

А.С. Бологін, П.О. Жикол

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ В ЗАДАЧАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Запропоновано та описано особливості застосування методів логічного аналізу при формуванні рішень про продовження експлуатації виробів авіаційної техніки. Розглянуто варіант пошуку оптимального варіанту управлінського рішення групою експертів шляхом отримання нечітких заключень про подальше управління виробом. Запропонований підхід може застосовуватися у системі підтримки прийняття рішень, яка здатна забезпечити належний рівень оперативності та автоматизації процесів управління надійністю авіаційної техніки.

Ключові слова: *авіаційна техніка, прийняття рішень, логічний висновок, експлуатація, технічний стан*

Вступ

У Збройних Силах (далі – ЗС) України експлуатуються вироби авіаційної техніки (далі – АТ), за якими з боку їх розробників та виробників не здійснюється супроводження експлуатації та підтримання льотної придатності. Керівниками інженерно-авіаційної служби і озброєння командувань Повітряних Сил у попередні роки, за результатами досліджень фактичного технічного стану АТ, прийнято низку рішень про продовження експлуатації, зміну обсягів та періодичності робіт з технічного обслуговування, продовження строків служби, переведення на експлуатацію за технічним станом тощо. Тому фактично реалізовані заходи програм технічного обслуговування та ремонту літальних апаратів військового призначення у ЗС України зазнали суттєвих змін, при цьому кожен такий захід організовано на підставі прийнятих відповідних управлінських рішень [1, с. 146...153; 2, с. 161...166].

Постановка проблеми. Реалізація заходів подальшого підтримання льотної придатності старіючого парку АТ потребує урахування та застосування сучасних методів при вдосконаленні (коригуванні) програм їх технічного обслуговування та ремонту шляхом усвідомленого вибору особою, що приймає рішення (далі – ОПР), або органом управління одного з можливих варіантів подальшого застосування виробу АТ у залежності від поточного технічного стану та очікуваних умов її подальшого застосування [3, с. 144...164; 4, с. 187...191].

Безперервне зростання кількості інформації та постійне ускладнення завдань, які виконуються старіючим парком авіаційної техніки, свідчить про необхідність удосконалення існуючих та створення нових інноваційних систем прийняття та ухвалення

управлінських рішень. Саме інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (далі – СППР) здатні реалізувати у режимі реального часу неперервний контрольований процес прийняття рішень у складних ситуаціях, які мають багато складових та характеризуються невизначеністю та несталою структурованістю. СППР створюється на сучасному етапі як система, що здатна забезпечити оперативне надходження і обробку інформації та автоматизацію процесів управління надійністю АТ [5, с. 26...42].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні більшість рішень про подальшу експлуатацію АТ приймається за результатами експертних оцінок, на основі бази експертних знань, умінь та навичок відповідних фахівців та осіб, що приймають рішення [6, с. 98...105]. При цьому критеріальне поле не структуровано та не систематизовано для прийняття рішення, можуть недостатньо враховуватись вхідні дані щодо параметрів технічного стану АТ, взаємозв'язок між ними, експлуатаційні обмеження та інше, що може привести до недостатньої обґрунтованості рішення, яке приймається.

Передбачається, що саме СППР реалізує функції збору інформації про технічний стан та надійність АТ, відмови та несправності, передачі інформації від виконавця до бази даних, формування потреби у запасних блоках та агрегатах тощо. Тобто забезпечить необхідний обсяг вхідних даних для можливості формування управлінського рішення щодо подальшої експлуатації – реалізацію цього комплексу функцій закладено у СППР [7, с. 18...34].

Мета статті – в об'єктивно існуючих умовах функціонування виробів АТ потрібне формування комплексного підходу до оцінки і прогнозу фактичного технічного стану на базі його

безперервного моніторингу у процесі експлуатації. Для оцінки оперативної надійності та планування подальшого режиму експлуатації потрібні нові методи та моделі визначення і прогнозування змін технічного стану виробу АТ. Вказані задачі відносяться до слабоформалізованих та неструктурованих. Для їх виконання доцільне сполучення нечіткої логіки, статистичних та імовірнісних методів, нейронних мереж, генетичних мереж тощо. Стаття не претендує на висвітлення широкого кола питань, пов'язаних з використанням вказаних вище методів при управлінні процесом експлуатації АТ. Метою статті є показати деякі особливості застосування методів логічного аналізу при формуванні рішень про продовження експлуатації АТ та на прикладі розглянути варіант пошуку оптимального варіанту управлінського рішення групою експертів шляхом отримання нечітких заключень про подальше управління виробом.

Виклад основного матеріалу

У процесах експлуатації АТ, де частіше використовується термін “системи управлінських рішень”, СППР (DSS-Decision Support System) – це інтерактивна прикладна система, яка забезпечує кінцевим експлуатантам АТ, котрі приймають рішення про її подальшу експлуатацію, легкий і зручний доступ до даних і моделей підтримання справності, у який відпрацьовано відповідні алгоритми прийняття рішень у напівструктурованих і неструктурованих ситуаціях з різними вхідними даними [6, с. 98...105]. При цьому СППР підтримує і посилює (але не замінює і не відмінює) міркування та оцінки особи, що приймає рішення. Сутність та важливість оцінок експертів не зменшується, контроль за прийняттям рішення лишається за людиною.

Для початкового формування проекту рішення про подальшу експлуатацію виробу АТ за результатами експертних оцінок формується група осіб [8, с. 7...20], що приймають рішення (далі – ОПР) – експертів у певній предметній області, що приймають участь в розв'язанні задачі, $D = \{D_t\}, t = \overline{1, k}$. Постановка задачі з урахуванням створеної групи експертів трансформується в таку. З урахуванням початкових даних, до складу яких може входити інформація про фактичний технічний стан виробу АТ, систему експлуатації, виконанні роботи та інш., необхідно у найкращий, з точки зору вибраного критерію, спосіб визначити розподіл фінансових та виробничих ресурсів між проектами Р у відповідності до індивідуальних переваг ОПР D при задоволенні обмеження В.

При цьому під проектами передбачаються різні

варіанти застосування виробу АТ за призначенням, наприклад, застосування штатного обладнання, продовження подальшої експлуатації, модернізація існуючого обладнання та набуття нових експлуатаційних характеристик, використання виробу з обмеженими завданнями, у якості лише платформи для застосування зброї, створення нового виробу або виробу з обмеженими спеціальними характеристиками для застосування, тощо. Вибір проекту відбувається за визначенням його реалізованості – тобто найкращим вибором співвідношення фінансових та виробничих ресурсів, затрачених на виконання проекту, та набутих можливостями при його реалізації [9, с. 139...146; 10, с. 202...206].

Задавання параметрів. ОПР $D = \{D_t\}, t = \overline{1, k}$ для проектів $P = \{P_i\}, i = \overline{1, n}$ експертним шляхом визначають набір важливих критеріїв $C = \{C_l\}, l = \overline{1, h}$, за якими буде проводитись оцінювання проектів.

Всі критерії C_l вважають максимізуючими, тобто більше значення оцінки за таким критерієм є кращим з точки зору вибору проекту.

Якщо деякий критерій виявиться мінімізуючим, тобто кращим з точки фінансових та виробничих витрат на модернізацію (відновлення), або ремонт є менше значення оцінки за таким критерієм, то цей критерій змінюють на зворотній.

Всі критерії структуруються в логічну ієрархічну структуру, що складається з послідовно та паралельно з'єднаних блоків, кожен з яких має на вході 5-7 докладних (конкретизуючих) критеріїв, а на виході один критерій, який узагальнює вхідні критерії даного блоку (рис. 1).

Зазвичай, задачі розподілу ресурсів між проектами вирішують із застосуванням систем нечіткого логічного висновку (далі – СНВ) (fuzzy inference system – FIS). Система нечіткого логічного висновку – це процес отримання нечітких заключень про подальше управління виробом на основі нечітких умов або інформації про фактичний технічний стан виробу [11, с. 112...116].

Елементи теорії нечітких відношень використовуються під час моделювання структури складних систем, аналізу процесів ухвалення рішень, у задачах керування технологічними процесами тощо.

Системи нечіткого логічного висновку також знаходять застосування в задачах, у яких традиційно використовується теорія звичайних (нерозмитих, чітких) відношень. Як правило, апарат теорії чітких відношень застосовується під час якісного аналізу взаємозв'язків між об'єктами досліджуваної системи, коли ці взаємозв'язки мають дихотомічний характер і можуть бути інтерпретовані в термінах “зв'язок наявний” або “зв'язок відсутній”, або ж у

випадках, коли методи кількісного аналізу взаємозв'язків із певних причин непридатні, і ці взаємозв'язки штучно зводяться до дихотомічного вигляду.

У якості СНВ початкового нижчого рівня HeadLevel може бути фактичний технічний стан виробу АТ за входами:

НІ₁ – наявність ресурсних показників; НІ₂ – зовнішній вигляд виробу; НІ₃ – надійність протягом визначеного періоду; НІ₄ – відповідність робочих параметрів; НІ₅ – можливість відновлення та інш. Вихід HeadLevel цієї СНВ буде входом для СНВ наступного рівня, яка у свою чергу може визначати рівень OrgLevel організації відновлення виробу за такими входами:

ОІ₁ – наявність ремонтного фонду даного типу виробів, або складових; ОІ₂ – можливості закупівлі складових; ОІ₃ – ресурси для ремонту (відновлення); ОІ₄ – наявність фахівців; ОІ₅ – витрати на модернізацію (відновлення); ОІ₆ – наявність фінансових та виробничих ресурсів організації та інш. Вихід СНВ OrgLevel буде входом СНВ наступного рівня, і так далі до СНВ найвищого останнього рівня, виходом якої буде ступінь реалізованість проекту $P_i, i = \overline{1, n}$, що аналізується.

Вся ієрархічна структура критеріїв, таким чином, збігається на верхньому рівні ієрархії в єдиний критерій: реалізованість проекту для його вибору і надання йому ресурсів. Для розподілу ресурсів потрібні значення оцінок за докладними критеріями, саме вони і складають сформований ОПР набір критеріїв оцінювання $C = \{C_l\}, l = \overline{1, h}$.

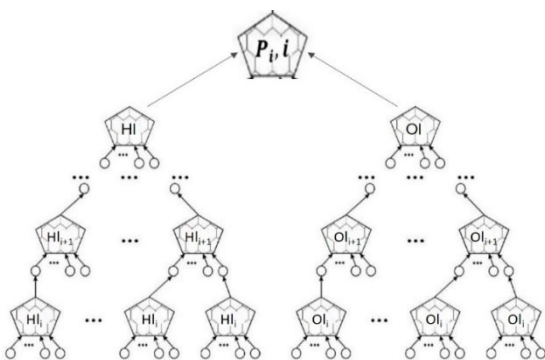


Рис. 1. – Ієрархічна структура критеріїв оцінювання проектів

Джерело: розроблено авторами

При оцінюванні варіантів рішення враховують, що визначені критерії $C_l, l = \overline{1, h}$, за якими ОПР будуть оцінювати проекти, можуть відрізнятися своєю важливістю, та в результаті мати різну вагу впливу на рішення задачі. Більше того, кожна ОПР може мати свій погляд на ранжирування та розподіл ваг критеріїв, тому логічно, щоб кожна ОПР D_t надавала свої індивідуальні вагові коефіцієнти W_{lt} для кожного критерію $C_l, l = \overline{1, h}, t = \overline{1, k}$.

Окрім цього, доцільним постає врахування значимості, досвіду, рівню підготовки, посади, тощо кожної ОПР. Для цього, групою ОПР $D = \{D_t\}$ колегіально, чи її керівником – особою, що є відповідальною за прийняте рішення, задаються вагові коефіцієнти V_t для ОПР $D_t, t = \overline{1, k}$ [12, с. 97...114].

Визначення значень вагових коефіцієнтів критеріїв W_{lt} та ОПР V_t зручно проводити за допомогою геометричного прийому, наведеного далі.

Тут вагові коефіцієнти є чіткими, оскільки немає необхідності у їх фазифікації для використання у подальших етапах методу. Зведені до нечіткого вигляду в даному випадку вагові коефіцієнти будуть умовними нечіткими множинами, тобто такими, які визначаються чітким значенням – центром абсолютного чи відносного інтервалу, та стандартною функцією належності. Це призвело б лише до ускладнення практичної реалізації методу при відсутності поліпшення якості рішення.

Для подальшого використання вагові коефіцієнти проводять через процедури нормування:

$$W_{lt}^{norm} = W_{lt} / (\sum_{l=1}^h W_{lt}), l = \overline{1, h}, t = \overline{1, k}$$

$$V_t^{norm} = V_t / (\sum_{t=1}^k V_t), t = \overline{1, k}$$

Множина критеріїв $C = \{C_l\}$ умовно поділяється на дві підмножини. За однією підмножиною критеріїв $C_1 = \{C_{l1}\}$ кожному проекту P_i надаються суб'єктивні окремі експертні оцінки S_{ilt} кожною ОПР D_t . За іншою підмножиною критеріїв $C_2 = \{C_{l2}\}$ оцінки проектів визначаються як розраховані числові характеристики проектів, що надаються разом з проектами (наприклад, рентабельність, строк виконання модернізації, термін створення та доведення нового виробу, можливості виконання ремонту (відновлення), тощо).

Отже, після виконання етапу оцінювання варіантів є визначеними нормовані вагові коефіцієнти критеріїв W_{lt}^{norm} та ОПР V_t^{norm} , кожен проект $P_i, i = \overline{1, n}$ характеризується своїм набором оцінок $S_{ilt}, l = \overline{1, h}, t = \overline{1, k}$ за кожним критерієм C_l від кожної ОПР D_t .

На етапі узагальнення оцінок задача, що розглядається, постає задачею багатокритеріального оптимального вибору проектів, для розв'язання якої використовується підхід зведення її до задачі однокритеріального вибору [8], тобто вибір проектів буде відбуватись за узагальненою агрегрованою оцінкою кожного проекту P_i – ступенем найкращої

реалізованості проекту $A_i, i = \overline{1, n}$.

У процесі зведення задачі до однокритеріальної, пропонується такий метод знаходження узагальненої оцінки реалізованості A_i проекту $P_i, i = \overline{1, n}$, (рис. 2):

1. Знаходження зважених агрегованих оцінок A_{it}^D кожного проекту P_i від кожної ОПР D_t , де $i = \overline{1, n}, t = \overline{1, k}$, відбувається на основі оцінок S_{ilt} ОПР D_t проекту P_i за кожним критерієм C_l та вагових коефіцієнтів W_{lt} критеріїв, де $l = \overline{1, h}$.

2. Знаходження остаточної узагальненої оцінки A_i кожного проекту P_i , де $i = \overline{1, n}$ розраховується на основі агрегованих оцінок A_{it}^D кожного проекту P_i та вагових коефіцієнтів V_t ОПР, де $i = \overline{1, n}, t = \overline{1, k}$.

За умов застосування нелінійних підходів до агрегування оцінок послідовність агрегування суттєво впливає на значення узагальненої оцінки і результат розв'язку задачі. На жаль, традиційні методи агрегування експертних оцінок [11, с. 112...116; 12, с. 97...114] та вхідних параметрів проектів не прийнятні в реальних задачах розподілу ресурсів, тому для знаходження узагальнених агрегованих оцінок проектів пропонується застосовувати СНВ.

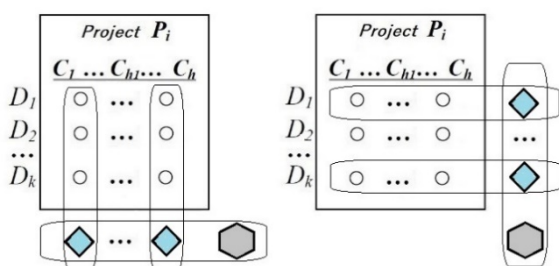
Етап зведення задачі складається із 3-х операцій:

операції узагальнення оцінок проектів від кожної ОПР за критеріями СНВ;

операції аналізу погодженості оцінок ОПР;

операції агрегування оцінок проектів за ОПР.

Отже, відповідно до ієрархічної структури критеріїв відбувається послідовне багаторівневе узагальнення значення оцінок кожного проекту P_i за всіма критеріями $C = \{C_l\}$ для кожної ОПР D_t з урахування ваг W_{lt}^{norm} критеріїв, в результаті чого для кожного проекту P_i знаходяться $t = \overline{1, k}$ зважених агрегованих оцінок A_{it}^D .



	S_{ilt} експертна оцінка проекту P_i від ОПР D_t за критерієм C_l
	агреговане значення оцінок
	єдина узагальнена оцінка проекту P_i – ступень реалізованості A_i

Рис. 2. Схеми послідовності подвійного агрегування оцінок проектів:

а) яка використовується; б) запропонована
Джерело: розроблено авторами

З цією метою для кожного структурного блоку ієрархії критеріїв будується відповідна локальна СНВ, яка має 5-7 входів і один вихід. СНВ нижнього, останнього рівня має своїм виходом: ступінь реалізованості проекту на думку ОПР D_t . Необхідно зазначити, що в СНВ для експертних оцінок застосовуються побудовані раніше індивідуальні когнітивні функції належності, а для розрахованих числових значень відповідні наметоподібні функції належності.

За допомогою методу α, β -коаліцій здійснюється аналіз погодженості зважених агрегованих оцінок A_{it}^D , для чого формуються коаліції ОПР зі схожими міркуваннями (оцінками) та з подальшого розгляду видаляються оцінки експертів, що входять до несуттєвих коаліцій.

Тепер всі зважені агреговані оцінки A_{it}^D , що пройшли процедуру аналізу погодженості, для кожного проекту P_i із урахуванням ваг експертів V_t^{norm} за допомогою методу агрегування за міжгруповим консенсусом агрегуються в єдину остаточної узагальнену оцінку A_i – ступень реалізованості проекту.

Пошук оптимального варіанту рішення полягає у розв'язанні однокритеріальної задачі вибору проектів P_i за узагальненими оцінками $A_i, i = \overline{1, n}$ та призводить до добору тих проектів, які максимізують ефективність виділення їм ресурсів, що розподіляються, та задовольняють ресурсному обмеженню В.

За узагальненими оцінками A_i проектів $P_i, i = \overline{1, n}$ та наявними обмеженнями формулюється однокритеріальна задача оптимізації, розв'язання якої приводить до остаточного результату – вибору варіанту застосування виробу АТ та прийняття рішення щодо його застосування.

Висновок

Зазначена однокритеріальна задача формулюється в залежності від конкретної проблеми і може бути розв'язана за тим чи іншим підходом до розв'язання класичних задач лінійного програмування дослідження операцій. Для задач великої розмірності пропонується застосовувати еволюційні алгоритми. Ефективність даного підходу підтверджена численними прикладами.

У статті на прикладі вперше розглянуто варіант пошуку оптимального управлінського рішення групою експертів шляхом отримання нечітких заключень про подальше управління виробом при продовженні експлуатації. При цьому запропоновано спосіб визначення розподілу фінансових та виробничих ресурсів між проектами, у якості яких передбачаються різні варіанти застосування виробу АТ за призначенням.

Створена методологія розподілу ресурсів і вибору варіантів управлінських рішень розроблена на принципах системності і має такі переваги: ґрунтується на спеціально розроблених методах аналізу даних, що виявляють ефективність і результативність, „прозорість” процедур для ОПР, враховують комплекс умов системної

невизначеності, передбачають безпосереднє залучення експертів до процесу розв’язання задачі і врахування їх особистих уподобань та переваг, оперують кількісними і якісними даними. Крім цього, розроблена методологія є інваріантною до параметрів і обмежень задачі, масштабною та зручною для практичного використання.

Список літератури

1. Пашенко С.В., Самулеєв В.В. Застосування методів логічного аналізу при коригуванні програм технічного обслуговування і ремонту старіючого парку військової авіаційної техніки. Зб. наук. праць ДНДІА 2013. Вип. № 16. – 2013. - С. 146-153.
2. Бологін А.С., Горохов Г.Т., Манулін Ю.О. Методологічні основи побудови інтелектуальної системи прийняття рішень про продовження експлуатації літальних апаратів Зб. наук. праць ДНДІА 2024. Вип. № 20(27). – 2024. - С. 161-166.
3. Безпека авіації. За редакцією В.П. Бабака. – К.: Техніка, 2004. – 584 с.
4. A. Bolohin, Yu. Bolohina, Yu. Tymchuk. Ranking of the technical condition of aircraft according to the diagnostic data of the glider design. System research and information technologies. International scientific and technical journal, 2025, No 2 - С. 98-105.
5. Далецкий Е.С., Далецкий С.С. Контроль надёжности изделий авиатехники при эксплуатации до безопасного отказа. Научный вестник МГТУ ГА №130. М.: МГТУ ГА, 2008. - С.187-191.
6. Бологін А.С., Горохов Г.Т., Карускевич М.В. Математична модель прийняття рішення щодо продовження строків служби елементів конструкцій планерів літальних апаратів. Збірник наукових праць ДНДІА Вип. № 15. – 2012. - С. 139-146.
7. Горохов Г.Т., Жикол П.О., Скляр О.І. Застосування методів нечіткого динамічного програмування для підготовки рішень з відновлення справності повітряних суден в умовах авіаційних частин Зб. наук. праць ДНДІА 2024. Вип. № 20(27). – 2024. - С. 202-206.
8. Герасимов Б.М., Локазюк В.М., Оксіюк О.Г., Поморова О.В. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. К.: Видавництво Європейського університету, 2007.– 334 с.
9. Vedna Sharma, Surender Singh Samant. A multi-level decision-making frame work for heart related disease prediction and recommendation, System research and information technologies, 2023, No 4.
10. Нестеренко О.В., Савенков О.І., Фаловський О.О. За ред. П.І.Бідюка Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. К.: Національна академія управління, 2016.– 188 с.
11. Щерба А.А., Кирик В.В. Системи з нечіткою логікою регулювання електроенергетичних режимів.-К: Інститут електродинаміки Національної академії наук України, 2011. с.329.
12. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об’єктів електричних систем. К.:НТУУ "КПІ", 2011. – 148 с.

Надійшла до редколегії 10.10.2025

Схвалена до друку 14.11.2025

Відомості про авторів:

Бологін Андрій Сергійович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
докторант штатний
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0656-7799>

Жикол Павло Олександрович

заступник начальника науково-дослідного відділу
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4776-8821>

Information about the authors:

Andrij Bolohin

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Doctoral Student
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0656-7799>

Pavel Zhykol

Deputy Head of the Research Department
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4776-8821>

ASPECTS OF APPLICATION OF FUZZY LOGICAL INDUCTION METHODS IN DECISION SUPPORT PROBLEMS

A. Bolohin, P. Zhykol

The features of the application of logical analysis methods in the formation of decisions on the continuation of the operation of aircraft products are proposed and described. The formation of decisions is envisaged as part of the "management decision system" (DSS-Decision Support System). DSS is considered as an interactive application system that provides end operators with easy and convenient access to data and models of maintenance. DSS has developed appropriate decision-making algorithms in semi-structured and unstructured situations with different input data. At the same time, DSS supports and enhances (but does not replace or cancel) the reasoning and assessments of the decision-maker. The essence and importance of expert assessments does not decrease, control over decision-making remains with the person.

The article uses an example to consider for the first time the option of finding an optimal management solution by a group of experts by obtaining fuzzy conclusions about the further management of the product during continued operation. At the same time, a method is proposed for determining the distribution of financial and production resources between projects, which provide for different options for the use of an aircraft product for its intended purpose.

The created methodology for resource allocation and selection of management decision options is developed on the principles of systematicity and has the following advantages: it is based on specially developed data analysis methods that reveal efficiency and effectiveness, "transparency" of procedures for the decision-maker, takes into account a complex of conditions of systemic uncertainty, provides for the direct involvement of experts in the process of solving the problem and taking into account their personal preferences and preferences, operates with quantitative and qualitative data. In addition, the developed methodology is invariant to the parameters and limitations of the problem, large-scale and convenient for practical use.

The proposed approach can be applied in a decision support system that is capable of providing the appropriate level of efficiency and automation of aircraft reliability management processes.

Keywords: aviation technology, decision-making, logical conclusion, operation, technical condition.