

УДК 629.7.013:681.267.74

doi: 10.32620/aktt.2025.5.01

Г. О. ЧЕРЕПАЩУК¹, О. П. ПОТИЛЬЧАК¹, С. В. КЛІМОВ²¹ Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

² ТОВ "Інженерне бюро Авіаційного інституту", Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВАГИ ТА ПОЛОЖЕННЯ ЦЕНТРУ ВАГИ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Предметом вивчення в статті є процеси визначення ваги та положення центру ваги літальних апаратів. **Метою** є дослідження методів і засобів визначення ваги та положення центру ваги літальних апаратів. **Завдання:** формулювання вимог, які мають пред'являтися до відповідних методів і засобів; класифікація методів і засобів, виділення основних груп і підгруп за певними ознаками; опис і дослідження представників виділених груп і підгруп; порівняння розглянутих методів і засобів, вибір найбільш перспективного методу для подальшого розвитку; постановка основних задач щодо створення практично реалізованих засобів визначення ваги та положення центру ваги ЛА. Отримані такі **результати**. Сформульовано основні вимоги до методів та засобів визначення значення ваги та положення центру ваги ЛА, а саме, забезпечення необхідної точності, оперативності, зручності застосування та інтеграції до бортових систем ЛА, а також економічна доцільність. Розглянуто відомі методи та засоби, виділено основні групи та підгрупи за певними ознаками. Виділено такі підгрупи: основані на вимірюванні складових ваги ЛА за допомогою датчиків сили; основані на вимірюванні тиску в амортизаційних опорах шасі; основані на використанні датчиків для вимірювання ходу штоків циліндрів амортизаційних опор; основані на вимірюванні вигину конструктивних елементів ЛА. Досліджено характеристики основних представників виділених підгруп залежно від використовуваних фізичних принципів. Проведено порівняння розглянутих методів і засобів за рядом найважливіших показників (точність визначення ваги та положення центру ваги; складність технічної реалізації; складність інтеграції до бортових систем ЛА; вартість реалізації; надійність роботи). **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що на основі аналізу найважливіших показників розглянутих методів і засобів було розраховано інтегральні показники ефективності для кожного з методів. В результаті найбільш перспективними для подальшого розвитку обрано методи та засоби, основані на вимірюванні ходу штоків циліндрів амортизаційних опор. Визначено основні задачі для подальших досліджень: розробка методології отримання статичних характеристик перетворення циліндрів; відпрацювання конструктивних рішень стосовно побудови системи зважування та центрування ЛА на основі обраного методу; удосконалення алгоритмів розрахунку ваги та положення центру ваги ЛА за результатами вимірювань, одержаними від оптичних датчиків; опрацювання питань метрологічного забезпечення системи зважування та центрування ЛА.

Ключові слова: літальний апарат; вага; положення центру ваги; амортизаційна опора; стійка шасі.

1. Вступ

1.1. Мотивація і сучасний стан

Визначення ваги та положення центру ваги літальних апаратів (ЛА) є дуже важливою й актуальною задачею. Згідно з виданою ІКАО Настановою з льотної придатності [1], первинною метою контролю ваги та положення центру ваги ЛА є безпека польотів. Вторинною метою є досягнення максимальної ефективності під час експлуатації ЛА. Неправильне завантаження знижує ефективність експлуатації ЛА і може стати причиною неможливості розпочати або завершити політ.

Вага та положення центру ваги порожнього ЛА визначаються під час його первинної сертифікації. З часом і в процесі експлуатації ЛА має тенденцію набирати вагу через накопичення бруду, жиру і масла в місцях, недоступних для миття і чищення. Інші причини зміни ваги включають перефарбування ЛА, встановлення нового обладнання та виконання модифікацій і ремонтів. З цієї причини періодичне зважування і визначення положення центру ваги порожнього ЛА є необхідним і, як правило, вимагається національними правилами для операторів.

Крім визначення ваги та положення центру ваги порожнього ЛА необхідно також контролювати ці параметри у процесі його завантаження. Поточне по-



ложення центру ваги ЛА визначає його балансування, стійкість і керованість на землі й, особливо, у повітрі, тобто ступінь безпеки польоту.

Таким чином, задача визначення ваги та положення центру ваги як порожніх, так і завантажених ЛА є дуже актуальною.

1.2. Мета та підхід

Метою авторів було дослідження методів і засобів визначення ваги та положення центру ваги ЛА. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- формулювання вимог, які мають пред'являтися до відповідних методів і засобів;
- класифікація методів і засобів, виділення основних груп і підгруп за певними ознаками;
- опис і дослідження представників виділених груп і підгруп;
- порівняння розглянутих методів і засобів, вибір найбільш перспективного методу для подальшого розвитку;
- постановка основних задач щодо створення практично реалізованих засобів визначення ваги та положення центру ваги ЛА.

У статті використано підхід, що передбачає аналіз літературних джерел, в яких описано методи та засоби визначення ваги та положення центру ваги ЛА, а також порівняння розглянутих методів і засобів за рядом найважливіших показників.

Стаття побудована наступним чином:

Розділ 2 присвячено дослідженню методів і засобів визначення ваги та положення центру ваги ЛА.

Розділ 3 містить обговорення одержаних результатів та їх представлення у вигляді порівняння розглянутих методів і засобів.

Розділ 4 завершує статтю підсумовуванням висновків, дає перспективу для подальших досліджень.

2. Дослідження методів і засобів визначення ваги та положення центру ваги ЛА

Методи та засоби визначення ваги та положення центру ваги ЛА мають забезпечувати необхідну точність, оперативність, зручність застосування та інтеграції до бортових систем ЛА, а також мати економічну доцільність. Існуючі настанови зі зважування та центрування ЛА встановлюють припустиму відносну похибку зважування ЛА 0,1% [2].

Усі відомі методи та засоби визначення ваги та положення центру ваги можна поділити на три основні групи: наземні, бортові та змішані. Також у кож-

ній з названих груп можна виділити підгрупи за рядом ознак.

Наземні методи та засоби традиційно застосовуються для визначення ваги та положення центру ваги порожніх ЛА. Вони передбачають вимірювання складових ваги ЛА та геометричних параметрів за відповідною схемою вимірювань з подальшим розрахунком положення центру ваги [3]. Перевагами наземних методів та засобів є наявність відпрацьованих методик зважування, можливість використання високоточних тензодатчиків, а також відносна простота метрологічного забезпечення [4, 5]. До їх недоліків можна віднести достатньо складну та трудомістку процедуру зважування і розрахунку центрування, а також неможливість використання для оперативного контролю в процесі завантаження ЛА.

Бортові методи та засоби не настільки поширені, як наземні. Вони дають можливість проводити оперативне визначення ваги та положення центру ваги ЛА під час його експлуатації. Їх недоліками є необхідність встановлення на ЛА додаткових технічних засобів, а також значно гірша точність у порівнянні з наземними засобами. Також можна виділити бортові методи та засоби, призначені для оцінювання зміни положення центру ваги ЛА під час польоту [6].

Змішані методи та засоби можуть поєднувати властивості наземних і бортових. Наприклад, розрахунок положення центру ваги може здійснюватись бортовою системою за інформацією, отриманою від наземного засобу вимірювання. Також прикладом змішаного методу є використання бортовим засобом початкової інформації про вагу та положення центру ваги, отриманої від наземного засобу з подальшим додаванням інформації про розміщення пасажирів у салоні літака [7].

Залежно від використовуваних фізичних принципів можна виділити такі підгрупи:

- основані на вимірюванні складових ваги ЛА за допомогою датчиків сили;
- основані на вимірюванні тиску в амортизаційних опорах шасі;
- основані на використанні датчиків для вимірювання подовження та стиснення амортизаційних опор шасі під дією ваги ЛА;
- основані на вимірюванні вигину конструктивних елементів ЛА.

Засоби визначення ваги та положення центру ваги ЛА можна класифікувати й за іншими ознаками. Так, за використовуваними лініями зв'язку існують засоби з дротовим і бездротовим з'єднанням між вимірювальною і обчислювальною частинами. За методами розрахунку положення центру ваги – з автоматичним і напівавтоматичним розрахунком. За способом відображення результатів – з цифровим або умовно-графічним відображенням.

Розглянемо властивості основних представників підгруп залежно від використовуваних фізичних принципів.

2.1. Методи та засоби, основані на вимірюванні складових ваги ЛА за допомогою датчиків сили

На даному фізичному принципі, зазвичай, ґрунтуються наземні засоби визначення ваги та положення центру ваги ЛА. Подібні засоби детально описані у [3].

Використання, наприклад, точних тензометричних датчиків сили забезпечує визначення ваги та положення центру ваги ЛА з відносною похибкою 0,05...1 %. Незважаючи на це, застосування даного методу в бортових системах зважування і центрування ЛА не є поширеним у теперішній час. У середині минулого сторіччя компанія *Boeing* запатентувала бортову ваговимірювальну систему, яка використовує даний метод [8]. Для реалізації запропонованої системи необхідно модифікувати шасі ЛА, а саме, встановити у них тензометричні датчики сили, які виконані у вигляді спеціальних втулок з наклеєними на них тензорезисторами. Аналогові сигнали від цих датчиків сили надходять у підсумовуючий пристрій, вихідний сигнал якого, пропорційний вазі ЛА, відображається відповідно каліброваним вольтметром.

Головний недолік даної системи є очевидним – це необхідність модифікації конструкції шасі ЛА, що призводить до виникнення ряду технічних, економічних та організаційних проблем. Також недоліком є низька надійність тензометричних датчиків сили внаслідок дії на них ударних перевантажень під час посадки ЛА. Через зазначені недоліки подібні системи не набули широкого застосування.

2.2. Методи та засоби, основані на вимірюванні тиску в амортизаційних опорах шасі

Тиск у амортизаційних опорах стійок шасі ЛА залежить від навантажень, які прикладені до відповідних стійок. Цю залежність можна використати для визначення ваги та положення центру ваги ЛА.

Даний фізичний принцип набув достатньо широкого застосування. Зокрема, у [9] пропонується використання послідовно з'єднаних п'єзоелектричних датчиків тиску, розміщених у місцях кріплення стійок шасі, процесора і пристрою відображення, встановлених у кабіні екіпажу.

У [10] запропоновано метод визначення положення центру ваги літака, а у [11] оснований на цьому методі пристрій. Положення центру ваги визначається за вихідними сигналами датчиків тиску та

датчиків прогину осей. Датчики тиску встановлюються на кожній стійці шасі для опосередкованого вимірювання та реєстрації навантажень на стійки шасі ЛА. Датчики прогину осей встановлюються на кожній з осей шасі для опосередкованого вимірювання та реєстрації навантажень на осі шасі ЛА.

У бортовій системі зважування і центрування ЛА, запропонованій у [12], вага та положення центру ваги ЛА визначаються за результатами опосередкованих вимірювань навантажень на кожній стійці шасі (рис. 1).

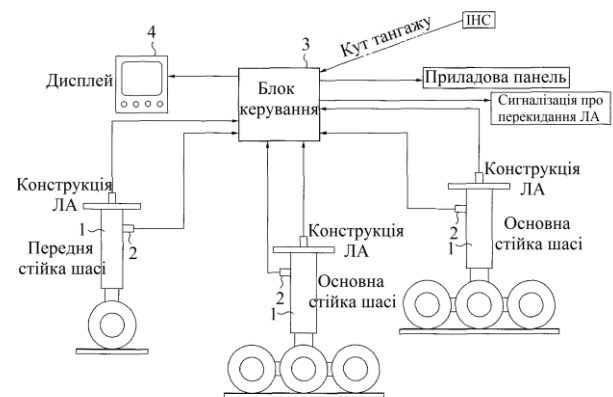


Рис. 1. Бортова система зважування і центрування ЛА

На кожен амортизаційну опору 1 встановлено датчик тиску 2. Вимірювальні сигнали, пропорційні значенням тиску в амортизаційних опорах, надходять у блок управління 3. Блок управління розраховує навантаження на кожній стійці шасі, використовуючи виміряні значення тиску, а також інформацію про силу статичного тертя для кожної амортизаційної опори, отриману під час первинного калібрування системи. Після отримання значень навантаження на кожній стійці шасі блок управління розраховує загальну вагу ЛА і положення його центру ваги. Оскільки наявність ненульового кута тангажу впливає на правильність розрахунку положення центру ваги, у блок управління надходить інформація про цей параметр від бортової інерціальної навігаційної системи (ІНС). Блок управління використовує дану інформацію для введення поправки у результат розрахунку положення центру ваги ЛА. Таким чином, поточна інформація про вагу та положення центру ваги ЛА може обчислюватися у циклічному режимі та відображатися на дисплеї 4, розташованому в кабіні пілота або вантажному відсіку.

Перевагами розглянутої системи є відносна простота та економічність її реалізації, а також мінімальне втручання у конструкцію ЛА. До її недоліків можна віднести необхідність попереднього визначення

сили статичного тертя в амортизаційних опорах, а також те, що навантаження на стійках шасі визначаються опосередковано через вимірювання тиску, що призводить до зниження точності (відносна похибка визначення ваги та положення центру ваги ЛА становить 0,2...0,25 %).

2.3. Методи та засоби, основані на використанні датчиків для вимірювання ходу штоків циліндрів амортизаційних опор

Навантаження на стійці шасі ЛА можна визначити також за результатами вимірювання ходу штоку циліндра амортизаційної опори за допомогою, наприклад, оптичного датчика.

Відомий спосіб зважування та визначення центрування [13] за допомогою лазерного випромінювача, що встановлюється на фюзеляж ЛА і скануючого пристрою, який встановлюють під лазерним випромінювачем так, щоб проекція світлового конуса розташовувалась приблизно в центрі його робочої поверхні. У процесі завантаження ЛА змінюються його характеристики, отже, відповідно змінюється геометрія світлової плями на поверхні скануючого пристрою. Ця зміна обробляється в обчислювальному пристрої за допомогою спеціальної програми. Інформація про зміну ваги та центрування ЛА відображається на моніторі.

Використання оптичних датчиків для визначення ваги та положення центру ваги ЛА описано в [14, 15]. У пристрої, який запропоновано в [15], передбачено встановлення на корпуси циліндрів амортизаційних опор шасі ЛА оптичних далекомірів, котрі закріплено на корпусах циліндрів вздовж їх поздовжніх осей, та відбивачів, закріплених на штоках циліндрів (рис. 2).

Оптичний далекомір 1 відносно похибкою вимірювання відстані не більше 0,01 – 0,02 % встановлюють на корпус циліндра 4 кожної опори шасі ЛА. Оптичну вісь далекоміра спрямовують паралельно поздовжній осі циліндра. На шток 3 циліндра закріплюють перпендикулярно напрямку променя далекоміра плоску пластину – відбивач 2, відстань до якої вимірює далекомір. Зміна цієї відстані дорівнює ходу штоку циліндра, який залежить від сили, діючої на опору шасі. Результати вимірювання відстані з усіх оптичних далекомірів по дротовим лініям зв'язку передаються на обчислювально-індикаторний блок, який, з урахуванням статичних характеристик перетворення циліндрів, визначає сили, діючі на опори шасі, та вагу ЛА, а, з урахуванням схеми шасі та геометричних параметрів ЛА даного типу, положення його центру ваги. Інформація про зміни ваги та центрування ЛА відображається на індикаторі обчислювально-індикаторного блоку.

Обчислювально-індикаторний блок знаходиться в кабіні ЛА, що дає можливість контролювати його вагу та центрування в процесі технічного обслуговування або завантаження.

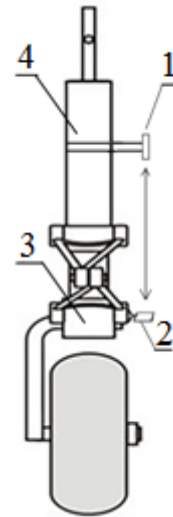


Рис. 2. Встановлення оптичного далекоміру та відбивача на амортизаційній опорі стійки шасі ЛА

Розглянутий пристрій має ті ж самі переваги, що і система, основана на вимірюванні тиску в амортизаційних опорах. Додатковою перевагою є підвищення точності визначення відповідних параметрів, завдяки використанню високоточних оптичних далекомірів (може бути досягнута відносна похибка 0,1 %). Недоліками пристрою є необхідність попереднього визначення статичних характеристик перетворення циліндрів, а також зниження точності через використання опосередкованих вимірювань сил, які діють на стійки шасі.

Хід штоку циліндра амортизаційної опори може бути виміряний не тільки за допомогою оптичних датчиків. Так, у [16] для вирішення цієї задачі запропоновано датчик лінійного переміщення, котрий містить дві котушки індуктивності, сердечник, що встановлений з можливістю руху вздовж осі котушок індуктивності, та пов'язаний з ним шток циліндричної форми.

2.4. Методи та засоби, основані на вимірюванні вигину конструктивних елементів ЛА

Вага та положення центру ваги ЛА можуть також бути опосередковано визначені через вимірювання вигину певних конструктивних елементів ЛА.

Ваговимірювальну систему, яка працює на даному принципі, описано в [17]. У цій системі за допомогою інклінометрів вимірюється вигин таких конструктивних елементів ЛА, як стійка шасі, крило та секція фюзеляжу. Кожен з інклінометрів має вихідний сигнал, пропорційний значенню кута вигину елемента відносно опорної площини. Обробка вихідних сигналів інклінометрів з використанням попередньо визначених залежностей вигину конструктивних елементів від прикладеного навантаження дозволяє отримати значення ваги та положення центру ваги ЛА. Через залежність від багатьох впливових факторів точність визначення ваги та положення центру ваги ЛА є невисокою (орієнтовна відносна похибка становить 0,2 %).

3. Результати та обговорення

Для вибору методу, найбільш перспективного для подальшого розвитку, необхідно порівняти розглянуті вище методи та засоби визначення ваги та положення центру ваги ЛА за рядом найважливіших показників. Результатом порівняння має бути інтегральний показник ефективності, який є зваженою сумою нормалізованих значень окремих показників:

$$K = \sum_{i=1}^n w_i \cdot k_i ,$$

де w_i – ваговий коефіцієнт для i -го показника, який може приймати значення від 0 до 1, сума вагових коефіцієнтів має дорівнювати 1,

k_i – нормалізоване значення i -го показника за шкалою від 0 до 1 (0 відповідає найменш вигідному значенню показника, а 1 – найбільш вигідному).

Для порівняння розглянутих методів і засобів були обрані такі показники: точність визначення ваги та положення центру ваги; складність технічної реалізації; складність інтеграції до бортових систем ЛА; вартість реалізації; надійність роботи. За результатами аналізу джерел інформації з урахуванням думок експертів та власного досвіду авторів були встановлені значення вагових коефіцієнтів для кожного показника, а також нормалізовані значення показників для методів, розглянутих у п. 2.1 – 2.4 (див. табл. 1). Також до табл. 1 занесені розраховані значення інтегрального показника ефективності для кожного з методів.

Як видно з табл. 1, найбільш перспективними можна вважати методи та засоби, розглянуті у п. 2.3, тобто основані на вимірюванні ходу штоку циліндра амортизаційної опори за допомогою оптичного датчика.

Дискусійним моментом є встановлені під час

вибору методу, найбільш перспективного для подальшого розвитку, значення вагових коефіцієнтів для кожного показника, а також нормалізовані значення показників.

Таблиця 1
Результати порівняння розглянутих методів і засобів

Показник	w_i	2.1	2.2	2.3	2.4
Точність	0,25	1	0,6	0,9	0,7
Складність реалізації	0,2	0,9	0,5	0,7	0,3
Складність інтеграції	0,25	0,3	0,8	0,9	0,6
Вартість	0,15	0,9	0,9	0,8	0,5
Надійність	0,15	0,5	0,7	0,8	0,5
Інтегральний коефіцієнт К	-	0,715	0,69	0,83	0,535

4. Висновки

Сформульовано основні вимоги до методів та засобів визначення значення ваги та положення центру ваги ЛА. Розглянуто відомі методи та засоби, виділено основні групи та підгрупи за певними ознаками. Досліджено характеристики основних представників підгруп залежно від використовуваних фізичних принципів. Проведено порівняння розглянутих методів і засобів за рядом найважливіших показників. В якості найбільш перспективних для подальшого розвитку обрано методи та засоби, основані на вимірюванні ходу штоку циліндра амортизаційної опори за допомогою оптичного датчика.

Подальші дослідження обраних методів та засобів визначення ваги та положення центру ваги будуть спрямовані на: розробку методології отримання та дослідження статичних характеристик перетворення циліндрів амортизаційних опор як вимірювальних пристроїв, тобто залежностей ходу штоку циліндра від прикладеного навантаження та впливових факторів, що зменшують точність перетворення; відпрацювання конструктивних рішень стосовно побудови системи зважування та центрування ЛА на основі обраного методу; удосконалення алгоритмів розрахунку ваги та положення центру ваги ЛА за результатами вимірювань, одержаними від оптичних датчиків; опрацювання питань метрологічного забезпечення системи зважування та центрування ЛА.

Внесок авторів: формулювання проблеми – Г. О. Черепашук, С. В. Клімов; огляд та аналіз інформаційних джерел – Г. О. Черепашук, О. П. Потильчак; дослідження та порівняння методів і засобів визначення ваги та положення центру ваги ЛА – Г. О.

Черепашук, О. П. Потильчак, С. В. Клімов; визначення задач для подальших досліджень – Г. О. Черепашук, О. П. Потильчак.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. Doc. ICAO №9760 AN/967. *Airworthiness Manual. 4th Edition* [Електронний ресурс]. – Montreal: ICAO, 2020. – 420 р. – Режим доступу: <https://aviation-insight.aero/wp-content/uploads/2021/05/ICAO-9760-docs-4thEdition.pdf>. – 21.07.2025.
2. Самолеты Ан-24, Ан-24Т, Ан-26, Ан-30, Ан-32 и их модификации. *Определение массы и центровки взвешиванием самолетов, находящихся в эксплуатации, после капитальных ремонтов, доработок, при модифицировании и контрольные взвешивания. Инструкция №24.00.0000.703.000И* [Рукопись] : утв. зам. ген. конструктора ГАК "Антонов" 30.12.2008.
3. Контроль центрування літальних апаратів і його метрологічне забезпечення [Текст] / Г. О. Черепашук, О. П. Потильчак, І. Л. Чупова, & С. В. Клімов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 3. – С. 22-32. DOI: 10.32620/akt.2023.3.03.
4. Борзенкова, А. В. Оценка неопределенности измерения положения центра тяжести летательных аппаратов [Електронний ресурс] / А. В. Борзенкова, & Г. А. Черепашук // *Системы обработки информации*. – 2012. – Вып. 1. – С. 55-58. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2012_1_15. – 21.07.2025.
5. Пристрій для калібрування систем зважування та центрування літальних апаратів [Текст] : пат. 102790 Україна : G01L 25/00 [Текст] / Г. В. Борзенкова, Г. О. Черепашук. – № и 2015 03383 ; заявл. 10.04.2015 ; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22. – 1 с.
6. Civil aircraft weight and center-of-gravity real-time estimation via the six-degree-of-freedom model with variable center of mass [Text] / S. Zhai, G. Li, P. Huang, & M. Hou // *Applied Mathematical Modelling*. – 2025. – Vol. 144. – Article no. 116063. DOI: 10.1016/j.apm.2025.116063.
7. Zhao, X. *Uncertainty analysis of aircraft center of gravity deviation and passenger seat allocation optimization* [Text] / X. Zhao, & W. Xiao // *Mathematics*. – 2024. – Vol. 12, iss. 10. – Article no. 1591. DOI: 10.3390/math12101591
8. Strain-gauge weighing apparatus for vehicle support structure [Text] : пат. 3499500A USA : G01G 19/07, G01G 3/1406 / David G. Harding. – № 709402 ; fil. 29.02.1968 ; publ. 10.03.1970.
9. Устройство для определения массы летательного аппарата [Текст] : пат. 2465558 Российская Федерация : G01G 19/07 / В. В. Ефанов, С. М. Мужичек. – № 2011 105516А ; заявл. 14.02.2011 ; опубл. 27.10.2012.
10. Method for determining aircraft center of gravity independent of measuring the aircraft weight [Text] : пат. 9927319B2 USA : G01M 1/12, B64D 45/00, G01G 19/07 / Kirk Nanse. – № 14/502680 ; fil. 30.09.2014 ; publ. 27.03.2018.
11. Aircraft weight and center of gravity indicator [Text] : пат. 5214586A USA : G01M 1/125, G01G 19/07, B64D 2045/008 / Kirk Nanse. – № 832470 ; fil. 7.02.1992 ; publ. 25.05.1993.
12. Onboard aircraft weight and balance system [Text] : пат. 8340892B2 USA : G06F 17/10, G06G 7/48 / Michael A. Long, Geoffrey E. Gouette. – № 12/950983 ; fil. 19.11.2010 ; publ. 25.12.2012.
13. Способ определения взлетной массы и центровки летательного аппарата [Текст] : пат. 2172475C1 Российская Федерация : G01G 19/07 / Р.М. Ахметшин, Н.М. Ощепков, О.Г. Кузнецов, П.Г. Петров, В.Н. Кружков. – № 2000 113926/28А ; заявл. 31.05.2000 ; опубл. 20.08.2001.
14. System for determination of weight and position of centre of an aircraft mass [Text] : пат. 230085B1 Poland : G01G 19/07 / В. Kolasa, L. Ulanowicz, P. Szczepaniak. – № 418311A1 ; fil. 12.08.2016 ; publ. 28.09.2018.
15. Пристрій для визначення ваги та положення центра ваги літального апарата [Текст] : пат. 130399 Україна : G01G 19/07, G01G 19/64, G01C 3/00 / Г. О. Черепашук, О. П. Потильчак, Є. Є. Калашиников. – № и 2018 05485 ; заявл. 17.05.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. №23. – 1 с.
16. Датчик лінійного переміщення [Текст] : пат. 61304 Україна : G01B 7/00 / Г. О. Черепашук, М.

B. Маренич. – № и 2011 01562 ; заявл. 11.02.2011; опубл. 11.07.2011, Бюл. №13. – 1 с.

17. *Aircraft weight measuring system [Text] : pat. 1166276A Canada : G01G 19/07 / Charles D. Bateman. – № 000418063A ; fil. 17.12.1982 ; publ. 24.04.1984.*

References

1. Doc. ICAO №9760 AN/967. *Airworthiness Manual. 4th edition.* Montreal, ICAO, 2020. 420 p. Available at: <https://aviation-insight.aero/wp-content/uploads/2021/05/ICAO-9760-docs-4thEdition.pdf> (accessed 21.07.2025)

2. *Samolety An-24, An-24T, An-26, An-30, An-32 i ikh modifikatsii. Opredelenie massy i tsentrovki vzveshivaniem samoletov, nakhodyashchikhsya v ekspluatatsii, posle kapital'nykh remontov, dorabotok, pri modifitsirovani i kontrol'nye vzveshivaniya* [Aircraft An-24, An-24T, An-26, An-30, An-32 and their modifications. Determination of the weight and balance by weighing aircraft in service after overhauls, modifications, modifications and control weighing]. Instruction no. 24.00.0000.703.000I, 2008. (In Russian, unpublished).

3. Cherepashchuk, H. O., Potyl'chak, O. P., Chupova, I. L., & Klimov, S. V. Kontrol' tsentruvannya lital'nykh aparativ i yoho metrolohichne zabezpechennya [Control of aircrafts balance and its metrological assurance]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology* 2023, no. 3, pp. 22-32. DOI: 10.32620/aktt.2023.3.03. (In Ukrainian).

4. Borzenkova, A. V., & Cherepashchuk, G. A. Otsenka neopredelennosti izmereniya polozheniya tsentra tyazhesti letatel'nykh aparatov [Estimation of uncertainty in measuring the position of the center of gravity of aircraft]. *Systemy obrobky informatsiyi – Information processing systems*, 2012, no. 1, pp. 55-58. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2012_1_15 (accessed 21.07.2025). (In Russian).

5. Borzenkova, H. V., & Cherepashchuk, H. O. *Prystriy dlya kalibruvannya system zvazhuvannya ta tsentruvannya lital'nykh aparativ* [Device for calibrating aircraft weighing and balancing systems]. Patent Ukraine no. 102790, 2015.

6. Zhai, S., Li, G., Huang, P., & Hou, M. Civil aircraft weight and center-of-gravity real-time estimation via the six-degree-of-freedom model with variable center of mass. *Applied Mathematical Modelling*, 2025, vol. 144, article no. 116063. DOI: 10.1016/j.apm.2025.116063.

7. Zhao, X., & Xiao, W. Uncertainty analysis of aircraft center of gravity deviation and passenger seat allocation optimization. *Mathematics*, 2024, vol. 12, iss. 10, article no. 1591. DOI: 10.3390/math12101591.

8. Harding, David G. *Strain-gauge weighing apparatus for vehicle support structure.* Patent USA no. 3499500A, 1970.

9. Efanov, V. V., & Muzhichek, S. M. *Ustroistvo dlya opredeleniya massy letatel'nogo apparata* [Device for determining the mass of an aircraft]. Patent RF no. 2465558, 2012.

10. Nanse, Kirk. *Method for determining aircraft center of gravity independent of measuring the aircraft weight.* Patent USA no. 9927319B2, 2018.

11. Nanse, Kirk. *Aircraft weight and center of gravity indicator.* Patent USA no. 5214586A, 1993.

12. Long, Michael A., & Gouette, Geoffrey E. *Onboard aircraft weight and balance system.* Patent USA no. 8340892B2, 2012.

13. Akhmetshin, R. M., Oshchepkov, N. M., Kuznetsov, O. G., Petrov, P. G., & Kruzhkov, V. N. *Sposob opredeleniya vzletnoi massy i tsentrovki letatel'nogo apparata* [Method for determining the takeoff weight and centering of the aircraft]. Patent RF no. 2172475C1, 2001.

14. Kolasa, B., Ulanowicz, L., & Szczepaniak, P. *System for determination of weight and position of centre of an aircraft mass.* Patent Poland no. 230085B1, 2018.

15. Cherepashchuk, H. O., Potyl'chak, O. P., & Kalashnikov, Ye. Ye. *Prystriy dlya vyznachennya vahy ta polozhennya tsentra vahy lital'noho aparata* [A device for determining the weight and position of the center of gravity of an aircraft]. Patent Ukraine no. 130399, 2018.

16. Cherepashchuk, H. O., & Marenych, M. V. *Datchyk liniynoho peremishchennya* [Linear displacement sensor]. Patent Ukraine no. 61304, 2011.

17. Bateman, Charles D. *Aircraft weight measuring system.* Patent Canada no. 1166276A, 1984.

Надійшла до редакції 15.08.2025, розглянута на редколегії 22.09.2025.

RESEARCH OF METHODS AND DEVICES FOR WEIGHT DETERMINATION AND THE AIRCRAFT'S CENTER OF GRAVITY POSITION

Grygorii Cherepashchuk, Oleksii Potylchak, Stanislav Klimov

The **subject matter** of the article is the process of weighing and determining the aircraft's center of gravity position. The **goal** of this study is to develop research methods and devices for determining the weight and the center of gravity position of aircraft. The **tasks** to be solved are as follows: formulation of requirements to be imposed on the relevant methods and devices; classification of methods and devices; identification of main groups and subgroups

according to certain criteria; description and research of representatives of the identified groups and subgroups; comparison of the methods and devices considered; selection of the most promising method for further development; setting the main tasks for the creation of practically implemented devices for determining the weight and the center of gravity position of aircraft. The following **results** were obtained: the basic requirements for methods and devices for determining the weight and position of the center of gravity of an aircraft are formulated, namely, ensuring the necessary accuracy, efficiency, ease of use, integration into aircraft onboard systems, and economic feasibility. Known methods and devices are considered, and the main groups and subgroups are identified according to certain characteristics. The following subgroups are identified: based on measuring the components of the aircraft's weight using force sensors; based on measuring the pressure in the landing gear shock struts; based on using sensors to measure the stroke of the shock strut cylinders; and based on measuring the bend of aircraft structural elements. The characteristics of the main representatives of the identified subgroups are analyzed according to the physical principles used. The considered methods and devices were compared according to a number of key indicators (i.e., accuracy of weight and center of gravity determination, complexity of technical implementation, complexity of integration into aircraft onboard systems, implementation cost, and reliability of operation). **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained lies in the fact that integral efficiency indicators were calculated for each of the methods based on the analysis of the most important indicators of the methods and means considered. As a result, the most promising methods and devices for further development were selected based on the measurement of the stroke of the shock strut cylinders. The main tasks for further research were defined as follows: development of a methodology for obtaining the static transformation characteristics of cylinders; development of design solutions for the construction of an aircraft weighing and balancing system based on the selected method; improvement of algorithms for calculating the weight and position of the aircraft's center of gravity based on the measurements obtained from optical sensors; development of issues related to the metrological assurance of the aircraft weighing and balancing system.

Keywords: aircraft; weight; center of gravity position; shock strut; landing gear.

Черепашук Григорій Олександрович – канд. техн. наук, доц., проф. каф. інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Потильчак Олексій Петрович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Клімов Станіслав Васильович – гол. конструктор ТОВ "Інженерне бюро Авіаційного інституту", Харків, Україна.

Grygorii Cherepashchuk – Candidate of Sciences (Engineering), Professor at the Department of Intelligent Measuring Systems and Quality Engineering, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: cherepashchuk@bigmir.net, ORCID: 0000-0002-2983-4055.

Oleksii Potylchak – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor at the Department of Intelligent Measuring Systems and Quality Engineering, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.potylchak@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5729-7429, Scopus Author ID: 57222090890.

Stanislav Klimov – Chief Designer, Engineering Bureau of Aviation Institute, Ltd., Kharkiv, Ukraine,
e-mail: stasklimov@ukr.net, ORCID: 0009-0002-8758-8160.