

Методика побудови формалізованої залежності часу підготовки до повторного вильоту груп літаків від кількісно-якісного складу інженерно-авіаційної служби авіаційного підрозділу

A methodology for constructing a formalised dependence of the time of preparation for the re-flight of groups of aircraft on the quantitative and qualitative composition of the aviation engineering service of an aviation unit

Олексій Леонтьєв ^A

Corresponding author: д.т.н., проф., головний науковий співробітник, e-mail: alexey1008_2009@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4003-7759

Юрій Тригуб ^A

ад'юнкт, e-mail: triguburii31@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6785-0286

Oleksii Leontiev ^A

Corresponding author: Dr of Technical Sciences, Professor, Chief Scientist, e-mail: alexey1008_2009@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4003-7759

Yuriy Trigub ^A

Doctoral Student, e-mail: triguburii31@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6785-0286

^A Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна

^A Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

Received: July 26, 2024 | Revised: August 15, 2024 | Accepted: August 31, 2024

DOI: 10.33445/sds.2024.14.4.19

Мета роботи: розробка методики побудови формалізованої залежності часу підготовки до повторного вильоту групи літаків від кількісно-якісного складу інженерно-авіаційної служби авіаційного підрозділу на основі використання результатів параметричних досліджень на засобах імітаційного моделювання процесу технічного обслуговування.

Метод: аналіз та синтез, імітаційне моделювання, регресійний аналіз.

Результати дослідження: розроблені математичні моделі дозволяють оперативно оцінювати необхідний час підготовки до повторного вильоту груп літаків залежно від кількісно-якісного складу інженерно-авіаційної служби, що залучається до технічного обслуговування літаків. Ці моделі забезпечують можливість оптимізації процесів підготовки до польотів, що є критично важливим в умовах сучасних бойових операцій.

Теоретична цінність дослідження: дослідження сприяло подальшому розвитку теорій імітаційного моделювання та системного аналізу в контексті організації інженерно-авіаційного забезпечення авіаційних підрозділів, підтверджуючи значення інтеграції цих підходів для підвищення ефективності авіаційних підрозділів. Робота підкреслює важливість гнучкого підходу до управління наявними людськими ресурсами в умовах змінних оперативних обставин.

Практична цінність дослідження: результати дослідження можуть використовуватись для оптимізації організаційно-штатної структури інженерно-авіаційної служби з метою ефективного розподілу персоналу для забезпечення підготовки групи літаків до повторного вильоту за регламентований заданий час. Особливо цінною є можливість застосування розроблених моделей для різних типів авіаційних підрозділів та умов базування.

Цінність дослідження: цінність дослідження полягає в інтеграції імітаційного моделювання та аналізу результатів параметричних досліджень з реальними умовами експлуатації авіаційної техніки, що веде до розробки більш

Purpose: development of a methodology for constructing a formalised dependence of the time of preparation for the re-flight of a group of aircraft on the quantitative and qualitative composition of the aviation engineering service of an aviation unit based on the use of the results of parametric studies on the means of simulation modelling of the maintenance process.

Method: analysis and synthesis, simulation modelling, regression analysis.

Findings: the developed mathematical models allow to quickly estimate the required time for preparation for the re-flight of aircraft groups depending on the quantitative and qualitative composition of the aviation engineering service involved in aircraft maintenance. These models provide an opportunity to optimize flight preparation processes, which is critical in the context of modern combat operations.

Theoretical implications: the research has contributed to the further development of the theories of simulation modelling and system analysis in the context of organizing aviation engineering support for aviation units, confirming the importance of integrating these approaches to improve the efficiency of aviation units. The work emphasizes the importance of a flexible approach to managing available human resources in the face of changing operational circumstances.

Practical implications: the results of the research can be used to optimize the organizational and staffing structure of the aviation engineering service in order to effectively allocate personnel to ensure the preparation of a group of aircraft for re-flight within a regulated specified time. Particularly valuable is the possibility of applying the developed models to different types of aviation units and basing conditions.

Value: the value of the research lies in the integration of simulation modelling and analysis of the results of parametric studies with the real conditions of aircraft operation, which leads to

точних і адаптивних методик для планування інженерно-авіаційного забезпечення. Важливість роботи визначається її внеском у забезпечення більшої оперативності та ефективності управлінських рішень щодо планування інженерно-авіаційного забезпечення в умовах сучасних бойових дій.

Майбутні дослідження: розроблена методика побудови формалізованої залежності часу підготовки до повторного вильоту груп літаків від кількісно-якісного складу інженерно-авіаційної служби створює передумови для розробки удосконаленої методики синтезу раціональної організаційної структури інженерно-авіаційної служби авіаційних підрозділів на основі постановки та розв'язування математичної задачі оптимізації.

Тип статті: теоретичний, практичний.

the development of more accurate and adaptive methods for planning engineering and aviation support. The importance of the work is determined by its contribution to ensuring greater efficiency and effectiveness of management decisions on planning engineering and aviation support in the context of modern warfare.

Future research: the methodology developed for constructing a formalized dependence of the time of preparation for the re-flight of groups of aircraft on the quantitative and qualitative composition of the engineering and aviation service creates prerequisites for developing an improved methodology for synthesizing the rational organizational structure of the engineering and aviation service of aviation units based on the formulation and solution of a mathematical optimization problem.

Papertype: theoretical, practical.

Ключові слова: імітаційне моделювання, група літаків, інженерно-авіаційна служба, критерії, метод найменших квадратів, модель, організаційно-штатна структура, технічне обслуговування, підготовка до польотів, час підготовки.

Key words: simulation modelling, group of aircraft, aviation engineering service, criteria, least squares method, model, organizational structure, maintenance, flight preparation, preparation time.

Вступ

Набутий в ході відсічі збройної агресії РФ проти України досвід застосування тактичної авіації Повітряних Сил свідчить про суттєвий розвиток способів її бойового застосування. В першу чергу, зросла роль здійснення маневру силами тактичної авіації по оперативних аеродромах, як авіаційними підрозділами, так й їх частками (ланками, або шістками літаків, що базуються в різних місцях). Це, у свою чергу, обумовило необхідність перегляду підходів до побудови організаційно-штатної структури інженерно-авіаційної служби (ІАС) авіаційних підрозділів, пошуку шляхів удосконалення організації виконання робіт з технічного обслуговування літаків в ході їх підготовки до польоту, й, в першу чергу – підготовки до повторного вильоту. В цьому зв'язку, актуальним є розробка методів синтезу раціональної організаційно-штатної структури ІАС авіаційного підрозділу, здатних оперативно визначати кількісно-якісний склад фахівців ІАС, що необхідно залучати для своєчасної підготовки до вильоту декількох груп літаків зі складу авіаційного підрозділу на декількох оперативних аеродромах водночас. Це дослідження є важливим, оскільки воно безпосередньо впливає на здатність ефективно організовувати та здійснювати всі види підготовки повітряних суден до застосування в задані строки (спроможність S-4.3.1 “Організація інженерно-авіаційного забезпечення”) [1].

Теоретичні основи дослідження

Традиційно задача синтезу раціональної структури ІАС авіаційного підрозділу вирішується шляхом проведення параметричних досліджень експериментальними методами. Для цього генеруються альтернативні варіанти побудови структури ІАС (кількісно-якісного складу) та за допомогою хронометражу для кожного варіанту визначається час підготовки літаків до вильоту, а в якості раціонального варіанту, обирається той, для якого час виконання всіх операцій з технічного обслуговування буде або найменшим, або таким, що не перевищує заданий час на підготовку до повторного вильоту [1-8].

Так, наприклад, в роботах [4-6] для обрання раціонального варіанту організаційно-штатної структури ІАС авіаційного підрозділу обґрунтовано вибір критерію наступного виду:

$$\begin{cases} T_{\text{підг}iN_{\text{ЛА}}} \leq T_{\text{підг}i\text{зад}} N_{\text{ЛА}}, \forall i; \\ S \rightarrow \min \end{cases} \quad (1)$$

де $T_{\text{підг}iN_{\text{ЛА}}}$ – мінімально необхідний час підготовки групи літаків для виконання одночасної підготовки до вильоту заданої групи літальних апаратів $N_{\text{ЛА}}$, хв.;

- $T_{\text{підгізад } N_{\text{ЛА}}}$ – заданий (регламентований) час підготовки групи літаків до вильоту заданої групи літальних апаратів $N_{\text{ЛА}}$, хв.;
- S – узагальнений обсяг витрат ресурсів.

Даний критерій (1) описує випадок такої раціонально побудованої ОШС ІАС авіаційного підрозділу, коли підготовка заданої групи літаків до вильоту займає час не більший ніж заданий (регламентований). При цьому витрати ресурсів є мінімальні.

Під ресурсами слід розуміти витрати на утримання певної кількості фахівців ІАС, необхідних на виконання заходів з підготовки групи літаків до вильоту. Обсяг цих витрат буде залежати від варіанту організаційно-штатної структури ІАС тобто кількості інженерно-технічного складу різних категорій та спеціальностей задіяних в підготовці літаків до вильоту.

Витрати на утримання кожної штатно-посадової категорії фахівців ІАС авіаційного підрозділу можливо розрахувати маючи тарифні розряди даних фахівців відповідно до встановлених нормативів та стандартів оплати праці. Це дозволяє об'єктивно оцінити загальні витрати на утримання раціонально побудованої ОШС ІАС авіаційного підрозділу.

Час підготовки групи літаків до вильоту відіграє вирішальну роль у синтезі раціональної структури ОШС ІАС авіаційного підрозділу оскільки безпосередньо впливає на оперативність інженерно-авіаційного забезпечення.

Окрім зазначеного вище методу експериментального визначення часу виконання всіх необхідних операцій з технічного обслуговування групи літаків, на сьогоднішній день існує методичний підхід, який базується на використанні імітаційної моделі технологічного процесу для визначення часу підготовки груп літаків до польоту в залежності від кількісно-якісного складу ОШС ІАС [5]. Але для розрахунку часу підготовки групи літаків, імітаційне моделювання вимагає множинного повторення числових експериментів із різними вихідними даними для аналізу системи і вибору оптимального рішення стосовно виділення інженерно-технічного складу та організації технічного обслуговування. До того ж використання існуючих методів імітаційного моделювання потребує залучення висококваліфікованих фахівців для розробки та застосування імітаційної моделі, що робить такий методичний підхід занадто громіздким та незручним для застосування в умовах бойового застосування авіаційних підрозділів, вимагає великих витрат часу та негативно впливає на оперативність відпрацювання рішення керівним складом ІАС.

Постановка проблеми

Усунути названі недоліки можливо шляхом завчасного проведення параметричних досліджень за допомогою імітаційної моделі процесу технічного обслуговування груп літаків конкретного типу при різних варіаціях кількісно-якісного складу ІАС авіаційного підрозділу з наступною побудовою апроксимуючих наближених математичних моделей, що мають відносно просту форму зв'язку часу підготовки групи літаків до вильоту з параметрами кількісно-якісного складу фахівців ІАС, наприклад, у вигляді поліномів. Наявність таких залежностей дозволить керівному складу ІАС оперативно здійснювати розрахунки та визначати раціональний склад фахівців ІАС, необхідний для забезпечення заданого часу проведення всього комплексу робіт з технічного обслуговування групи літаків в залежності від чисельності такої групи.

Таким чином, **метою статті** є розробка методики побудови формалізованої залежності часу підготовки до повторного вильоту групи літаків від кількісно-якісного складу інженерно-авіаційної служби авіаційного підрозділу на основі використання результатів параметричних досліджень на засобах імітаційного моделювання процесу технічного обслуговування.

Методологія дослідження

Основною метою застосування даної методики, що розглядається в статті, є побудова математичних моделей залежності часу підготовки до польоту групи літаків одного типу конкретної чисельності $N_{\text{ЛА}_i}$ від кількісно-якісного складу фахівців ІАС, що залучається до виконання всіх визначених технологічних операцій технічного обслуговування повітряного судна:

$$T_{\text{підг}_i} = f(n_1; n_2; \dots; n_m) \quad (2)$$

де $n_1; n_2; \dots; n_m$ – кількість фахівців ІАС за спеціальностями $1, \dots, m$.

Першим етапом запропонованої методики є часткова методика побудови імітаційної моделі технологічного процесу одночасної підготовки заданого числа ЛА до вильоту на основі часової мережі Петрі. Блок-схема даної часткової методики представлена на рисунку 1.

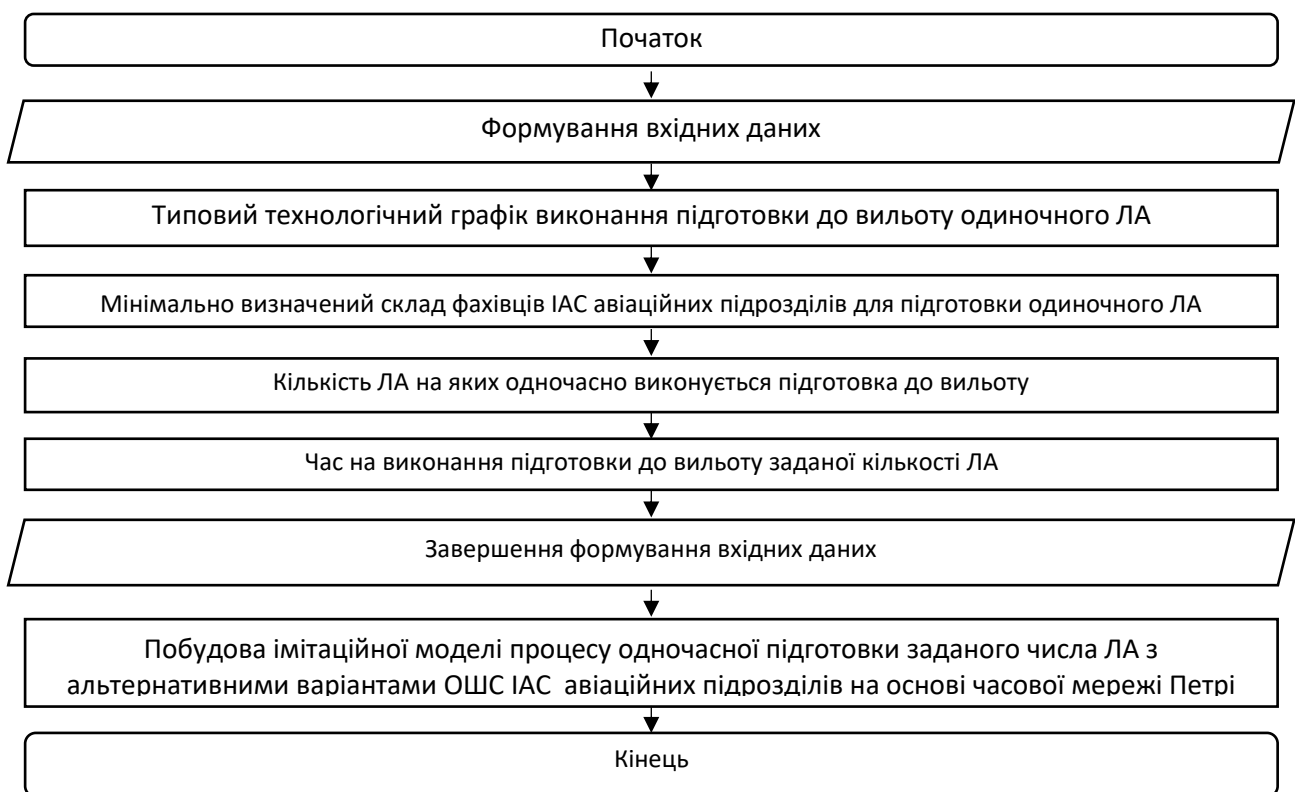


Рисунок 1 – Блок-схема часткової методики побудови імітаційної моделі процесу одночасної підготовки заданого числа ЛА до вильоту з альтернативними варіантами ОШС ІАС авіаційних підрозділів на основі часової мережі Петрі

Джерело: розроблено авторами за даними [5, С. 40]

Основними вихідними даними для часткової методики є визначена розробником типу повітряного судна та погоджена з експлуатантом технічна експлуатаційна документація, в якій міститься призначена стратегія експлуатації та перелік робіт з технічного обслуговування кожного виробу авіаційної техніки даного типу, в тому числі – перелік робіт з технічного обслуговування при підготовці до польоту. В названій експлуатаційній документації визначається кількісний склад фахівців ІАС за кожною спеціальністю та рівнем кваліфікації, який повинен бути залученим для виконання конкретних операцій з технічного обслуговування одного повітряного судна.

Також до складу вихідних даних належить визначені за досвідом бойового застосування тактичної авіації варіанти кількості літаків даного типу $N_{\text{ЛА}_i}$, що потребують одночасного технічного обслуговування на оперативному аеродромі, тобто у відриві від основного місця базування авіаційного підрозділу.

Після формування вихідних даних на першому етапі часткової методики проводиться детальний аналіз технологічного графіка підготовки до вильоту одиночного літального апарату. На основі проведеного аналізу для кожного варіанту кількості літаків, що потребують одночасного технічного обслуговування, генеруються варіанти кількісно-якісного складу фахівців ІАС авіаційного підрозділу, яких необхідно залучити для виконання всього обсягу необхідних операцій на кожному повітряному судні.

Наступний крок методики передбачає розробку імітаційних моделей технологічного процесу для кожного альтернативного варіанту кількісно-якісного складу фахівців ІАС за допомогою часових мереж Петрі для моделювання процесу підготовки кожної заданої кількості літальних апаратів $N_{\text{ЛА}_i}$.

В основі побудови часової мережі Петрі покладено використання чотирьох основних базових елементів:

- позиції – стани, в яких знаходиться система або її частини, що відповідають умовам виникнення подій;

- переходи – відповідають подіям системи. Характеризуються кількістю вхідних і вихідних позицій, які відображають передумови та післяумови події;

- дуги – напрямлені з'єднання між переходами та позиціями;

- маркери – виконання умов у позиціях. Розташування маркерів визначає розмітку мережі [7].

Саме за допомогою цих елементів описується динаміка процесу підготовки заданої кількості літаків, яка полягає в наступних принципах:

- активність переходу визначається наявністю хоча б одного маркера в кожній його вхідній позиції;

- спрацювання переходу призводить до переміщення маркерів з вхідних позицій до вихідних;

- процес перерозподілу маркерів називається виконанням мережі Петрі;

- мережа зупиняється, якщо не може спрацювати жоден з її переходів при деякій розмітці.

При побудові імітаційної моделі використовуються наступні припущення, а саме вважається що:

- усі літальні апарати що надходять на підготовку до польотів не мають бойових пошкоджень, відновлення чи ремонту не потребують;

- фахівці дотримуються визначеної послідовності виконання робіт на кожному літальному апараті;

- несправності, які виявляються під час виконання підготовки до польотів, усуваються фахівцями інженерно-авіаційної служби без порушення технологічного графіку підготовки;

- система аеродромно-технічного забезпечення повністю задовольняє вимоги системи інженерно-авіаційного забезпечення бойових дій (бойової підготовки) у процесі виконання підготовки, тому в моделі не враховується [7].

Для прикладу в роботі [7] розглянуто імітаційна модель часткової операції з технологічного процесу підготовки літака до вильоту. Для прикладу припущено, що на одиночному літальному апараті Су-27 необхідно виконати дві послідовні операції:

- 1) заправка літака паливом що триває 10 хвилин і виконується старшим механіком зі спеціальності “Літак та двигун”;

2) перевірка стану приладних дошок у кабіні, що триває 2 хвилини і виконується механіком зі спеціальності "Авіаційне обладнання".

Імітаційна модель для наведеного прикладу зображена на рисунку 2.

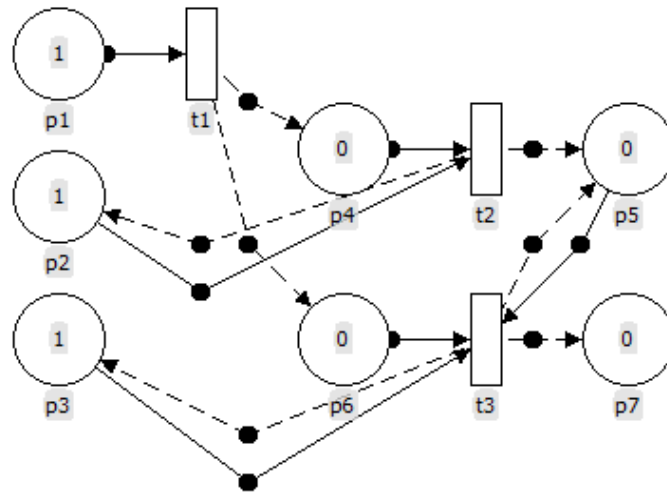


Рисунок 2 – Часова мережа Петрі, яка імітує виконання операцій на одному літаку

Джерело: розроблено автором [7, С. 103]

Кількість маркерів у позиції p1 задає кількість літаків Су-27, на яких необхідно виконати перелік робіт. Для заданого прикладу, ця кількість дорівнює одному. Число маркерів у позиціях p2 та p3 дорівнює, відповідно, кількості авіаційних механіків з літака та двигуна та механіків з авіаційного обладнання. Тобто по одному фахівцю. Позиції p4 та p6 символізують операції, які ще не виконані фахівцями. Маркер в цих позиціях з'являється після запуску імітаційної моделі при спрацюванні переходу t1, який не несе часового навантаження і вважається, що він спрацює миттєво. Присутність цього переходу обумовлена правилами мереж Петрі. При з'явленні маркерів у позиціях p4 та p6 активізуються переходи t2 та t3. Переходи t2 та t3 мають часову затримку, яка дорівнює часу виконання окремої операції. Перехід t2 імітує час за який виконується заправка літака паливом. Час затримки складає 10 хвилин. Перехід t3 імітує час необхідний для виконання перевірки стану приладних дошок у кабіні механіком з авіаційного обладнання. Час затримки у переході t3 дорівнює 2 хвилинам. Момент коли у позиціях p5 та p7 з'являється маркер, імітує завершення виконання заданого переліку робіт. Оскільки технологію передбачене послідовне виконання операцій, в наведеній імітаційній моделі існують дуги між позицією p5 та t3. Мовою мереж Петрі це означає, що перехід t3 спрацює тільки тоді, коли у всіх його вхідних позиціях є маркер. Тобто механік з авіаційного обладнання зможе розпочати виконання перевірки стану приладних дошок у кабіні після завершення виконання заправки літака паливом механіком з літака та двигуна. Імітаційна модель (див. рис.2) коректно може відобразити процес послідовної підготовки групи літаків. Для цього необхідно задати кількість літаків (а саме кількість маркерів) у позиції p1. Також при необхідності імітації виконання переліку операцій іншою кількістю фахівців слід змінити кількість маркерів у позиціях p2 та p3. Результатом моделювання за представленою імітаційною моделлю є визначення часу виконання двох операцій з підготовки заданої в позиції p1 літаків заданими в позиціях p2 та p3 фахівцями ІАС [7].

За наведеним прикладом імітаційної моделі часткової операції з технологічного процесу підготовки літака до вильоту аналогічно можливо побудувати імітаційну модель усього переліку робіт з підготовки групи літаків до вильоту всіма задіяними фахівцями ІАС.

Детальніше даний процес побудови імітаційної моделі процесу одночасної підготовки заданого числа ЛА з альтернативними варіантами кількісно-якісного складу фахівців ІАС

авіаційного підрозділу, що залучаються, на основі часової мережі Петрі розглянута в роботах [7, 8].

В результаті побудована імітаційна модель дозволяє визначити мінімально необхідний час $T_{\text{підг}iN_{\text{ЛА}}}$ для виконання одночасної підготовки до повторного вильоту заданої групи літальних апаратів $N_{\text{ЛА}}$ і при визначеному варіанті кількісно-якісного складу фахівців авіаційного підрозділу, що залучаються до технічного обслуговування.

Після побудови імітаційних моделей процесу підготовки до вильоту для кожного варіанту кількісно-якісного складу фахівців ІАС та для кожного варіанту кількості повітряних суден, що водночас готуються до вильоту, здійснюється безпосереднє імітаційне моделювання та формується база даних для подальшої обробки накопиченого статистичного матеріалу.

Наступним етапом є безпосередньо побудова залежності часу підготовки групи літаків до повторного вильоту від кількісно-якісного складу фахівців ІАС, що залучаються до технічного обслуговування. Блок-схема даної методики побудови математичної моделі представлено на рис. 3.

Після формування вибірки статистичного матеріалу формуються альтернативні форми апроксимуючої залежності часу підготовки групи літаків до вильотів від кількісно-якісного складу ОШС ІАС. Приклад таких альтернативних форм наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Приклад альтернативних форм залежності (2)

Вид альтернативної залежності	Форма запису альтернативної залежності
Лінійна форма	$T_{\text{підг}i} = a_0 + a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2 + \dots + a_m \cdot n_m$
Ступенева форма	$T_{\text{підг}i} = a_0 \cdot n_1^{a_1} \cdot n_2^{a_2} \cdot \dots \cdot n_m^{a_m}$
Експоненціальна форма	$T_{\text{підг}i} = e^{a_0 + a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2 + \dots + a_m \cdot n_m}$
Гіперболічна форма	$T_{\text{підг}i} = a_0 + \frac{a_1}{n_1} + \frac{a_2}{n_2} + \dots + \frac{a_m}{n_m}$

Джерело: розроблено авторами

В даних альтернативних формах залежності невідомі значення вільного члену позначено як a_0 , а невідомі коефіцієнти при відповідних факторах (значеннях кількості фахівців за кожною спеціальністю) – через $a_1; a_2; \dots; a_m$.

Дані невідомі значення коефіцієнтів при відповідних факторах знаходяться за допомогою загальновідомого методу найменших квадратів. В результаті отримуються залежності, що описують процес підготовки групи літаків до вильоту у вигляді деякої наближеної функції.

Наступним кроком є обрання кращої із усіх альтернативних форм апроксимуючої залежності (моделі) за умовою обраних зовнішніх критеріїв відповідності.

Першим критерієм такого вибору найкращої форми моделі є показники відповідності побудованої залежності відомим тенденціям впливу зміни кількості фахівців m -ї спеціальності на час підготовки групи літаків.

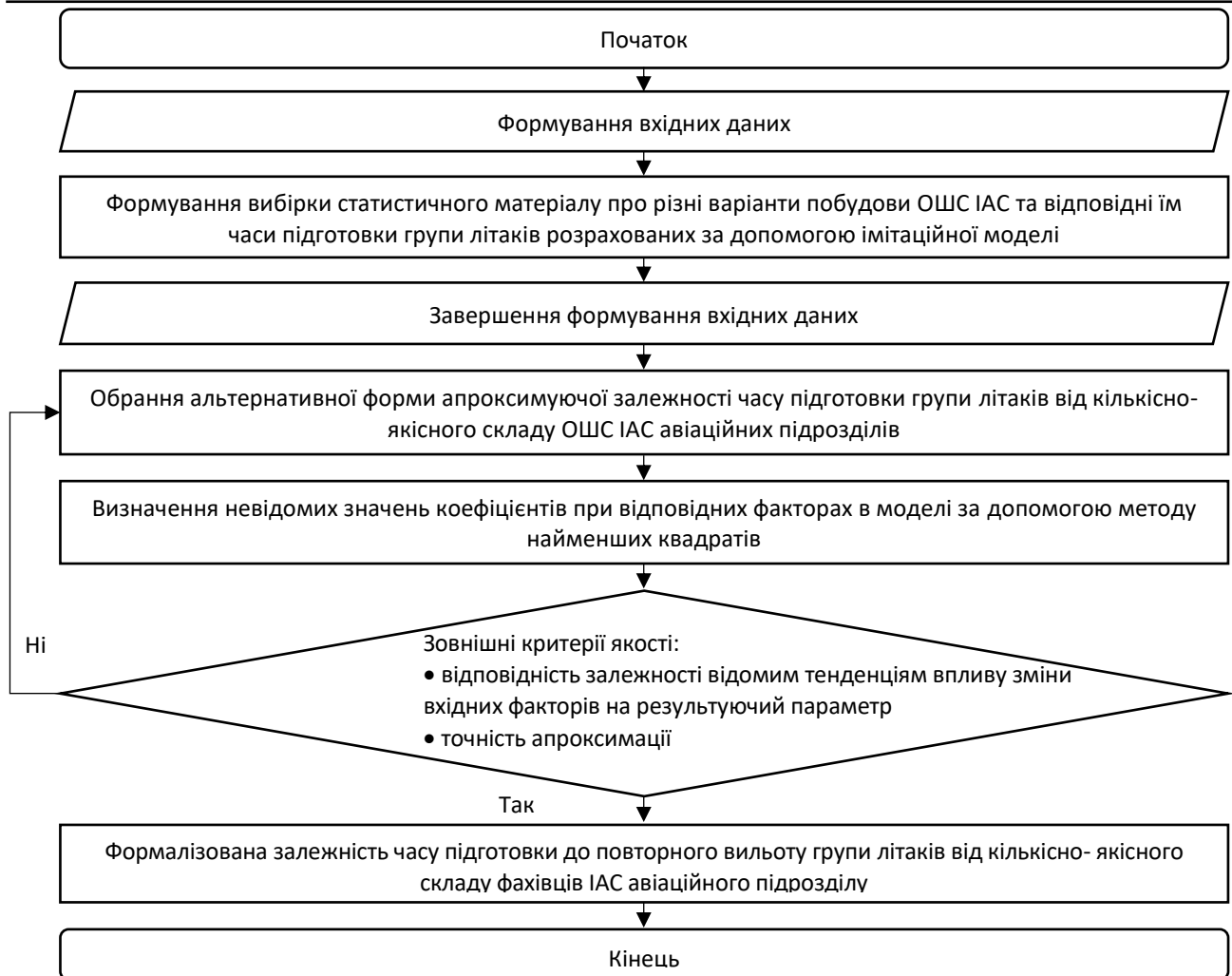


Рисунок 3 – Блок-схема методики побудови залежності часу підготовки групи літаків від кількісно-якісного складу фахівців ІАС, що залучаються до технічного обслуговування
Джерело: розроблено авторами

Відомо, що при збільшенні кількості фахівців m -ї спеціальності час підготовки групи літаків повинен зменшуватися. Дотримання кращої із усіх альтернативних форм апроксимуючої залежності даного критерію визначається шляхом формування системи часткових похідних часу підготовки за кількістю фахівців m -ї спеціальності, кожен з яких повинен буди менше нуля, тобто модель повинна відповідати наступній умові:

$$\frac{\partial T_{\text{підг}i}}{\partial n_1} < 0; \frac{\partial T_{\text{підг}i}}{\partial n_2} < 0; \dots \frac{\partial T_{\text{підг}i}}{\partial n_m} < 0. \quad (3)$$

Другим критерієм вибору є показники точності описання побудованою апроксимуючою залежністю наявного статистичного матеріалу, а саме максимальна відносна помилка розрахунків в області інтерполяції та середня помилка апроксимації [10-13], значення яких повинні бути меншими за заданих величин.

Максимальна відносна помилка розрахунків в області інтерполяції визначається за допомогою наступного виразу:

$$\delta_{\max} = \max_{j=1 \dots n} \frac{|T_{\text{підг}i}^{\text{реал}} - T_{\text{підг}i}^{\text{розрах}}|}{T_{\text{підг}i}^{\text{реал}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

а середня помилка апроксимації – за виразом:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{\text{підг}_i}^{\text{реал}} - T_{\text{підг}_i}^{\text{розрах}}}{T_{\text{підг}_i}^{\text{реал}}} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

- де $T_{\text{підг}_i}^{\text{реал}}, T_{\text{підг}_i}^{\text{розрах}}$ – час підготовки групи літаків розрахованих за допомогою імітаційної моделі та за допомогою апроксимуючої залежності для відповідної i -ої варіації кількісно-якісного складу фахівців ІАС, що залучаються до технічного обслуговування, відповідно;
- n – загальна кількість варіацій кількісно-якісного складу фахівців ІАС, що залучаються до технічного обслуговування.

Зазвичай, значення середньої помилки апроксимації 8–15% свідчить о задовільній якості побудованої моделі, тобто середня помилка апроксимації повинна бути $\bar{A} < 15\%$ для обрання кращої із альтернативних форм апроксимуючої залежності [10-13]. А значення відносної похибки апроксимації повинне бути меншим ніж прийняте – $\delta_{\text{max}} < 25\%$.

В результаті заданої кількості літаків, що підлягають одночасній підготовці до повторного вильоту на оперативному аеродромі у відриві від місця базування авіаційного підрозділу, обирається одна найкраща із альтернативних форм математичної залежності (див. табл. 1). За допомогою отриманої математичної моделі можливо оперативно, без додаткових процедур імітаційного моделювання, отримати значення часу підготовки групи літаків до вильоту в залежності від кількісно-якісного складу ОШС ІАС.

Результати

У результаті дослідження була розроблена методика побудови формалізованої залежності часу підготовки до вильоту групи літаків від кількісно-якісного складу інженерно-авіаційної служби авіаційного підрозділу. Створені за допомогою даної методики математичні моделі дозволяють оперативно оцінювати необхідний час підготовки до вильоту груп літаків в залежності від варіанту організації проведення робіт. Запропонована методика є універсальною, може бути застосована до різних типів літальних апаратів, різних видів авіаційних підрозділів та умов базування, що підвищує її практичну цінність.

Дослідження також сприяло розвитку теорій імітаційного моделювання та системного аналізу, підтверджуючи важливість інтеграції цих підходів для підвищення ефективності роботи ІАС авіаційних підрозділів.

Висновки

Дослідження підтвердило важливість розробки і впровадження математичних моделей для оптимізації процесів підготовки до вильоту груп літаків. Запропонована методика показала високу ефективність у забезпеченні оперативності та точності оцінки необхідного часу підготовки. Результати дослідження можуть бути застосовані для постановки та розв'язування задачі оптимізації організаційно-штатної структури ІАС авіаційного підрозділу за критерієм виду (1).

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення методики синтезу раціональної організаційно-штатної структури інженерно-авіаційної служби підрозділів тактичної авіації.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Єдиний перелік (каталог) спроможностей Міністерства оборони України, Збройних Сил України та інших складових сил оборони (затверджено Міністром оборони України, 09 грудня 2019 року № 7983/в/36) // Міністерство оборони України. – К.: МОУ, 2019. – 618 с.
2. Про затвердження Правил інженерно-авіаційного забезпечення державної авіації України : Наказ М-ва оборони України від 05.07.2016 р. № 343 : станом на 18 квіт. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1101-16#Text> (дата звернення: 25.04.2024).
3. Про встановлення тривалості видів підготовки до польотів і регламентних робіт на авіаційній техніці та необхідних для цього сил та засобів: Наказ Командувача Повітряних Сил ЗС України від 06.02.17 № 14.
4. Леонтьєв О., Кремешний О., Паращенко Т. Система критеріїв та сукупність показників для синтезу раціональної організаційної структури інженерно-авіаційної служби частин (підрозділів) тактичної авіації. *Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки* : міжнар. наук.-практ. конф Державного науково-дослідного інституту авіації, м. Київ, 11 жовт. 2018 р. С. 62.
5. Леонтьєв О. Б., Чигрин Р. М., Паращенко Т. В. Обґрунтування сукупності показників та критеріїв порівняльного оцінювання системи інженерно-авіаційного забезпечення частин і підрозділів авіації Повітряних Сил. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 4(56). С. 35–41. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.56.05> (дата звернення: 25.04.2024).
6. Леонтьєв О., Науменко М., Паращенко Т. Аналіз можливих варіантів раціоналізації організаційно-штатної структури авіаційних частин і підрозділів тактичної авіації повітряних сил з урахуванням досвіду застосування в операції об'єднаних сил. *Актуальні проблеми бойового застосування авіації та вирішення завдань протиповітряної оборони в умовах проведення операції об'єднаних сил* : Науково-практ. семінар Національного університету оборони України, м. Київ, 17 жовт. 2019 р. С. 13.
7. Леонтьєв О. Б., Паращенко Т. В. Засоби імітаційного моделювання, як інструмент синтезу структури інженерно-авіаційної служби авіаційних частин та підрозділів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 2(54). С. 99–105. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.54.14> (дата звернення: 25.04.2024).
8. Леонтьєв О., Паращенко Т. Підходи до формування методики синтезу раціональної організаційно-штатної структури інженерно-авіаційної служби у системі інженерно-авіаційного забезпечення бойових дій частин і підрозділів авіації. *Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки* : VII наук.–техн. конф центрального наук.-дослід. інст-ту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ, 10 жовт. 2019 р. 2019. С. 362.
9. Khetagurov Y. A. On creation approximating functions of characteristics of small number of systems. *Proceedings of the Institute for System Programming of RAS*. 2012. Vol. 22. P. 475–492. <https://doi.org/10.15514/ispras-2012-22-26> (date of access: 25.04.2024).

10. Елисеєва І.І. Економетрика. М.: Финансы и статистика, 2003. 344 с.
11. Каморников С. Ф., Каморников С. С. Економетрика. М.: Интеграция, 2012. 262 с.
12. Гельман Э., Хилл Д., Вехтари А. Регрессия : теория и практика. М.: ДМК Пресс, 2022. 750 с.

References

1. Unified list (catalogue) of capabilities of the Ministry of Defence of Ukraine, the Armed Forces of Ukraine and other components of the defence forces (approved by the Minister of Defence of Ukraine, 09 December 2019, No. 7983/v/36) // Ministry of Defence of Ukraine - Kyiv: MoD, 2019. – 618 s.
2. On Approval of the Rules of Engineering and Aviation Support of the State Aviation of Ukraine: Order of the Ministry of Defence of Ukraine dated 05.07.2016 No. 343: as of 18 April. 2023 p. Available from : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1101-16#Text> (accessed 25.04.2024).
3. On establishing the duration of flight training and routine maintenance on aircraft and the forces and means necessary for this: Order of the Commander of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine of 06.02.17 No. 14.
4. A system of criteria and a set of indicators for the synthesis of a rational organisational structure of the engineering and aviation service of tactical aviation units (subunits). *Actual problems of aviation technology development*: international scientific and practical conference of the State Research Institute of Aviation, Kyiv, 11 October. 2018 p. C. 62.
5. Leontiev O. B., Chyhryn R. M., Parashchenko T. V. Substantiation of a set of indicators and criteria for comparative assessment of the system of engineering and aviation support of aviation units of the Air Force. *Weapons systems and military equipment*. 2018. № 4(56). C. 35-41. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.56.05> (accessed 25.04.2024).
6. Leontiev O., Naumenko M., Parashchenko T. Analysis of possible options for rationalising the organisational and staffing structure of aviation units and tactical aviation units of the air forces, taking into account the experience of use in the operation of the joint forces. *Actual problems of combat use of aviation and solving air defence tasks in the conditions of the joint forces operation*: Scientific and practical seminar of the National Defence University of Ukraine, Kyiv, 17 October. 2019. P. 13.
7. Leontiev O. B., Parashchenko T. V. Simulation Modelling Tools as a Tool for Synthesising the Structure of the Aviation Engineering Service of Aviation Units and Subdivisions. *Weapons systems and military equipment*. 2018. № 2(54). C. 99-105. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.54.14> (accessed 25.04.2024).
8. Approaches to the formation of a methodology for the synthesis of a rational organisational and staffing structure of the engineering and aviation service in the system of engineering and aviation support of combat operations of aviation units and subunits. *Problems of coordination of military-technical and defence-industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of weapons and military equipment*: VII Scientific and Technical Conference of the Central Research Institute of Arms and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, 10 October. 2019 p. 2019. C. 362.
9. Khetagurov Y. A. On creation of approximating functions of characteristics of small number of systems. *Proceedings of the Institute for System Programming of RAS*. 2012. Vol. 22. P. 475-492. <https://doi.org/10.15514/ispras-2012-22-26> (date of access: 25.04.2024).
10. Eliseeva I.I. Econometrics. Moscow: Finance and Statistics, 2003. 344 c.
11. Kamornikov S.F., Kamornikov S.S. Econometrics. Moscow: Integration, 2012. 262 c.
12. Gelman E., Hill D., Vehti A. Regression: Theory and Practice. Moscow: DMK Press, 2022. 750 c.