку 5 датчиком електромагнітного випромінювання реєструється згенерований у матеріалі сигнал. В якості датчика електромагнітного випромінювання може служити датчик Холла, феррозонд або електромагнітна котушка. В останньому випадку можливим є досягнення вищої чутливості системи реєстрації, а саме 10^{-10} Тл. До інших можливих до застосування магнітометрів відносяться магнітометри з оптичною накачкою та надпровідні квантові інтерферометри (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device). Недоліками їх застосування, незважаючи на високу чутливість, є складність обладнання та висока зашумленість результату.

Блок 10 слугує для підсилення зареєстрованого сигналу та передачі його до системи збереження і аналізу даних дослідження блоку 12. Надалі цей сигнал використовується як вихідний для порівняння і виокремлення відповідних частотних складових, а тому позначається як базовий. Базовий сигнал реєструють у певному досліджуваному діапазоні частот із заданим кроком. Наступним етапом дослідження являється збудження поверхневого електричного заряду досліджуваної поверхні за допомогою блоку 4. Засобом досягнення цієї мети може стати застосування ультрафіолетового випромінювання. Внаслідок цього атоми приповерхневого шару матеріалу виявляються електрично зарядженими йонами. Паралельно під управлінням блоку 11 синхронізації систем активації та ультразвукового збудження поверхні ініціюється збудження механічних коливань матеріалу блоком 6, як на першому етапі дослідження. Реєстрований блоком 5 і підсилений блоком 10 сигнал запи-

сується до загальної бази даних А комплексним блоком 12. На схемі не зображений блок живлення складових системи, а також АЦП як складова блоку 12. Живлення системи може відбуватися від акумуляторної батареї напругою 19 V, максимальна сила струму системи управління 3,42 А.

Аналіз результатів досліджень

При певних частотах зовнішніх збуджуючих акустичних хвиль спостерігається резонансне зростання амплітуди коливань, що пояснюється переважанням шорсткісних нерівностей із відповідними власними частотами коливань на досліджуваній ділянці поверхні. Таким чином, у результаті дослідження формується тривимірною база даних виду, представленою на рис. 3.

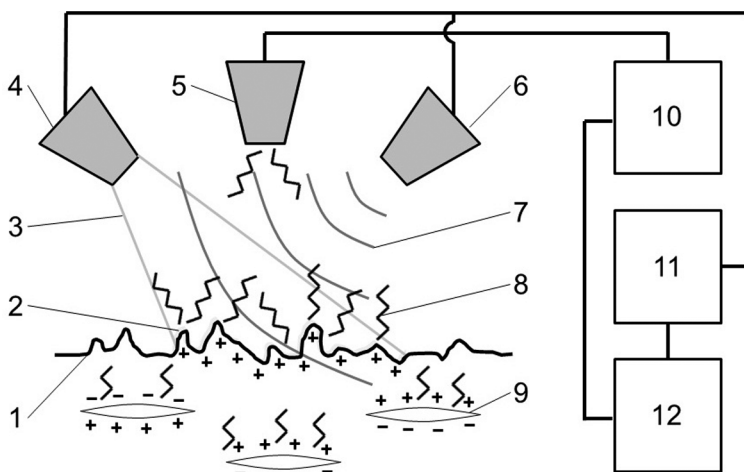


Рис. 2. Принципова схема дії системи збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг

Кожні два послідовні шари представлені моделі відповідають даним першого та другого етапу сканування тієї самої ділянки P_i , де i – порядковий номер сканованої ділянки, а саме не активованої та активованої до ініціації поверхневого електричного заряду. Сканування сигналу електромагнітних коливань АЦП із частотою вибірки 2 Мбіт/с, що відповідає полосі пропускання сигналу частотою 200 МГц із похибкою визначення часу наростання та спадання фронту сигналу, що не перевищує 0,5 %, призводить до обсягу результатів кожного окремого вимірювання близько 95 МВ.

Враховуючи значне число ділянок вимірювання, для яких необхідно провести дослідження з метою встановлення статистично достовірних параметрів певної злітної смуги чи дорожнього покриття, зважаючи на їх типову довжину та площу, постала задача суттєвого скорочення об'єму збережених даних. З цією метою був застосований описаний у [1] метод стиснення записів технічних та корпоративних баз даних, що базується на виділенні однорідних кластерів даних та їх скороченому описі замість явного збереження усіх перелічених даних. Застосування даного методу дозволило скоротити обсяг вихідних збережених даних для аналізу з 9,5 GB до 3,015 GB. Був запропонований підхід, адаптований до особливостей отримуваних застосованим методом баз даних. Суть даного підходу полягає у збереженні отриманих полів даних у вигляді матриць восьмибітових значень, послідовно конкатенованих між собою для кожних двох вимірів, яким відповідає незмінне P_i . Надалі до кожного отриманого файлу послідовності бітових значень застосовуються стандартні алгоритми компресії без втрат інформації на основі принципів ковзного вікна, кодування співпадінь та алгоритму Хаффмана [2, 3]. Попередні випробування показали, що застосування запропонованого підходу дозволяє зменшити обсяг збережених вихідних даних без втрати інформації до 1,47 GB, тобто та 71 % порівняно з нестиснутими даними та на 8,7 % у порівнянні з кластерним методом стиснення, що було досягнуто за рахунок оптимальної комбінації методів збереження даних виходячи з визначальних характеристик отримуваних баз даних.

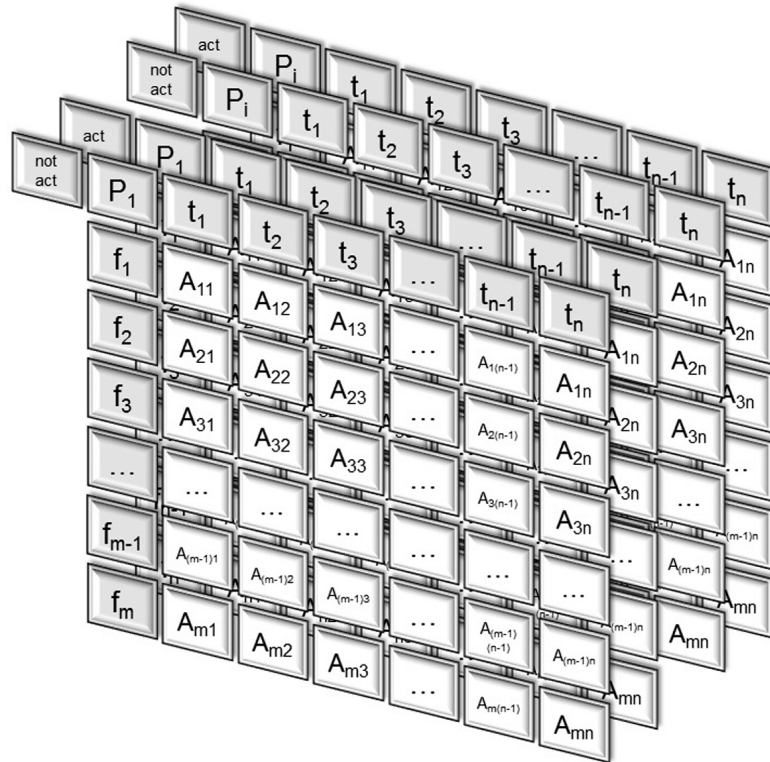


Рис. 3. Структура бази даних системи збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг

Висновки

В результаті проведених досліджень було показано принципову можливість застосування в рамках розробленої і виготовленої системи збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг методу збудження механічних коливань активованої поверхні досліджуваного покриття для подальшого аналізу їх якості і властивостей за отриманими даними. Розроблена система дає можливість оцінити реальний стан покриттів злітних смуг у рамках комплексного підходу до аналізу та накреслити можливі шляхи підвищення їх експлуатаційних якостей.

Література

- [1] Plattner H. In-Memory Data Management – Technology and Applications / H. Plattner, A. Zeier. – Berlin Heidelberg New York. – Springer-Verlag. – 2nd ed. – 2012.
- [2] Ziv J. A Universal Algorithm for Sequential Data Compression / J. Ziv, A. Lempel // IEEE Transactions on Information Theory. – 1977. – Vol. 23. – № 3. – P. 337-343.
- [3] Кормен Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. – Москва. – Вильямс. – 2-е изд. – 2006.



Olefir A.I., Olefir A.A.

National Aviation University. Ukraine, Kiev

COLLECTION SYSTEM FOR STATUS INFORMATION OF COMPOSITE ELEMENTS OF RUNWAY AND ROAD COATINGS

A system is designed and constructed for data collection on the state of composite elements of runway and road coatings for contactless rapid analysis of coverages over large areas of the path at a selected sampling frequency by means of a mobile automated device, for which, in particular, a specially equipped car trailer can be used.

Keywords: composite materials; road surfaces, road grip quality, surface roughness, non-destructive testing; test result databases.

References

- [1] Plattner H. In-Memory Data Management – Technology and Applications / H. Plattner, A. Zeier. – Berlin Heidelberg New York. – Springer-Verlag. – 2nd ed. – 2012.
- [2] Ziv J. A Universal Algorithm for Sequential Data Compression / J. Ziv, A. Lempel // IEEE Transactions on Information Theory. – 1977. – Vol. 23. – № 3. – P. 337-343.
- [3] Cormen Th. Introduction To Algorithms / Th. Cormen, Ch. Leiserson, R. Rivest, C. Stein. – N.Y. – MIT Press. – 3-rd ed. – 2009.