

УДК 629.735.015 (045)

АНАЛІЗ СПРИЙНЯТТЯ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ ЛЕГКИХ ЛІТАКІВ В УМОВАХ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

Касьянов В. О., д-р техн. наук, проф., Кім О. О.

Національний авіаційний університет
int2080@ukr.net

Розглянуто комплексну задачу стосовно повздовжнього руху легкого літака з метою аналізу сприйняття людиною (екіпаж, пасажирів) перевантажень під час польоту в умовах турбулентності атмосфери. Як модель використано систему диференціальних рівнянь першого порядку, що описує повздовжній рух літака у неспокійній атмосфері із використанням системи безпосереднього керування піднімальною силою і сприйняття організмом людини акселераційних навантажень. Наведено результати параметричного аналізу впливу конструктивних, метеорологічних та експлуатаційних характеристик на розподіл амплітуд перевантаження. Запропоновано критерій комфорту, що може використовуватись для оцінювання рівня комфорту пасажирів та екіпажу та вибору параметрів літака, режимів польоту та процесів керування польотом.

Ключові слова: динаміка польоту, турбулентність, перевантаження, система безпосереднього керування підйомною силою, критерій комфорту, безпека польотів, функція сприйняття акселераційного руху.

The complex problem regarding the longitudinal motion of light aircraft with the aim to analyze human perception (crewmembers, passengers) of the acceleration loads during flight in air turbulence is considered. As a model the system of differential equations of first order is used. It describes the longitudinal motion of an airplane in turbulent atmosphere with application of lift force direct control system and acceleration loads perception by human organism. The results of parametric analysis of design, operation and meteorological conditions influence on the acceleration loads distribution are presented. Comfort criterion is suggested. It can be used for the assessment of comfort level for passengers and crew members and for selection of aircraft performances, modes of flight and flight control processes.

Keywords: flight dynamics, turbulence, load factor, lift force direct control system, comfort Criterion, flight safety, acceleration motion perception function.

Постановка і загальна мета задачі

В умовах швидкого розвитку місцевих авіаліній та приватних літаків виникає конкуренція серед легких літаків різних виробників. Оскільки ці повітряні судна здебільшого літають з низькими швидкостями польоту, то одним з вирішальних факторів може стати комфорт пасажирів та льотного екіпажу, особливо в умовах польоту в турбулентній атмосфері.

Сучасні стандарти, правила, посібники приділяють багато уваги питанням безпеки польотів, але майже нічого не говориться про критерії комфорту. Для новітніх, добре обладнаних літаків з подібними характеристиками саме рівень комфорту може стати вирішальним, зокрема, дискомфорту, спричинений «бовтанкою» та акселераційними перевантаженнями в умовах турбулентності, викликає повітряну хворобу, травми, впливає на стан пілотів, що призводить до зниження рівня безпеки.

Інша категорія повітряних суден, що мають відносно невеликі габаритні розміри та злітну масу, — це безпілотні літальні апарати, що виконують різноманітні військові та цивільні завдання, серед яких — аерофотозйомка або відеозйомка місцевості, пошук об'єктів тощо. У цьому випадку впливу перевантажень під

час польоту в умовах турбулентності буде піддаватися фото- або відеоапаратура, встановлена на літаку. З метою стабілізації зображення використовують різноманітні технології, в тому числі застосовують гіростабілізатори, проте і вони здатні гасити «бовтанку» лише в обмеженому діапазоні частот коливань.

Для усунення або принаймні зменшення такого негативного впливу створюються активні та пасивні системи керування [1], в тому числі системи безпосереднього керування піднімальною силою.

Математична модель

Рух повітряного судна, що ототожнюється із жорстким тілом, описується системою з шести диференціальних рівнянь, три з яких описують умову рівноваги сил у проєкціях на координатні осі, а три інших — умову рівноваги моментів відносно трьох координатних осей [2].

Припущення про те, що літак вважається жорстким тілом, масові та інерційні властивості якого є функціями часу, повинно розглядатися як наближення. Дійсно, в польоті поверхні керування відхиляються і конфігурація літака змінюється в часі. До того ж, через неминучу деформацію конфігурація конструкції повітряного судна також змінюється [3]. Для загальної оціню-

вання динамічних властивостей літака можливо прийняти спрощене компонування жорсткого тіла з постійною конфігурацією.

У цій роботі розглядається лише повздовжній рух літака, оскільки це спрощує розрахунки і враховує найнеприємніші і найнебезпечніші перевантаження, а саме нормальне перевантаження в напрямку «голова–ноги» та «ноги–голова», спричинені вертикальними прискореннями літака.

До моделі повздовжнього руху літака було введено два диференціальних рівняння, що описують турбулентну складову швидкості і ґрунтуються на моделі Драйдена [4]:

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1-2\sqrt{3}}{\sqrt{\pi}} \cdot \sigma_w \cdot a^{-2} \cdot \xi(t) - \frac{2}{a} \cdot \eta - \frac{1}{a^2} \cdot V_y, \quad (1)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\pi}} \cdot \sigma_w \cdot a^{-1} \cdot \xi(t) + \eta, \quad (2)$$

де η — допоміжна змінна; $\xi(t)$ — білий шум, а V_y — вертикальна складова швидкості від поривів вітру, що вводиться до рівняння руху літака.

Використовуючи вказану модель, було розраховано коефіцієнт нормального перевантаження для різних умов польоту. За результатами розрахунків літаки з крилами з кращими несучими здібностями будуть більш схильні впливу вітру, який створює додаткову піднімальну або притиску силу. Більш важкі літаки будуть реагувати на вплив турбулентності не так активно як легші через більше навантаження на крило за всіх інших рівних умов. Зрозуміло, що більша амплітуда пориву вітру викликає більш потужні коливання коефіцієнта нормального перевантаження.

Максимальне значення коефіцієнта нормального перевантаження спостерігається в діапазоні низьких частот [5; 6].

Один з можливих шляхів зменшити перевантаження від вертикальних прискорень – застосувати систему керування, що безпосередньо контролює підйомну силу крила за допомогою спеціально сконструйованих поверхонь на крилі, якими можуть бути спойлери та інтерцептори.

Пристрій, що реєструє наявність турбулентності може працювати на основі: а) контролю коефіцієнта нормального перевантаження; б) контролю розподілу тиску по поверхні крила; в) лазерного доплерівського вимірювача швидкостей.

Швидкість відхилення поверхонь керування має бути дуже високою, тому закрилки в цьому випадку будуть неефективні.

Автори вважають цілком доцільним використання систем подібних до лазерного доплерівського вимірювача швидкостей як пристрою, що реєструє турбулентність попереду літака [7].

Є багато моделей сприйняття акселераційного руху організмом людини, в тому числі й моделі, що описують динаміку отолітів та ендолімфи у каналах вестибулярного апарату людини [8]. У цій роботі використовується модель, що ґрунтується на вертикальному прискоренні повітряного судна:

$$\ddot{\Omega}_y = a_{0y} \cdot \ddot{S}_y - a_{1y} \cdot \dot{\Omega}_y - a_{2y} \cdot \Omega_y, \quad (3)$$

де $\dot{\Omega}_y$ — функція сприйняття акселераційного руху, спричиненого вертикальним прискоренням літака \ddot{S}_y ; a_{0y}, a_{1y}, a_{2y} — коефіцієнти, що описують динаміку сприйняття прискорень [9].

Пориви вітру з малими амплітудами спричиняють вертикальні прискорення, які відчуваються людиною в дуже вузькому діапазоні частот.

Більші амплітуди розширюють діапазон частот та збільшують значення функції сприйняття прискорень, що неминуче призводить до погіршення рівня комфорту.

Для оцінювання рівня комфорту (або дискомфорту) на основі сприйняття прискорень організмом людини у попередніх роботах авторами запропоновано критерій комфорту (K критерій), який можна записати в такій формі:

$$K = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |\Delta n_y(\omega)| \cdot \tilde{W}(\omega) \cdot d\omega, \quad (4)$$

де $\tilde{W}(\omega)$ — вагова функція вертикального перевантаження; ω_1 та ω_2 — частоти пориву вітру, в діапазоні між якими організм людини найменш стійкий до перевантажень.

Враховуючи основний закон психофізики (закон Фехнера), критерій комфорту може бути модифікований [10; 11]:

$$K_{\Omega} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |\Delta E| \cdot \tilde{W}(\omega) \cdot d\omega, \quad (5)$$

де ΔE — приріст сприйняття акселераційного прискорення;

$$\Delta E = k \cdot \ln \left(\frac{\Omega}{\Omega_{\text{lim}}} \right). \quad (6)$$

Критерій K буде перевищувати граничні значення за наявності поривів вітру або турбулентності і відсутності ефективної системи зниження перевантажень.

Проте за невеликих значень амплітуди пориву вітру рівень комфорту є доволі прийнятним, оскільки критерій K перевищує граничний рівень на малу величину або не перевищує його.

З використанням запропонованої моделі було виконано параметричний аналіз залежності сприйняття людиною акселераційних перевантажень від різних конструктивних, експлуата-

ційних та зовнішніх факторів, в тому числі від параметрів турбулентності. На рис. 1, 2 показано графіки за деякими з результатів розрахунків за моделлю.

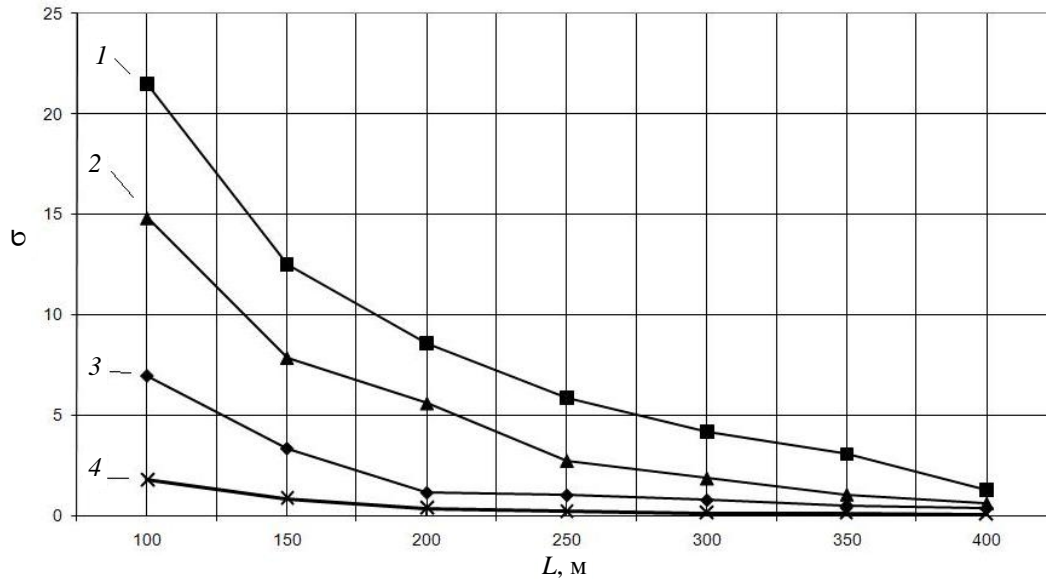


Рис. 1. Залежність дисперсії σ функції сприйняття акселераційних прискорень від масштабу та інтенсивності турбулентності:

1 — залежність за інтенсивності турбулентності, що дорівнює 2; 2 — інтенсивність дорівнює 1,5; 3 — інтенсивність дорівнює 1; 4 — інтенсивність дорівнює 0,5

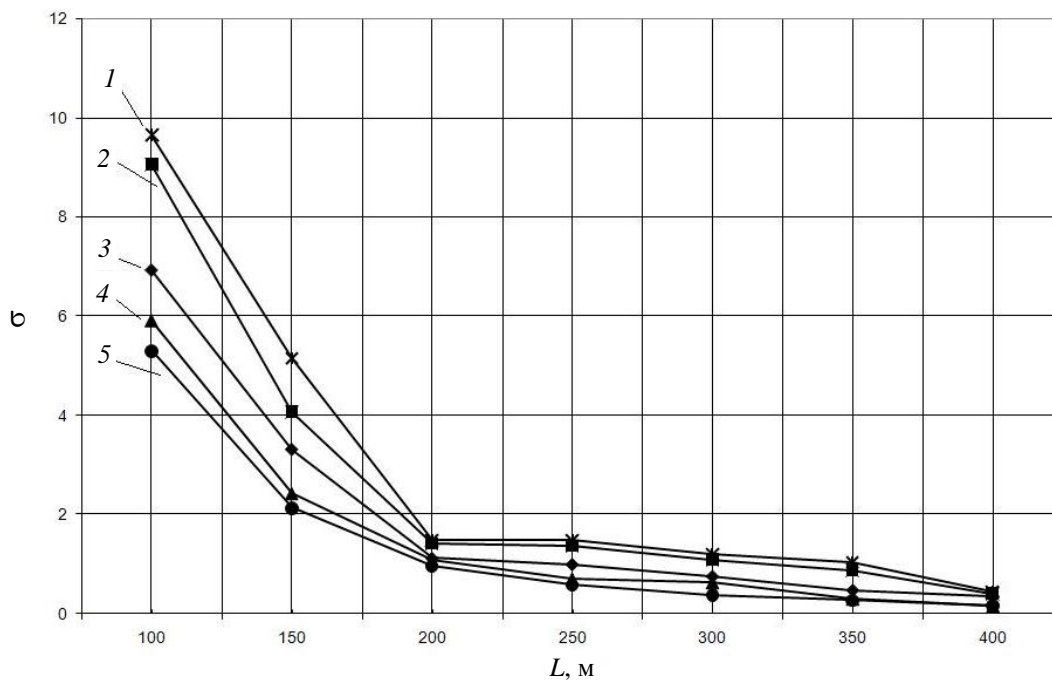


Рис. 2. Залежність дисперсії σ функції сприйняття акселераційних прискорень від масштабу турбулентності та маси літака:

1 — залежність при масі літака, що дорівнює 3000 кг; 2 — маса становить 3500 кг; 3 — маса становить 4000 кг; 4 — маса становить 4500 кг; 5 — маса становить 5000 кг

З графіків видно, що в разі збільшення масштабу турбулентності зменшується дисперсія функції сприйняття акселераційних прискорень, а це означає, що сама функція $\dot{\Omega}_y$ сприйняття акселераційних прискорень теж зменшується, що

однозначно вказує на зменшення дискомфорту, якого зазнає пасажир або член екіпажу під час польоту за таких умов.

Те ж саме можна сказати і про інтенсивність турбулентності — при збільшенні інтенсивності

людина, що знаходиться на борту літака, буде відчувати підвищення дискомфорту.

Як видно з рис. 1,2 ці залежності не є лінійними, що дає привід вважати за необхідне проведення більш ретельного аналізу отриманих результатів та відпрацювання критерію комфорту для різних умов розрахунків. Проте цілком логічні висновки за даними графіками, які є відомими фактами, дають змогу вважати запропоновану модель адекватною для таких розрахунків та аналізу, що проводиться.

Як і в попередніх розрахунках можна зробити висновок, що більш важкі літаки є значно комфортнішими і менш інтенсивно реагують на зовнішній вплив. Ця відмінність стає більш помітною за малих значень масштабу турбулентності.

Висновки

Перевантаження від прискорень, що діють на пасажирів та екіпаж, є одним з факторів, який визначає рівень комфорту. Допустимий рівень перевантажень залежить від їх спектра частот, напрямку та тривалості.

Приблизний діапазон найбільш дискомфортних частот поривів вітру становить 0,4–3 Гц.

Також необхідно брати до уваги той факт, що не тільки ударні навантаження з різкою зміною величини та напрямку впливають на стан людини, але й рівномірні та тривалі, які можуть спричинювати нудоту, втомленість, «повітряну хворобу» тощо.

За таких умов під загрозою опиняється не тільки комфорт пасажирів, але й безпека польотів, бо члени екіпажу під впливом таких навантажень можуть припуститися різних помилок, приймати неадекватні рішення, мати уповільнену реакцію та ін.

Однією з найважливіших умов ефективного використання активних систем контролю піднімальної сили є їх раціональна комбінація і сумісність з системою керування та стабілізації.

Для оцінювання рівня комфорту пасажирів та екіпажу необхідно використовувати критерії комфорту, що дають змогу провести параметрич-

ний аналіз та визначити найбільш оптимальні характеристики літака з урахуванням комфорту та безпеки польотів.

ЛІТЕРАТУРА

1) *Бюшгенс Г. С.* Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов. — Москва–Пекин: издательский отдел ЦАГИ, Авиаиздательство КНР, 1995. — 823 с.

2) *Остославский И. В.* Динамика полета. Устойчивость и управляемость летательных аппаратов / И. В. Остославский, И. В. Стражева. — М.: Машиностроение, 1965. — 467 с.

3) *Остославский И. В.* Динамика полета. Траектории летательных аппаратов / И. В. Остославский, И. В. Стражева. — М.: Машиностроение, 1969. — 499 с.

4) *Касьянов В. А.* Моделирование полета / В. А. Касьянов. — К.: НАУ, 2004. — 400 с.

5) *Кім О. О.* Політ в умовах турбулентності. Критерій комфорту / О. О. Кім // Технологические системы. — 2007. — № 2. — С. 50–54.

6) *Кім О. О.* Комфорт пасажирів літаків загальної авіації в умовах турбулентності // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Национального аэрокосмического университета им. Жуковского. — Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. — № 34. — С. 48–53.

7) *Гродзовский Г. Л.* Лазерное доплеровское измерение скорости газовых потоков. Сборник. Теория измерения. Электрические системы регистрации. — М.: ЦАГИ, 1976. — 286 с.

8) *Ищенко С. А.* Моделирование на динамических стендах авиационных тренажеров угловых и линейных ускорений маневренных самолетов ГА. Дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. — К.: КИИГА, 1985. — 180 с.

9) *Сотников Д. А.* Модели восприятия движения маневрирования самолета и их использование в задачах имитации движения на авиационных тренажерах // Сборник научных трудов «Безопасность полетов». — К.: КИИГА, 1986. — 117 с.

10) *Кім О. О.* Моделювання та параметричний аналіз повздовжнього руху літака із системою безпосереднього керування підйомною силою в умовах турбулентності з метою визначення їх впливу на екіпаж та пасажирів // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2010): друга Міжнародна науково-практична конференція. — Т. 2. — Херсон: ХДМІ, 2010. — С. 91–95.

11) *Кім О. О.* Acceleration senses and comfort level modeling for the light aircraft flight in the conditions of intensive turbulence // Авіація в ХХІ сторіччі: IV Світовий Конгрес, 21–23 вересня 2010 р. — К.: НАУ, 2010. — Т. 1. — С. 14.16–14.19.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2010.