

УДК 656.71.053.7(045)

К.І. Кажан, асп.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕНТРОПІЙНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ ЗА ШУМОМ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ В АЕРОПОРТАХ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

Запропоновано метод оптимізації експлуатації повітряних кораблів в околицях аеропортів цивільної авіації з урахуванням шумових обмежень. Розроблений метод дозволяє збільшувати акустичну ємність аеропортів цивільної авіації під час експлуатації змішаного парку повітряних кораблів та визначати необхідність застосування експлуатаційних методів зниження авіаційного шуму.

The aircraft operation optimization method in the area around civil aviation airport was proposed taking into account noise limits. The developed method allows increasing acoustical capacity of the civil aviation airports during operation of mixed fleet and to determinate the necessity of the noise abatement procedures.

Вступ

У зв'язку зі збільшенням обсягів перевезень цивільної авіації на 4–5% щорічно посилюється тиск на довкілля як на локальному, так і на глобальному рівнях.

Дослідження свідчать, що близько 50 аеропортів світу вже відчувають екологічні обмеження. При цьому 58% із них визначають зниження шуму як основний обмежувальний фактор [1].

З метою забезпечення сталого розвитку аеропортів та виконання екологічних нормативів в околицях аеропортів цивільної авіації в роботі розроблено та реалізовано модель екологічної ємності аеропорту.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблемі екологічної ємності та розробленню концепції сталого розвитку аеропортів присвячено останні публікації європейських та вітчизняних фахівців [2–6]. Так, у праці [2] подано схему загальної ємності аеропорту, запропоновано методи довгострокового та короткострокового прогнозування акустичного навантаження в околицях аеропортів.

Формуванню концепції екологічної ємності присвячено праці [3; 4].

Дослідження засвідчили, що до факторів, які впливають на екологічну ємність на локальному рівні, належать:

- акустичне забруднення;
- хімічне забруднення повітря, водойм та ґрунтів;
- інші види енергетичного впливу.

На глобальному рівні на екологічну ємність впливають:

- викиди парникових газів;
- діяльність, що призводить до руйнування озонового шару [1; 5].

Питання оптимізації режимів експлуатації повітряних кораблів (ПК) в околицях аеропорту з урахуванням акустичних параметрів досліджуються у працях [2; 6].

Проте в працях [2; 6] недостатня увага приділяється питанням визначення акустичної ємності окремих аеропортів та механізмів її регулювання, а також оцінюванню впливу експлуатаційних факторів на акустичну ємність.

Саме тому метою дослідження стало розроблення методу вибору оптимальних режимів експлуатації ПК в околицях аеропортів цивільної авіації.

Вибір оптимальних режимів експлуатації повітряних кораблів з дотриманням нормативних рівнів шуму

Акустичну ємність аеропорту зазвичай визначають як максимальну кількість ПК, що експлуатуються в аеропорту протягом певного періоду часу за умови дотримання нормативних вимог щодо рівнів шуму [2–4].

Згідно з національним законодавством [7] рівні шуму в околицях аеропорту контролюють за двома критеріями:

- максимальним рівнем шуму від ПК $L_{A \max}$;
- значенням еквівалентного рівня шуму L_{Aeq} для денного та нічного періодів.

Критерій L_{Aeq} містить оцінку сумарного часу впливу парку ПК, тобто він урахує інтенсивність руху ПК в аеропорту.

Розрахунок значень L_{Aeq} у досліджуваних точках координатної сітки виконують за формулою

$$L_{Aeq} = 10 \lg \left[\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N (10^{0,1 \cdot L_{Ai}}) \right], \quad (1)$$

де T_0 – регламентований інтервал часу (57 600 с для денного та 28 800 с для нічного періодів);

N – кількість польотів за період T_0 ;

L_{Ai} – еквівалентний рівень шуму під час прольоту i -го типу ПК.

Розглянемо математичне формулювання цієї проблеми.

Припустімо, що для певного аеропорту існуючий розподіл ПК за маршрутами створює понаднормові рівні шуму у визначених зонах.

Необхідним є зниження рівнів шуму до нормативів у критичних зонах через перерозподілу ПК за маршрутами, а також розроблення рекомендацій щодо доцільності застосування експлуатаційних процедур зниження авіаційного шуму в околицях аеропорту.

Для вирішення цього завдання існує кілька підходів.

Позначимо через T_{ij}^k – кількість ПК i -го типу, які застосовуються на j -му маршруті з використанням k -го експлуатаційного прийому зниження шуму із врахуванням нормативних рівнів шуму L_{Aeq}^l у зоні l .

На T_{ij}^k накладаються такі обмеження [8]:

$$\begin{aligned} \sum_j \sum_k T_{ij}^k &= Q_i, \\ \sum_i \sum_k T_{ij}^k &= D_j, \end{aligned} \quad (2)$$

де Q_i – кількість ПК i -го типу, що експлуатуються;

D_j – кількість ПК усіх типів, що використовують j -й маршрут.

Співвідношення (1) з урахуванням заданих початкових умов (2) запишемо у вигляді

$$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k 10^{0,1L_{Aij}^{kl}} = T_0 10^{0,1L_{Aeq}^l} \quad (3)$$

або

$$\begin{aligned} \sum_{i,j,k} T_{ij}^k P_{ij}^{kl} &= 1; \\ P_{ij}^{kl} &= \frac{1}{T_0} 10^{0,1L_{Aij}^{kl} - 0,1L_{Aeq}^l}, \end{aligned}$$

де L_{Aij}^{kl} – рівень шуму в l -й зоні від ПК i -го типу, що рухається за j -м маршрутом із застосуванням k -го експлуатаційного методу зниження шуму;

L_{Aeq}^l – нормативний еквівалентний рівень шуму в зоні l .

При цьому аеропорт розглядаємо як складну систему, що функціонує і розвивається за дотримання низки обмежень, в т. ч. й щодо шуму. Тому найвірогідніший розподіл ПК за маршрутами визначатимемо з умови екстремуму ентропії системи.

Необхідно визначити матрицю T_{ij}^k , за якої існує найбільша кількість $W(T_{ij}^k)$, що знаходять за обмежень (3).

Найбільшу кількість станів $W(T_{ij}^k)$ визначаємо у вигляді [9]:

$$W(T_{ij}^k) = \frac{T!}{\prod_{i,j,k} T_{ij}^k!},$$

$$T = \sum_{i,j,k} T_{ij}^k.$$

Найбільш вірогідним виразом для матриці T_{ij}^k

буде величина, що максимізує ентропію системи:

$$\ln W(T_{ij}^k) = \ln T! - \sum_{i,j,k} \ln T_{ij}^k! \quad (4)$$

Для визначення T_{ij}^k складаємо лагранжیان:

$$\begin{aligned} L &= \ln W(T_{ij}^k) + \sum_i \lambda_i^{(1)} (Q_i - \sum_{j,k} T_{ij}^k) + \\ &+ \sum_j \lambda_j^{(2)} (D_j - \sum_{i,k} T_{ij}^k) + \sum_l \beta_l (1 - \sum_{i,j,k} T_{ij}^k P_{ij}^{kl}). \end{aligned} \quad (5)$$

Застосовуючи формулу Стірлінга, яка справедлива для великих значень T_{ij}^k , використовуємо

наближене значення $\ln W(T_{ij}^k)$:

$$\ln W(T_{ij}^k)! \approx T_{ij}^k \ln T_{ij}^k - T_{ij}^k,$$

тому вираз (4) можна записати у вигляді:

$$\ln W(T_{ij}^k) \approx - \sum_{i,j,k} T_{ij}^k \ln T_{ij}^k.$$

Значення матриці T_{ij}^k , що забезпечує максимум лагранжіана (5), можна отримати із системи рівнянь:

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}^k} = 0. \quad (6)$$

З урахуванням обмежень (3) розв'язання системи рівнянь (6) можна записати так [10]:

$$T_{ij}^k = A_i B_j Q_i D_j \exp\left(-\sum_l \beta_l P_{ij}^{kl}\right), \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} A_i &= \left[\sum_{k,j} B_j D_j \exp\left(-\sum_l \beta_l P_{ij}^{kl}\right) \right]^{-1}; \\ B_j &= \left[\sum_{k,i} A_i \cdot Q_i \cdot \exp\left(-\sum_l \beta_l \cdot P_{ij}^{kl}\right) \right]^{-1}. \end{aligned}$$

За формулою (7) здійснюється ітераційний розрахунок T_{ij}^k до того моменту, доки не будуть досягнуті оптимальні контури шуму.

Алгоритм цього методу було реалізовано для спрощеної експлуатаційної ситуації в окремій зоні.

Припускаємо, що в міжнародному аеропорту цивільної авіації експлуатуються ПК двох типів B737-300 та A320, які для етапу набору висоти використовують такі маршрути: V11, V12, V13, V14, V15.

У точці $l=1$ потрібно знизити еквівалентний рівень L_{Aeq}^1 шуму з 42 до 40 дБА за інтенсивності польотів – 200 за денний період (з 7.00 до 23.00). Вихідний розподіл ПК за маршрутами рівномірний (по 20 ПК на маршруті).

Експлуатаційні процедури зниження шуму в цьому випадку не використовуються.

Результати розв'язання цієї задачі для коефіцієнта Лагранжа $\beta = 632$ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Оптимізований розподіл ПК за маршрутами

Тип ПК, i	Кількість ПК T_{ij} на маршруті j					Q_i
	V11	V12	V13	V14	V15	
$l = 1$						
B737-300, 1	4	3	31	31	31	100
A320, 2	36	37	9	9	9	100
D_j	40	40	40	40	40	200
$l = 4$						
B737-300, 1	15	18	17	25	25	100
A320, 2	17	19	17	23	23	100

Відносна точність розрахунків становила 0,001, коефіцієнт Лагранжа було визначено на 631-му кроці ітераційних розрахунків, оптимального розподілу було досягнуто на 4-й ітерації.

Надалі розрахунками встановлено, що для інтервалу $632 \leq \beta \leq 6349$ для цієї задачі також досягається потрібне зниження еквівалентного рівня шуму L_{Aeq}^1 .

Тому для остаточного вибору розв'язання можна використовувати додаткові обмеження:

- експлуатаційні, наприклад, мінімальну чи максимальну кількість ПК на кожному маршруті;
- акустичні (рівні максимального шуму L_{Amax} на маршруті);
- емісійні;
- економії палива.

Специфіка такого методу полягає в існуванні кількох розв'язків, що дозволяє врахувати не лише екологічні, але й експлуатаційні та економічні фактори.

До недоліків методу належить пошук оптимальних значень коефіцієнтів та множників Лагранжа, від яких залежить розподіл ПК за маршрутами.

Метод потребує високої точності розрахунків, що за великої кількості ітерацій значно збільшує час розрахунків та ускладнює його застосування для вирішення реальних експлуатаційних ситуацій. Розроблено більш універсальний метод для вирішення поставленої проблеми.

Припустимо, що відома нормована частота використання парку ПК:

$$v_{ij} = Ca_i b_j;$$

$$\sum_{i,j} v_{ij} = 1,$$

де C – нормована константа;

a_i – апіорна оцінка частоти використання ПК i -го типу протягом певного періоду;

b_j – частота використання j -го маршруту, що визначається з аналізу вітрового режиму аеропорту.

При цьому ентропію системи, що розглядається, можна подати у вигляді:

$$S = \ln\left(\frac{T!}{\prod_{i,j,k} T_{ij}^k \prod_{i,j,k} v_{ij}^{T_{ij}^k}}\right);$$

$$\sum_{i,j} v_{ij} = 1,$$

то, враховуючи співвідношення (2)–(7), отримуємо умовний екстремум ентропії у вигляді

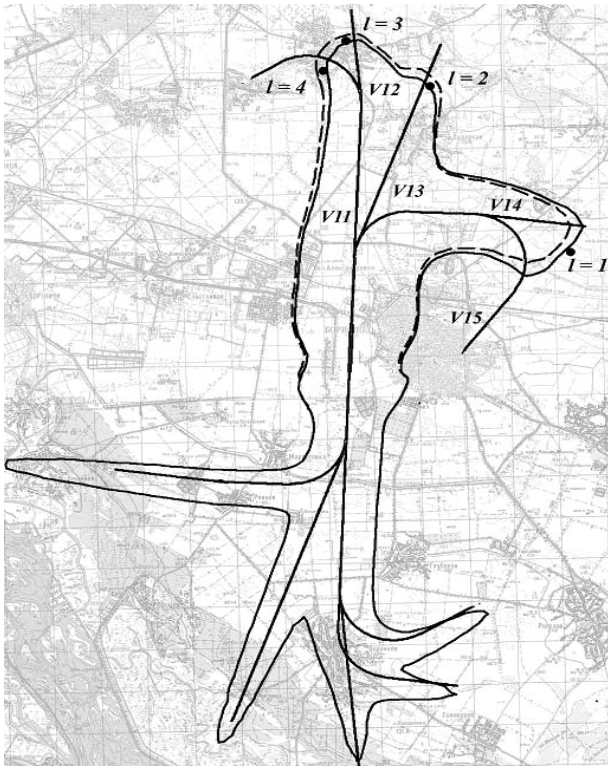
$$T_{ij}^k = \frac{v_{ij} C_i \exp(-\sum_l \beta_l P_{ij}^{kl})}{\sum_i v_{ij} \exp(-\sum_l \beta_l P_{ij}^{kl})}. \tag{8}$$

Значення v_{ij} обираються за допомогою апіорних оцінок. У найпростішому прикладі $v_{ij} = \text{const}$ користуються гіпотезою про відсутність переваги вибору i -м типом ПК j -го маршруту.

Якщо в центрі зони l , що розглядається, максимальні рівні шуму L_{Aij}^{kl} перевищують нормативні рівні для i -го типу ПК, що рухається j -м маршрутом, беремо $v_{ij} = 0$, що унеможливує використання цього типу ПК на критичному маршруті.

Алгоритм пошуку оптимального розподілу реалізуємо для етапу набору висоти на тестовому прикладі ситуації в міжнародному аеропорту цивільної авіації, за якої експлуатуються два типи ПК ($i = 2$) з рівномірним їх розподілом за маршрутами ($j = 5$) удень (з 7.00 до 23.00).

Вихідні дані щодо розподілу ПК за маршрутами не змінилися (на маршруті 20 ПК кожного типу). Нормовану частоту використання парку ПК вважаємо постійною величиною: $v_{ij} = 0,5$. При цьому в трьох із чотирьох досліджуваних зонах ($l = 4$) необхідним є зниження еквівалентного рівня шуму до 40 дБА (див. рисунок).



Контур шуму 40 дБА етапу набору висоти:
 - - - - для вихідного варіанта розподілу ПК;
 ————— оптимізований варіант розподілу ПК

Результати ітераційного пошуку найбільш імовірного розв'язання співвідношень (2), (3), (8) наведено в табл. 1.

Відносна точність розрахунків становила 0,001, коефіцієнти Лагранжа та оптимальний розподіл були визначені на 280-му кроці ітераційних розрахунків.

Як бачимо, досягнення необхідного рівня шуму, стає можливим, якщо

$$\beta_1 = \beta_3 = 1, \beta_2 = 14, \beta_4 = 20.$$

Контури еквівалентного рівня шуму 40 дБА за оптимізованого розподілу показано на рисунку суцільною лінією. З рисунка видно, що в критичних зонах $l = 1 \dots 4$ нормативні вимоги виконуються.

Еквівалентні рівні шуму в цих зонах становлять 39,7; 40,0; 39,8 та 40,0 дБА відповідно.

Наведений розподіл ПК за маршрутами не єдиний, що задовольняє умови (3) та (8). Подальшим розрахунком можна виявити, що умови задовольняються в діапазонах: $1 \leq \beta_1, \beta_3 \leq 1000$; $14 \leq \beta_2 \leq 995$; $20 \leq \beta_4 \leq 643$.

Тому для вибору остаточного розв'язку можна використати додаткові умови. Такою умовою може стати введення експлуатаційних обмежень для досліджуваної ситуації на рівні $D_1 \leq 20$. Це спричинить зміни в розподілі ПК, які відображено в табл. 2.

Таблиця 2

Оптимізований розподіл ПК за маршрутами $l = 4$ з урахуванням експлуатаційних обмежень

Тип ПК, i	Кількість ПК T_{ij} на маршруті j					Q_i
	V11	V12	V13	V14	V15	
B737-300, 1	9	13	18	30	30	100
A320, 2	11	17	18	27	27	100
D_j	20	30	36	57	57	—

Обмеження $D_1 \leq 20$ було введено в розрахунки за допомогою параметра:

$$\sum_i v_{i1} = 0,5.$$

Еквівалентні рівні шуму в досліджуваних зонах $l = 1 \dots 4$ становлять 40,0; 40,0; 38,6 та 38,5 дБА відповідно.

Аналогічно можна скористатися параметром v_{ij} для встановлення обмежень щодо максимального рівня шуму.

Розрахунки показують, що для досліджуваної експлуатаційної ситуації існує перевищення нормативного рівня максимального шуму в точці $l = 1$ у разі прольоту ПК B737-300 ($i = 1$) за маршрутом V11 ($j = 1$).

Тому скоригований розподіл ПК з урахуванням акустичного обмеження буде таким, як наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Оптимізований розподіл ПК за маршрутами $l = 4$ з дотриманням максимальних рівнів шуму

Тип ПК, i	Кількість ПК T_{ij} на маршруті j					Q_i
	V11	V12	V13	V14	V15	
B737-300, 1	0	14	20	33	33	100
A320, 2	11	17	18	27	27	100

Запропонований метод не потребує розрахунку множників Лагранжа, що значно зменшує похибку розрахунків.

Перевагою методу є також можливість вилучення з розрахунків маршрутів та ПК, що перевищують максимальні рівні шуму в критичних зонах, установлення додаткових експлуатаційних та екологічних обмежень.

Запропонований метод визначення найбільш вірогідного розподілу ПК за маршрутами прильоту-відльоту може бути застосований під час складання плану польотів ПК для конкретного аеропорту на певний період.

Висновки

У сучасних умовах експлуатаційна ємність аеропортів цивільної авіації часто обмежується екологічними вимогами, зокрема акустичною ємністю. Для вирішення цієї проблеми є чимало методів.

У цій роботі запропоновано ентропійний метод та реалізовано наведений алгоритм розрахунків. Метод дозволяє розширювати акустичну ємність аеропортів цивільної авіації із застосуванням основних положень збалансованого підходу ІКАО:

- зонування околиць аеропортів;
- застосування експлуатаційних методів пілотування;
- обмеження експлуатації шумних ПК.

Особливістю запропонованого методу є можливість урахувати не лише акустичні, але й експлуатаційні та економічні параметри, що значно розширює межі його використання.

Література

1. Коновалова О.В. Особливості проектування аеропорту з урахуванням екологічних критеріїв за шумом // Вісн. НАУ. – 2004. – №3. – С. 148 – 153.
2. Zaporozhets O., Tokarev V. Methods for short-term and long-term forecasting of aircraft noise impact around the airports // Proc. the 33rd Intern. Congr. and Exposition on Noise Control Engineering “Inter-noise 2004”. – Prague, 22-25 of Aug., 2004. – P. 1-4.
3. Callum Th. Environmental capacity of airports – what does it mean? // Workshop Proc. 2, Environmental Capacity. The challenge for the aircraft industry. Heathrow airport. – 2000. – Jun. – P. 9–11.
4. Janic M. An analyses of the concepts of airport sustainable capacity and development // Proc. the 1st intern. conf. “Environmental capacity of airports”. – The Manchester Metropolitan University, 2-3 of Apr., 2001. – P. 1–20.
5. Кажан К.І. Дослідження впливу екологічної ємності аеропорту на перспективу його розвитку // Вісн. НАУ. – 2005. – №3. – С. 177–181.
6. Токарев В.И., Запорожец А.И., Страхолец В.А. Снижение шума при эксплуатации пассажирских самолетов. – К.: Техніка, 1990. – 127 с.
7. Правила визначення зон обмеження житлової забудови навколо аеропортів із умов впливу авіаційного шуму: МОЗ № 5.02.28/В-347, 21.07.1997. // www.moz.gov.ua/ua/main/docs/?/docID=10546.
8. Janic M. Modeling operational, economic and environmental performance of an air transport network // Transportation Research. – 2003. – Part. 8. – P. 415 – 432.
9. Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 248 с.
10. Запорожець О.І., Коновалова О.В. Визначення алгоритмів обґрунтування пропускної здатності аеропорту з обмеженнями по авіаційному шуму // Вісн. НАУ. – 2005. – №5. – С. 148 – 153.

Стаття надійшла до редакції 05.09.07.