

УДК 629.7.06 (082)

П.І. Моцарь¹, Ю.І. Миргород²

¹Науково-виробниче об'єднання „Авіа”, Кременчук

²Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МОДЕЛЮВАННЯ КРИТИЧНИХ РЕЖИМІВ ПОЛЬОТУ НА ВЕРТОЛІТНОМУ ТРЕНАЖЕРІ

В роботі розглянуті загальні питання, що стосуються моделювання критичних режимів польоту вертольоту на авіаційних тренажерах, виконане порівняння найбільш розповсюджених методів вирішення аеродинамічних задач та динамічного моделювання, вказані основні недоліки та можливість їх застосування для імітації польоту вертольоту на авіаційних тренажерах.

безпека польотів, критичні режими, авіаційні події, тренажерна підготовка, методи моделювання, імітація польоту вертольота

Вступ

Постановка проблеми. Сьогодні поява вертольотів на екранах телевізорів, в газетних публікаціях стало звичним явищем. Спектр завдань, що вирішуються гвинтокрилими машинами надзвичайно широкий, від вдалих військових операцій до тушіння лісних пожег та спасіння людей. Однак все частіше ми чуємо про аварії та катастрофи вертольотів, які привели до значних людських жертв.

Статистичний аналіз стану безпеки польотів військової та цивільної авіації свідчить (рис. 1), що доля вертольотів у загальній аварійності складає біля 45% [1]. Причому за останні роки ця цифра виросла майже в 2 рази.

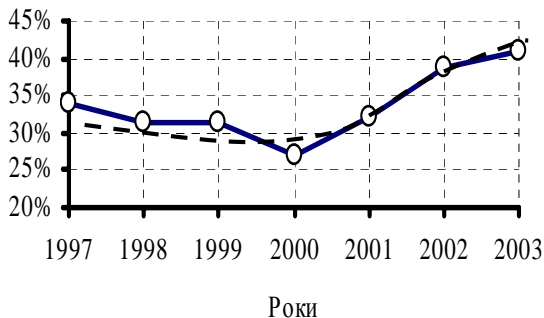


Рис.1. Світова динаміка авіаційних подій за участю вертольотної авіації

Наведенні дані стосуються світового вертолітного парку, що ж до країн СНГ, то тут кількість авіаційних подій і у військовій, і у цивільній авіації зросла майже у 3,5 рази, а кількість жертв катастроф виросла майже у 5 разів [2]. Сьогодні в світі у кожній авіаційній події з участю вертольотів гине в середньому 2 – 4 людини. Цим фактам є досить прості та логічні пояснення [2].

По-перше, вертоліт по своїй конструктивно-аеродинамічній компоновці, принципу польоту, управлінню та діючим на нього факторам є набагато складнішим у порівнянні з літаком.

По-друге, польоти на вертольоті виконуються переважно за правилами візуальної видимості, на малих висотах, над місцевістю із складним рельєфом, в умовах обмеженої видимості, при дії приземної атмосферної турбулентності тощо.

По третє, роботи з використанням вертолітної авіації дуже часто здійснюються в надзвичайно тяжких умовах: у відриві від постійного місця базування, з недостатньо відпрацьованою структурою служб забезпечення й підготовки до польотів з польотами на площадки та аеродроми без повного комплексу світло та радіотехнічного обладнання тощо.

Однак насторожує те, що основною причиною виникнення авіаційних подій у 80% випадках є екіпаж, що свідчить про недостатній рівень професійної підготовки та не готовність льотного складу до злагоджених дій у випадках попадання вертольоту у критичні ситуації. Але чому так сталось, адже пройшло трохи більше 15 років з того часу, коли наша вертолітна авіація вважалась однією з самих підготовлених у світі? Висновок такий – існуюча система підготовки, яка практично не змінилась за останні 20-25 років, й базується, переважно, на підготовці льотного складу безпосередньо в повітрі, в теперішніх умовах є не ефективною, оскільки є надзвичайно дорогою, а тому не по кишені для держави.

Аналіз літератури. Оцінюючи стан світової та вітчизняної авіації можна констатувати, що в сучасних умовах суттєво зростає роль тренажерної підготовки. І це обумовлено глобальними тенденціями розвитку професійної підготовки льотного складу.

Важливою проблемою, що суттєво впливає на рівень безпеки польотів вертолітної авіації, і не лише в Україні, є недостатня підготовка льотного складу до дій у випадку попадання вертольота у критичні для нього режими польоту. Під критичними режимами польоту вертольота тут розумітимемо, сукупність висот та швидкостей польоту, при досягненні яких можливе виникнення небезпечних ситуацій.

Загалом політ вертольота здійснюється з врахуванням цілого ряду обмежень, що враховують можливість виникнення вказаних критичних режимів. Слід також вказати, що кількість цих обмежень (набагато більше ніж для літака) та їх важливість з точки зору імовірності виникнення небезпечної ситуації польоту є основною причиною цілого ряду аварій та катастроф, що сталися за останні декілька років.

Не останнє місце у збільшенні числа авіаційних подій відіграє також старіння вертолітного парку, особливо якщо розглядати його не лише під ракурсом зниження надійності авіаційної техніки. Якраз це і не є домінуючим фактором при аналізі стану безпеки польотів [3, 4]. Набагато сильнішим є вплив старіння на обмеження значень окремих параметрів польоту. Однак, якщо питання впливу старіння на зміну льотно-технічних характеристик літаків та їх обмеження вивчаються досить давно [5, 6], то для вертолітної авіації ці питання є новими та потребують серйозного вивчення. Зараз можна лише припускати, що старіння вносить корекцію в діапазон використання вертольотів у сторону його звуження. Це ще раз підтверджує

важливість та серйозність питання підготовки льотного складу вертолітної авіації до дій у випадку попадання в критичні режими.

Як вказувалось вище, підготовка льотного складу сьогодні йде в напрямку розширення ролі тренажерної підготовки. Створено цілий ряд сучасних авіаційних тренажерних комплексів, які завдяки впровадженню нових принципів навчання забезпечують якісну підготовку як льотного, так і інженерно-технічного складів. Завдяки застосуванню новітніх інформаційних технологій та останніх досягнень авіаційного тренажеробудування автори проектів змогли створити інформаційне та імітаційне поле тренажера максимально наближеним до реального об'єкту. Так, відомими є розробки Пензенського конструкторського бюро моделювання та ВАТ «Российский центр авиационного тренажеростроения», що входять до складу Корпорації «Аэрокосмическое оборудование». До них відносяться спеціалізовані тренажери літаків Су-27К, Су-24М, Су-30МК (рис. 2) та комплексні тренажери літаків Ан-74 (рис. 3) і Ту-334. Є відповідні розробки й на Україні.



Рис. 2. Спеціалізований тренажер літака Су-30МК (ПКБМ та РЦАТ)



Рис. 3. Комплексний тренажер літака Ан-74 (ПКБМ та РЦАТ)

На рис. 4 представлено комплексний тренажер вертольота Ми-8МТ, що розроблений та виготовлений силами науково-виробничого об'єднання «Авіа», Кременчук.

Він є складовою частиною тренажерного комплексу й дозволяє створювати відповідне реальному об'єкту інформаційне поле, дозволяє імітувати певні акселераційні відчуття, обладнаний сучасними пристроями візуалізації та забезпечує моделювання відмов обладнання та систем вертольота.

Мета статті. Повертаючись до розгляду критичних режимів польоту вертольота можна з впевненістю констатувати, що сьогодні не існує авіаційних тренажерів, які б дозволяли якісно імітувати попадання літального апарату в області прояву останніх. В зв'язку з цим дослідження даних питань

є не тільки актуальними та перспективними, але й мають велику практичну значимість.

Основний матеріал

Питання імітації тісно пов'язані з терміном моделювання, оскільки саме від якості моделей, що використовуються в авіаційних тренажерах, залежить безпосередньо і якість самої імітації. Звичайно, важливим також є і вибір характеристик апаратних засобів. Однак наявна номенклатура технічних пристроїв для імітації, їх технічні характеристики та тенденції розвитку дозволяють в повній мірі забезпечити самі амбіційні запити при створенні авіаційних тренажерів та тренажерних комплексів. в зв'язку з цим докладніше зупинимось на проблемах моделювання та розглянемо перспективи моделювання кри-

тичних режимів польоту вертольота на сучасних та перспективних авіаційних тренажерах.



Рис. 4. Комплексний тренажер вертольоту Ми-8МТ виробництва НВО «Авіа» (спереду на рисунку показане робоче місце інструктора)

Що ж таке моделювання?

Сьогодні існує дуже багато різних трактувань цього терміну, які розкривають ту чи іншу сторону цього процесу (розкривають сутність видів моделювання). Однак найбільш універсальне та всеохоплююче формулювання наведено в Великій Радянській енциклопедії та трактується наступним чином: „Моделювання, це дослідження об’єктів пізнання на їх моделях; побудова та вивчення моделей реально існуючих предметів, явищ чи об’єктів, що конструюються”. Якщо перенестись безпосередньо на техніку та не акцентувати увагу на принципах реалізації моделей і рівні їх абстракції, то під моделлю слід розуміти [7] спрощену функціональну схему деякої реальної системи, побудовану шляхом відображення в ній найбільш суттєвих факторів вихідної системи. Причому вимога спрощеності є принциповою, оскільки, якщо модель має таку ж складність як і об’єкт, що моделюється, то втрачається сенс у використанні таких моделей.

В залежності від моделей, що використовуються для моделювання розрізняють предметне та знакове моделювання.

Під предметним моделюванням розуміють моделювання, в ході якого дослідження виконуються на моделях, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні та функціональні характеристики оригінала.

До предметного, до речі, відноситься й фізичне моделювання (модель та моделює мий об’єкт мають одну й ту ж фізичну природу), яке широко використовується при дослідженні аеродинамічних характеристик літальних апаратів.

Знакове моделювання – це моделювання де в якості моделей служать знакові утворення якогонебудь вигляду: схеми, креслення, графіки, форму-

ли, графи, слова тощо. До знакового моделювання відноситься такий розповсюджений сьогодні вид моделювання як математичне моделювання – моделювання, що виконується засобами мови математики та логіки.

Розглянемо застосування даних видів моделювання стосовно вирішення задач моделювання критичних режимів польоту вертольота на вертолітному тренажері. При цьому, головною метою моделювання має стати збільшення наших знань про процеси, що викликають виникнення критичних режимів.

Критичні режим польоту вертольота умовно можна розділити на режими, що проявляються на малих швидкостях польоту – мимовільне зниження вертольота, мимовільне розвертання вертольота вліво, попадання у вихрове кільце (стосується несучого та рульового гвинтів), земний резонанс, та режими що є характерними для великих швидкостей – ваління вертольота, зривний підхват, зривний флатер. Усі вони тією чи іншою стороною пов’язані із зміною характеру обтікання несучого та рульового гвинтів (рис. 5) при порушенні обмежень, що накладаються на процес пілотування.

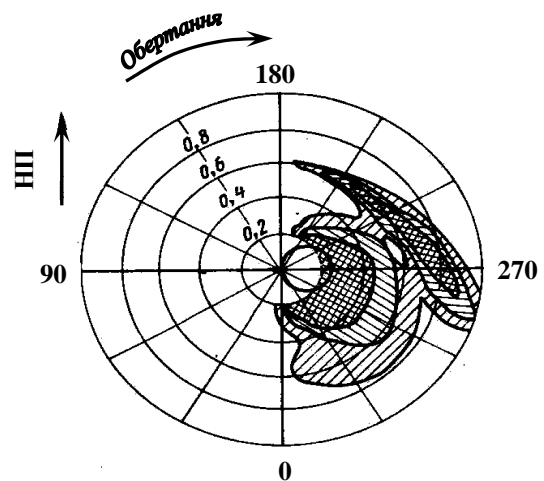


Рис. 5. Зони формування зриву при обертанні несучого гвинта

В цьому й полягає складність моделювання вказаних режимів на вертолітних тренажерах.

Явища, які пов’язані з обтіканням лопатей, що обертаються, є такими ж складними, як і явища, що розглядаються в будь-якій галузі аеродинаміки. При моделюванні польоту вертольоту необхідно враховувати те, що потік є трьохмірним та нестационарним, необхідно враховувати зони біля звукових швидкостей та в’язкість повітря.

Складність задач, що приходиться вирішувати є стимулом для розробки та застосування різноманітних методів та підходів. В табл. 1 надана коротка характеристика та вказані головні недоліки і обмеження деяких, самих розповсюджених, з вказаних методів [8 – 10].

Характеристика методів моделювання

№	Назва методів	Коротка характеристика методів	Недоліки при застосуванні методу
Фізичне моделювання	Льотний експеримент на реальних зразках авіаційної техніки	Повна адекватність реальній системі та обумовлена цим висока точність й достовірність результатів моделювання.	Виникнення складнощів під час ідентифікації параметрів зовнішнього середовища, наявність вузького кола параметрів для вимірювання, значні фінансові витрати та ризик.
	Використання масштабних моделей	Добре відпрацьована теорія проведення експерименту, добре відпрацьована математична база експерименту, можливість моделювання поведінки авіаційної техніки в критичні режими функціонування, відсутність ризику для людей.	Складнощі під час моделювання несучої системи та системи управління вертольота, неможливість оцінки впливу індуктивного потоку з боку несучого гвинта на характеристики рульового гвинта, неможливість спостереження швидкоплинних процесів навколо рульового гвинта, виникнення складнощів при моделюванні неусталених режимів роботи гвинтів тощо.
Математичне моделювання	Методи, що ґрунтуються на теорії потенціальних течій	Враховують стисливість та нестационарність повітря, що обтікає несучий гвинт вертольота	Повітря, що обтікає несучий гвинт вважається ідеальним газом, а саме обтікання безвихровим та ізентропічним.
	Методи, що ґрунтуються на теорії несучої поверхні	Моделювання обтікання виконується шляхом вирішення лінеаризованих задач з використанням рухливих особливостей з переходом до потенціалу прискорень, вона є відправною точкою для створення спрощених моделей обтікання.	Використання потенціалу прискорень не дозволяє враховувати деформацію сліду яким-небудь простим способом, а ядра інтегральних рівнянь суттєво більш складні, ніж для крила, що не обертається.
	Методи, що ґрунтуються на теорії несучої лінії	Розглядається плоске нерухоме крило великого подовження в сталому потоці, для розрахунку аеродинамічних навантажень та індуктивних швидкостей застосовується декомпозиція задачі на «внутрішню» та «зовнішню».	При моделюванні вводяться додаткові гіпотези ставляться вимоги, що обмежують сферу застосування теорії, передбачає періодичне наближення до лопаті вільних вихорів призводить до необхідності застосування нестационарних теорій при визначенні аеродинамічних навантажень тощо.
	Методи, що ґрунтуються на теорії елемента лопаті	Це, по суті, теорія несучої лінії, яка застосована до крила, що обертається, передбачається, що кожен перетин лопаті працює як профіль у двохмірному потоці, а вплив сліду та іншої частини гвинта повністю враховано індуктивним кутом атаки перетину. Дана теорія пов'язує аеродинамічні та інші характеристики гвинта з конструктивними параметрами перетину.	Припущення, які застосовують нехтують можливість існування областей з великими градієнтами навантаження або індуктивної швидкості уздовж радіусу швидкостей, використання лінійної залежності коефіцієнтів підйомної сили від кутів атаки позбавляє можливості моделювання зривних явищ на лопатях, припущення про відомий закон зміни індуктивних швидкостей не дозволяє з достатньою точністю визначити місцеві умови обтікання, а також враховувати інтерференцію гвинтів вертольота.
	Методи граничних елементів	Використовують розподіл особливостей по поверхні для вирішення задач з нелінійними граничними умовами. Дозволяє розраховувати обтікання фюзеляжу з несучим гвинтом.	Застосування методів граничних елементів для розрахунку обтікання фюзеляжу вертольота викликає складнощі, оскільки не вдається моделювати відрив з достатньою точністю, при дослідженні впливу несучого гвинта на фюзеляж не враховується нестационарність обтікання та стисливість.
	Кінцево-різницеві методи	Методи застосовуються для вирішення нелінійних рівнянь, що описують трансзвукове обтікання кінцевої частини випереджаючої лопаті.	Не вирішена задача ув'язки кінцево-різницевих методів з глобальними моделями сліду, на сьогодні вдалось розрахувати поля швидкостей лише безпосередньо біля гвинта тощо.

Як бачимо, сьогодні великий розвиток здобули методи математичного моделювання обтікання вертольота. Це пояснюється, в першу чергу, їх відносно дешевою та безпекою. До того ж, останні здобутки в цьому напрямі свідчать про їх високу перспективність.

Кутовою задачею обчислювальної аеродинаміки стосовно моделювання полоту вертольота є врахування сліду від несучого гвинта на елементи фюзеляжу та рульовий гвинт. Саме в цьому полягає її складність, а також і відмінність від аеродинаміки нерухомого крила.

Необхідність розглядати утворення сліду як процес, що проходить у в'язкому середовищі, а також необхідність врахування спіральної форми сліду не дозволяє нехтувати деталями його структури навіть на відстані порядку діаметра несучого гвинта. Вирішення ж рівняння Нав'є-Стокса для усього потоку, що обтікає гвинт, потребує значних ресурсів обчислювальних засобів.

В роботі [9] наведена інформація (табл. 2) щодо розрахунків потрібних обчислювальних засобів для вирішення задачі обтікання в'язким газом несучого гвинта та фюзеляжу в цілому. Оцінка виконана при двох обертах несучого гвинта для комбінації гвинта і фюзеляжу відносно простої форми в припущенні, що використовуються метод інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса в тонкому шарі і алгебраїчна модель турбулентності, а алгоритм вирішення такий, що крок у часі визначається точністю результатів (а не їх сталістю).

Отже ми маємо справу з мінімальною, а може бути, навіть з менш ніж мінімальною оцінкою швидкості вирішення задачі моделювання.

Таблиця 2
Розрахунок обчислювальних засобів

Швидкість обчислювальних засобів, операцій в секунду	Об'єм пам'яті, слів	Час для вирішення задачі, години
1×10^6	30×10^6	4000
25×10^7	256×10^6	16
1×10^9	1×10^9	4

При вирішенні задачі моделювання польоту на вертолітному тренажері найбільш працезатратним є розробка динамічної моделі. В ході її створення проводяться дослідження об'єкта з метою визначення його основних режимів роботи, параметрів, законів та діапазонів їх зміни, обмежень, що накладаються на об'єкт (за умов виконання польоту, роботи силової установки, не перевищення злітної маси і т.п.), що є необхідним для визначення кількості та якості джерел інформації, виконавчих органів (в першу чергу стосується динамічних систем, що застосовуються при створенні тренажера), визначення вимог до робочого місця інструктора та інше. Ці дослідження, загалом, виконуються таким чином, щоб їх результати можна було використати й для отримання моделі системи, й для побудови алгоритмів керування навчанням, й для наступного вибору структури обчислювального середовища. При моделюванні польоту на авіаційному тренажері головною проблемою є коректність вибору критерію адекватності підмножини перемінних, що виділені для моделювання, й системи обмежень, що безпосередньо включені до математичної моделі. Саме цій меті й підпорядковані основні методи конструювання математичних моделей літальних апаратів (табл. 3) [11].

Таблиця 3
Методи конструювання математичних моделей для авіаційних тренажерів

Назва методу	Коротка характеристика	Недоліки
Аксиоматичний метод		Моделі, як і самі аксіоми не можуть бути перевірені безпосередньо в експерименті
Метод рівнянь елементів	Використовується тоді, коли потрібно скласти математичну модель літального апарату на основі властивостей його частин або коли з заданого набору елементів потрібно скласти складний об'єкт та визначитись з його властивостями	Не всі властивості літальних апаратів можуть бути визначені через властивості його окремих елементів. Особливо це важливо при моделюванні динаміки руху тощо.
Метод ідентифікації	Математична модель будується на основі реальних даних, що спостерігаються в процесі експлуатації реального об'єкту або ж в процесі спеціально організованого експерименту.	Відсутність загального методу вирішення таких класів задач.

Таким чином, існує суттєва різниця у вирішенні задач аеродинамічного моделювання, що застосовується при вивченні процесів обтікання вертольоту та моделювання динаміки поведінки вертольоту, що активно застосовується для імітації поведінки реального об'єкту на авіаційних тренажерах. Різняться й методи вирішення даних задач. В зв'язку з цим

вони не можуть вирішуватись одночасно. Однак сам процес моделювання критичних режимів польоту, а надалі й імітації повинен базуватись на реальних або ж близьких до реальних даних про вказані режими польоту. Саме в цьому й полягає доречність аеродинамічного моделювання обтікання вертольоту при формуванні бази даних з наступним вирі-

шенням задачі динамічного моделювання безпосередньо на вертолітному тренажері.

Адже моделювання аеродинаміки обтікання вертольоту на різних режимах може дати важливу інформацію для подальшого візуального, звукового та акселераційного імітування його поведінки на авіаційному тренажері. Однак ці питання потребують додаткового вивчення в рамках програми досліджень по розробці загально-технічних вимог до авіаційних тренажерів різного призначення.

Висновки

1. Суттєве зростання за останнє десятиріччя аварійності у вертолітній авіації та низька ефективність організаційних заходів щодо попередження цього зростання свідчить про необхідність перегляду сучасних підходів щодо підготовки льотного складу для потреб вертолітної авіації абсолютно у всіх міністерствах та відомствах України.

2. Враховуючи особливості функціонування вертолітної авіації в Україні, а також спираючись на світовий досвід прогнозується суттєве зростання питомої ваги авіаційних тренажерів у процесі підготовки льотного складу, що безумовно потребує розширення їх можливостей за рахунок підвищення якості імітації окремих, найбільш небезпечних (критичних) режимів польоту.

3. Огляд сучасних підходів та методів моделювання критичних режимів польоту вертольоту, а також оцінка можливості їх реалізації в алгоритмах імітування свідчить про недоцільність синтезу цих задач в єдиному обчислювальному алгоритмі.

4. Дослідження показують, що найбільш доречним на сьогоднішньому етапі розвитку обчислювальних методів та техніки є поетапне вирішення задач моделювання та імітації польоту вертольоту на критичних режимах.

Список літератури

1. Аварийность в военной авиации зарубежных стран. Справочные данные // Зарубежное военное обозрение. – М., 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003. – № 12. – С. 26-34; 28-34; 29-33; 43-46; 29-32; 39-44.
2. Володко А. Без опасности в полете // Вертолет. – 2001. – № 1. – С. 10-13.
3. Удосконалення організації та контролю підготовки льотного складу до дій в особливих випадках з метою забезпечення заданого рівня безпеки польотів: Звіт про НДР, шифр „Безпека”, № 48257. – Х.: ХІ ВПС, 2002. – 78 с.
4. Козлов В. Человеческий фактор как причина авиационных трагедий // Вестник воздушного флота. – 2001. – Вересень-жовтень – С. 42-44.
5. Приймак А.В., Українець С.О. До питання визначення впливу зміни вихідних характеристик планера і силовій установки на показники ефективності використання літаків різного призначення // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Х.: НАКУ „ХАИ”, 2002. – Вып. 28 (1). – С. 54-61.
6. Ударцев Е.П. Влияние индивидуальных аэродинамических особенностей на сопротивление и расходы топлива самолетами / Прикладная аэродинамика // 36. наук. пр. – К.: КМУГА. – 1997. – С. 204-211.
7. Основы моделирования сложных систем / Под общ. ред. И.В. Кузьмина – К.: Вища школа, 1981. – 360 с.
8. Джонсон У. Теория вертолета: В 2-х книгах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – Кн.1. – 502 с.
9. Джонсон У. Современное состояние теоретических исследований по аэродинамике несущего винта / Аэрокосмическая техника. – 1987. – № 5. – С. 3-36.
10. Михеев С.В., Аникин В.А., Свириденко Ю.Н., Коломенский Д.С. Направления развития методов моделирования характеристик несущих винтов // Полет. – 2004. – № 6. – С. 4-13.
11. Аэроревю [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www.aerorevie.ru / Pages / P.flpt-200509-053057.htm](http://www.aerorevie.ru/Pages/P.flpt-200509-053057.htm).

Надійшла до редколегії 15.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, старший наук. співр. О.Б. Леонтєв, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.