

УДК 629.735.017.1:629.735.45.035

В.В. Буланов, д-р техн. наук, проф.,
О.Г. Волов**ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
У КОНСТРУКЦІЇ НЕСУЧОГО ГВИНТА ВЕРТОЛЬОТІВ**

Розглянуто заходи, спрямовані на підвищення надійності експлуатації вертольотів через використання в конструкції лопаті несучого гвинта адаптивних елементів. Проведено аналіз і оцінку можливості застосування адаптивних елементів.

Надійність експлуатації авіаційних конструкцій з композиційних матеріалів (КМ) збільшується через активне керування їхніми геометричними, жорсткісними і демпфірувальними властивостями, застосування матеріалів з пам'яттю форми (МПФ) і п'єзоелектриків [1–9].

Ідея активного керування полягає в зміні властивостей конструкції за допомогою зворотного зв'язку через мікропроцесор між датчиками деформацій і приводами. Приводи можуть бути виконані у вигляді пластин, армованих волокон або стрічок. Механіка ефекту полягає у створенні в середині тіла корисних тимчасових внутрішніх напружень, що на відміну від залишкових внутрішніх напружень зникають після видалення їхніх причин. Значну увагу в роботах щодо адаптивних конструкцій приділено проблемам аеропружності несучого гвинта (НГ) – дослідженню впливу індукованих деформацій на активне керування рівнем вібрації, шуму, стійкості, форми, напружень лопаті НГ вертольота [1; 2; 5; 6; 7].

Найбільш інтенсивні дослідження можливостей МПФ спрямовані на створення НГ вертольота, який має адаптуватися до навколишнього середовища, здійснюють у США. Сприймаючи турбулентність навколишнього потоку, лопаті гвинта змінюють свою жорсткість [8]. Датчики, розташовані на поверхні гвинта, реагують на появу небезпечних завихрень і посилюють електричний сигнал, під впливом якого частки електрореологічної рідини змінюють фазу. Це досягається за допомогою сегментів електрореологічних рідин, що після пропускання слабкого електричного струму або внаслідок зміни температури переходять з рідкого стану у твердий. Насичення частками цих рідин матеріалу лопаті НГ дозволяє зменшити рівень їхньої вібрації.

Підвищення бойової живучості лопаті з КМ може бути досягнуто використанням у вуглепластикових композитах волокон з нікель-титанату (нітінолу), що характеризується в п'ять разів більшою відносною деформацією при розтяганні, ніж традиційні КМ [8]. Наявність волокон нітінолу в КМ підвищує стійкість конструкції до пробивання і має ефект пам'яті форми. Крім того, використання останньої властивості нітінолу додає матеріалу додаткової зміцнювальної енергії при підвищенні температури.

Застосування п'єзоелектричних матеріалів базується на зворотному п'єзоелектричному ефекті. При використанні п'єзоелектриків як приводів прикладання напруги до електродів п'єзоматеріал деформує конструкцію. Працюючи як датчики, електросигнали з деформованого матеріалу надходять у блок посилення і аналізу. П'єзоелектричний ефект багатосторонньо пов'язаний з іншими властивостями матеріалів і прикладених навантажень. У загальному випадку деформації п'єзоелектричного елемента залежать від механічних напружень, напруги електричного поля, температури, піддатливості, коефіцієнтів теплового розширення, п'єзоелектричних властивостей [10]. Деформацію створено у вільно обпертій п'єзоелектричній пластинці під впливом електричної напруги, прикладеної по товщині в її площині, обумовленої координатами X, Y:

$$\varepsilon^n = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^n \\ \varepsilon_y^n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{31}(\varepsilon_x) \\ d_{32}(\varepsilon_y) \\ 0 \end{bmatrix} V_z,$$

де ε^n – деформація; d_i – константа поляризації; V_z – прикладена напруга електричного поля.

Загальна деформація композита з п'єзоелектричними елементами, з урахуванням гіпотези Кірхгофа визначається сумою

$$\{\bar{\varepsilon}\} = \{\varepsilon^0\} + z\{K^0\} + \{\varepsilon^n\},$$

де ε^0 – деформація матеріалу в площині приведення; K^0 – кривизна панелей у площині приведення.

Зв'язок між напруженнями та деформаціями здійснюється за допомогою матриці узагальненої пружності багат шарової пластини $[\bar{Q}_y]$:

$$\sigma_y = [\bar{Q}_y](\bar{\varepsilon}_y - \varepsilon_y^n).$$

Найвідомішими матеріалами з п'єзоелектричними властивостями є сегнетоелектрики, що мають у пароелектричній модифікації центр симетрії і набувають п'єзоелектричних властивостей шляхом лінеаризації електрострикції спонтанної поляризації [9; 10]. Це кристали титанату барію $BaTi_3$ і п'єзоелектричні текстири на їхній основі. Частковим випадком п'єзотекстур є п'єзокераміка, що являє собою полікристалічну структуру і складається з кристалів із сегнетоелектричними властивостями [8]. Для одержання п'єзокерамік використовують хімічні сполуки з формулою ABO_3 ($PbTi_3$) і тверді розчини на їхній основі.

Найбільш велике поширення як п'єзоелектричні матеріали мають сполуки системи $PbTi_3 - PbZr_3$, що називаються PZT. Вони відрізняються від інших сполук вищими п'єзоелектричними коефіцієнтами. До сегнетом'якої кераміки, що характеризується високими значеннями п'єзомодуля і діелектричної проникності, великими механічними й електричними втратами, відносять свинцево-цирконієвий титанат PZT-5H, ЦТСНВ-1, ТБ-1 (див. таблицю), ніобат свинцю $PbNb_6$, титанат цирконату свинцю $Pb(ZrTi)O_3$, ніобат магнію $MgNb_6$. Застосування біморфних п'єзоелементів і варіювання їхніх геометричних розмірів дозволяє істотно змінити величини переміщень і навантаження.

Характеристики п'єзоелектриків

Параметр	П'єзоелектрик				
	ЦТС-19	ЦТС-24	ЦТСНВ-1	ТБ-1	PZT-5H
Щільність $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	7,45	7,40	7,30	5,30	7,50
Температура точки Кюрі, °С	290	270	240	110	300
П'єзомодуль $d_{31} 10^{12}$, Кл/Н	100	100	165	45	275
Відносна діелектрична проникність ε_{33}	1725±325	1075	2250±560	1500±300	3400
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	0,40	0,45	0,45	0,20	0,39
Модуль Юнга $E \cdot 10^{11}$, Па	0,55...0,85	0,65...0,85	0,57...0,71	0,90...1,10	0,591

Істотним недоліком п'єзокераміків є крихкість. Вони не витримують ударних навантажень і великих деформацій. Тому як вимірювальні п'єзодатчики частіше використовують п'єзополімери, зокрема, полівініліденфториди, що легко формуються в одноосьові та двохосьові плівки. Датчики з п'єзоелектричних полімерів дозволяють одержувати більший обсяг інформації щодо статичного і динамічного поведіння пружної конструкції, ніж дискретні тензокерамічні п'єзокерамічні датчики.

Технологія створення несучого елемента конструкції з КМ, що містить шар (шари) вразно орієнтованих елементів п'єзоелектричного матеріалу, передбачає етап, на якому кожен

ля.
гіпо-

при-
і уза-

рики,
влас-
стали
дком
з кри-
тову-

стеми
п'єзо-
кими
ични-
абли-
ж. За-
яє іс-

-5Н
0
0
5
Ю

19
91

ванта-
вують
двох-
обсяг
кретні

и) ви-
кожен

п'єзошар прокладається між двома шарами-електродами, виготовленими з металу [4]. Усі ці шари розміщуються у вуглеволоконному або скловолоконному КМ і використовуються як дріт чи датчик деформацій. Процес виробництва КМ містить укладання п'єзоелектричних елементів у рідкому полімері між електродними плівками, сушіння пакета у вакуумі і поляризацію пакета в масляній ванні при визначеній температурі і додаванні електричної напруги для орієнтації диполів п'єзоматеріалу та його деформацій уздовж волокон. Останній етап необхідний для усунення замикань.

Пропозиції щодо керування закрилком лопаті за допомогою п'єзокерамічного приводу наведені в роботі [5], а результати експериментальних досліджень моделей НГ з реалізацією даної концепції керування – у роботах [1; 6]. Випробування в аеродинамічних трубах показали, що кутові відхилення закрилка щодо осі шарніра під дією електричної напруги досягають $\pm 10^\circ$ для необертового НГ і до $\pm 3,2^\circ$ для обертового НГ. Ефективність застосування активної системи для збільшення критичної швидкості флатера і можливість оптимізації розташування елементів показано на результатах порівняльного аналізу, чисельного аналізу і експерименту [3].

Оцінку ефективності застосування адаптивних елементів, дія яких заснована на зворотному п'єзоелектричному ефекті, проведено в процесі комп'ютерного моделювання для композитних конструкцій на основі МКЕ [2; 7]. Математичні моделі пружної лопаті з КМ із впровадженими в її конструкцію п'єзоелектричними волокнами, стрижнями датчиків і приводу активного керування кривизною профілю і крутінням лопаті описані в роботі [7]. На базі розроблених моделей досліджені заходи спрямовані на поліпшення аеродинамічних і динамічних характеристик НГ, зменшення вібрацій і нестійкості. Проведений аналіз заснований на складанні операторів системи аеропружного зворотного зв'язку для лопаті і формуванні рівнянь руху на основі принципу Гамільтона варіації енергій. Перетворення рівнянь до простору власних форм здійснено методом Гальоркіна, а врахування впливу активних волокон на оператор пружних навантажень і впливу жолоблення поперечних перерізів був реалізований на основі моделей Сен-Венана і Власова.

Методика і результати аналітичного дослідження можливості зниження змінних навантажень і деформацій лопаті НГ за допомогою пластин п'єзоприводу, приклеєних до верхньої і нижньої полиць лонжерона лопаті, додані в роботі [2]. Теоретична модель отримана на основі комбінації рівнянь електромеханічного електричного поля і пластин, пластин і стінок лонжерона з рівняннями руху кінцево-елементної моделі лопаті і рівняннями узагальненої моделі кінцевих станів вихрового струменя. Одержана система рівнянь перетворюється до модальних координат і вирішується за допомогою методу Рунне-Кутта четвертого порядку. Результати дослідження наведені у вигляді махово-крутильної реакції лопатей, сил і моментів на втулці НГ. Вони демонструють істотне зниження амплітуд динамічних навантажень при замкнутому контурі активного п'єзоприводу, вплив кількості елементів приводу та їхнього положення на рівень вібраційних навантажень.

Розглянуті результати чисельного моделювання й експериментальних досліджень в області застосування адаптивних елементів конструкцій у лопатях НГ дозволяють виділити загальні тенденції їхнього використання й аналізу.

Найбільш ефективним способом керування деформаціями лопаті за допомогою п'єзоелектричних приводів є локальне варіювання аеродинамічної сили перерізу залежно від її азимутального положення. Це може бути досягнуто зміною форми перерізу лопаті за допомогою керованих передкрилків, закрилків, тримерів, інтерцепторів, перепускних щілин і т.п. При цьому створення коректуючих деформацій крутіння та вигину може бути досягнуто використанням несиметричних шаруватих структур зі зв'язаними твердостями: вигину з крутінням, розтягання з крутінням.

Для вирішення аеропружних проблем НГ підвищують крутильну твердість лопаті. Одним із можливих способів керування крутильною твердістю лопаті є розміщення уздовж лонжерона лопаті п'єзоелектричного приводу, виконаного у вигляді спіралі або декількох спра-

лей, розташованих у шарах композита. Відбір матеріалу п'єзоелектрика, геометричних характеристик спіралі, товщини, орієнтації та кількості шарів п'єзоелектричного приводу має здійснюватися за умови забезпечення максимальних деформацій кругіння, протилежних деформаціям, викликаним експлуатаційними навантаженнями. На деформації лопаті значною мірою впливають відцентрові сили. Тому при визначенні розташування приводу необхідно враховувати геометричні місця центрів ваги, твердості, розтягання й фокусу профілю. Крім того, необхідно враховувати технологічні особливості виготовлення композитної лопаті.

Найпростішим підходом до оцінки ефективності застосування адаптивних матеріалів у конструкції НГ є моделювання деформацій лопаті при квазістатичному розрахунку [11]. У загальному випадку рішення може бути одержано у вигляді рядів [9]. На сьогодні немає жодних опублікованих результатів експериментальних досліджень натурних лопатей з активним керуванням за допомогою адаптивних матеріалів. Щодо результатів експериментальних досліджень моделей НГ з п'єзоелектричними приводами, то вони не враховують тонкостінність і багатошаровість конструкції сучасних лопатей, виконаних у вигляді багатошарової оболонки або пластини. Проте встановлено, що коли відношення товщини до мінімального радіуса поверхні тонкої оболонки складає $(1/30) \dots (1/1000)$ і менше, то через технологічні обмеження у масштабах товщин доводиться відступати від повної геометричної подоби зразків, замінюючи її афінною відповідністю [12].

Список літератури

1. *Bernhard A.P.F., Chopra I.* Trailing edge flap activated by a piezo-induced bending-torsion coupled beam // J. American Helicopter Society. – 1999. – 44, № 1. – P. 3–15.
2. *Chattopadhyay Aditi, Liu Qiang, Gu Haozhong.* Vibration reduction in rotor blades using active composite box beam // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. – 2000. – 38, 7. – P. 1125–1131.
3. *Guan De, Chen Wei-min, Li Min, Zhu De-chao.* Flutter suppression using distributed piezoelectric actuators // Chin. J. Aeronautics. – 2000. – 13, 4. – P. 211–215.
4. *Пат. 5869189 США, МКИ В 32 В 15/08.* Composites for structural control. N.W Hagood., A.A. Bent. – № 687827. Massachusetts Institute of Technology. – Опубл. 09.02.99.
5. *Пат. 5626312 США, МКИ В 64 С 13/24.* Head R. E. Piezoelectric actuator:– № 271120. McDonnell Douglas Corp. – Опубл. 06.07.97.
6. *Koratkhar N. A., Chopra I.* Analysis and testing of mach-scaled rotor with trailing-edge flaps // AIAA Journal. – 2000. – 38, 7. – P. 1113–1124.
7. *Narkiewicz J., Pietrucha J.* Elastic structure modeling of composite rotorcraft blade for active modification of dynamic characteristics // J. Techn. Phys. – 1999. – 40, № 3. – С. 355–371.
8. *Исполатовский В. В.* Может ли материал выполнять желания конструктора? // Знак вопроса. – М.: Знание, 1997. – Вып. 4. – С. 56–78.
9. *Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов, В. Е. Биткин, В. Ф. Симонов, Ф. Ф. Урмансов.* – М.: Машиностроение, 2000. – 352 с.
10. *Глозман И. А.* Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1972. – 288 с.
11. *Динамика и прочность НВ / С. В. Михеев, В. А. Павлов, С. А. Михайлов и др.* – Казань: КАИ, 1986. – 80 с.
12. *Шаповалов Л. А.* Моделирование в задачах механики элементов конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

Стаття надійшла до редакції 08.02.02.