

І.В. Заріцький¹, О.В. Заріцький²

¹*Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ*

²*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ВИБОРУ ТИПУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАПУСКУ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЛІТАКІВ ВІЙСЬКОВО-ТРАНСПОРТНОЇ АВІАЦІЇ

У статті розглянуте актуальне питання вибору типу електричної машини для повітряних систем запуску прямої дії, що пов'язане з переходом на концепцію повністю електрифікованого літака і як наслідок використання електричної енергії на борту літального апарату як основної.

Авторами статті запропоновано методикку вибору типу електричної машини для систем запуску авіаційних газотурбінних двигунів перспективних літаків військово-транспортної авіації (ВТА), яка поєднує сучасні методи інтелектуального аналізу даних, машинного навчання та апріорні процедури багатокритерійної оптимізації – принцип рівномірної оптимальності. Наведено класифікацію електричних машин для повітряних систем запуску та введено показники ефективності літальних апаратів двох рівнів з метою аналізу впливу електричної машини на експлуатаційну ефективність. Сформовано базу даних основних параметрів, котрі дають змогу визначити тип безконтактної електричної машини яку доцільно використати в системі запуску газотурбінного двигуна літаків військово-транспортної авіації.

У статті запропоновано та практично розглянуто використання методів аналітичного аналізу даних: класифікації та кластеризації, які дозволяють чітко класифікувати електричну машину з необхідними енергетичними параметрами як таку, що відноситься до відповідного класу (типу) машин, розрахувати її "близкість" до існуючих машин з урахуванням введених обмежень та спростити в подальшому процедури вибору або проектування у разі відсутності готового зразка. Зазначені методи класифікації та кластеризації запропоновано використовувати перед застосуванням апріорної процедури багатокритерійної оптимізації з використанням введеної класифікації електричних машин як міток даних, що дозволяє здійснювати якісний аналіз електричних машин з погляду їх характеристик, які використовуються в подальшому в алгоритмі багатокритерійної оптимізації.

Результати досліджень дозволили зробити висновки щодо пріоритетності використання асинхронної машини з короткозамкненим ротором в електричній системі запуску літаків ВТА з урахуванням введених обмежень.

Ключові слова: асинхронна машина, синхронна машина, концепція повністю електрифікованого літака, економічна ефективність, інтелектуальний аналіз даних, методи машинного навчання.

Вступ

Створення нових або модернізація існуючих літальних апаратів базується на використанні наукових досягнень у всіх сферах промисловості. Вміле поєднання цих досягнень з подальшою їх реалізацією в авіабудівній промисловості розширяє тактико-технічні характеристики (ТТХ) та бойовий потенціал існуючих літальних апаратів або сприяє створенню зразків з новими характеристиками (паливно-енергетична та економічна ефективність, розширення можливостей бортового обладнання та озброєння).

Розширення задач літальних апаратів (ЛА) передбачає модернізацію бортових систем та комплексів озброєння або встановлення нових

зразків, що призводить до збільшення споживання електричної енергії. Для реалізації цих задач виникає необхідність підвищення потужності бортової електричної системи живлення. Для поліпшення масо-енергетичних характеристик бортової системи електроживлення необхідно використовувати в системі електричну машину подвійного призначення – стартер-генератор, який використовується спочатку для запуску маршевих двигунів ЛА, а після цього як генератор [1, с. 213...217].

Слід зазначити, що електрифікація літального апарату йде по шляху підвищення ефективності найбільш енергоємних його елементів. В першу чергу, це силова установка і система кондиціонування. Поступово проводяться роботи по

переводу на живлення електричною енергією рульових приводів системи автоматичного управління польотом з метою позбавлення їх від трубопроводів централізованої гідросистеми та тяг в системі управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз робіт [2...6] дав змогу виявити основні тенденції сучасних досліджень за тематикою розвитку електричних машин, який здійснюється в напрямі підвищення їх ККД, зменшення масово-габаритних характеристик та впливу на інше електричне обладнання, що дає підстави стверджувати про **актуальність тематики статті** авторів.

Можливість використання безконтактних електричних машин в режимі стартер-генератора для створення електричної системи запуску для ВТА та поетапне удосконалення літакових систем розглянуто в роботах відомих авіаційних фахівців: Брускіна Д.Е., Зубакіна С.І., Алюшина Г.Н., Торопцева Н.Д та ін. [7, с. 70...77; 8, с. 5...204].

Такий підхід дає можливість відпрацьовувати окремі елементи концепції повністю електрифікованого літака (ПЕЛ) на існуючих моделях літаків шляхом їх модернізації, та дає змогу знизити економічні ризики подальшого невдалого їх впровадження.

Тому **метою даної статті:** є розробка методології інтелектуального аналізу та вибору типу електричної машини для застосування її в системі запуску авіаційних газотурбінних двигунів перспективних літаків військово-транспортної авіації, яка дасть змогу зменшити час та фінансові

витрати на початкових етапах проектування зазначеної системи.

Виклад основного матеріалу

Концепція повністю електрифікованого літака передбачає використання електричної енергії на борту літального апарату як основної. Результатом третього етапу зазначеної концепції, період якого припадає на 2000...2010 рр., стало створення зразків літальних апаратів як цивільного так і військового призначення: Аеробус А380, багатоцільовий винишувач F35, Boeing 787, БПЛА "БАРРАКУДА" [9, с. 40...43].

У зв'язку з нагальністю реалізації вказаної концепції [10, с. 171...176] існуючі повітряні системи запуску повинні бути замінені на електричні прямої дії. Процес проектування електричної системи запуску прямої дії повинен враховувати функціональні задачі літака і ефективність їх виконання.

Для літаків військово-транспортної авіації до функціональної задачі слід віднести – перевезення вантажу (бойова техніка, десант, особовий склад з озброєнням, вантажі) на визначену відстань за розрахунковий його максимальну економічну ефективність (фактор бойових дій не враховується) час. До ефективності – час підготовки, мінімальні витрати палива, експлуатаційна ефективність. На теперішній час, на основі багаторічного досвіду літакобудування розроблено, на наш погляд, основний перелік показників ефективності котрі об'єднані в економічну, схема якої зазначена на Рис. 1 [11, с. 84].

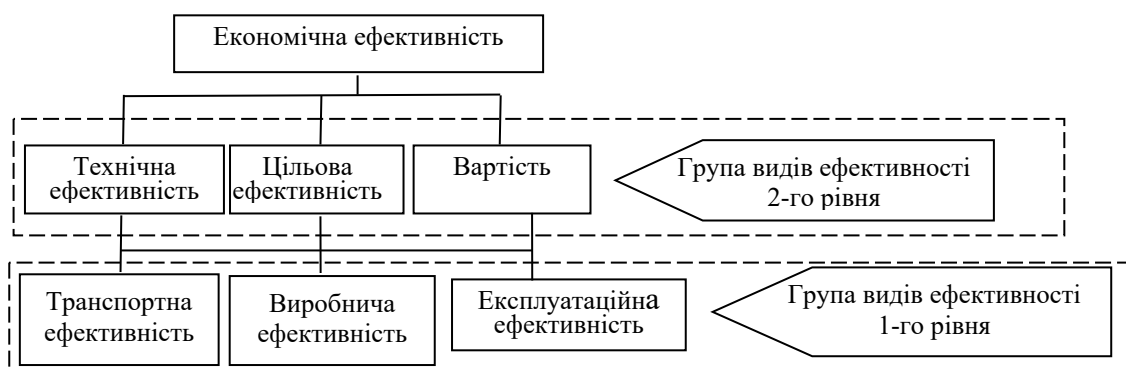


Рис.1. Класифікація показників ефективності літака

Джерело: [11 с. 84]

Класифікація економічної ефективності поділяється на два рівня. До першого рівня відносяться транспортна, виробнича і експлуатаційна, до другого – технічна, цільова та

вартісна (вартість літака, і пов'язані з ним експлуатаційні витрати, котрі необхідні для виконання у визначений строк заданого об'єму перевезень).

Сукупність обох рівнів визначає економічну ефективність. Наявним є той факт, що при створенні нового або модернізації існуючого літального апарата, намагаються отримати максимальну ефективність.

Досягнення поставленої задачі може бути отримано за рахунок найвигіднішого (оптимального) співвідношення льотно-технічних характеристик, технологічних, експлуатаційних властивостей та поміркованих економічних витрат за рахунок впровадження композитних матеріалів, модульного бортового обладнання (систем) побудованих на нових принципах компоновки з використанням сучасної напівпровідникової елементної бази, програмне забезпечення.

Властивості, котрі повинен мати літак, багатозначні, різні по суті і направленості і в залежності від конкретного його призначення і типу різні по ступеню важності і тісно пов'язані між собою і взаємозалежні.

Так, наприклад, маса літального апарату $m_{ЛА}$ представляється як сума мас окремих складових: маса конструкції планера $m_{КП}$, силової установки $m_{СУ}$, системи запуску m_3 , системи електропостачання $m_{СЕП}$, обладнання $m_{ОБ}$, спорядження $m_{СП}$, паливної системи разом з паливом $m_{ПС}$, екіпажу $m_{ЕК}$, вантажу m_B .

Аналітично це можемо представити у вигляді рівняння:

$$m_{КП} + m_{СУ} + m_3 + m_{СЕП} + m_{ОБ} + m_{СП} + m_{ПС} + m_{ЕК} + m_B = m_{ЛА} . \quad (1)$$

Враховуючи, що маса вантажу і екіпажу не пов'язані з польотною масою літака і незалежно від неї їх величини обумовлені проектним завданням і являються фіксованими, тому, під час оцінювання маси літального апарата в подальшому, будемо розглядати маси складових за виключенням зазначених вище.

Розділимо ліву і праву частину рівняння на масу літака $m_{ЛА}$, отримаємо:

$$\xi_{КП} + \xi_{СУ} + \xi_3 + \xi_{СЕП} + \xi_{ОБ} + \xi_{СП} + \xi_{ПС} = 1 \quad (2)$$

Рівняння (2) визначає "існування" літака [4, с. 89]. Відповідно до цього рівняння, літак може існувати (літати) тільки у тому випадку, коли сума його відносних мас при любых змінах параметрів не перевищує одиницю.

Впровадження концепції ПЕЛ дає можливість покращити наступні характеристики літака [12, с. 217...220]:

зменшення втрат потужності авіадвигуна до 30 %;
скорочення маси трубопроводів до 20 %;

скорочення витрати палива до 2 %;
зменшення вартості обслуговування до 60 %;
зменшення маси системи управління літаком за рахунок ПЕЛ до 20 %;
зменшення маси силової установки до 15 %;
підвищення бойової живучості до 10 %.

Зазначені переваги дають змогу збільшити за необхідності вагу літакових систем при їх проектуванні для забезпечення необхідних енергетичних характеристик.

На теперішній час ми можемо говорити про поетапне впровадження концепції ПЕЛ, яке передбачає часткову заміну повітряної і гідравлічної систем літака на електричну.

Поетапна реалізація концепції ПЕЛ суттєво змінюється обрис системи запуску – вона стає електричною прямої дії з використанням електричної машини подвійного призначення – стартера-генератора.

Для вирішення задачі стосовно вибору типу електричної машини для системи запуску необхідно визначити вимоги до самої системи. На основі досвіду експлуатації літальних апаратів можемо виділити такі вимоги [13, с. 5, 6].

1. Авіаційний двигун повинен надійно запускатись при всіх умовах експлуатації ЛА без додаткового регулювання елементів автоматики і паливнорегулюючої апаратури перед запуском.

2. Запуск двигуна на землі повинен бути забезпечений як від бортових, так і від аеродромних джерел енергії, при цьому система запуску повинна забезпечувати перемикання живлення агрегату попередньої розкрутки (електростартера) з бортового джерела на аеродромний і навпаки.

3. Запуск двигунів від бортових джерел енергії повинен бути автономним, а ємність бортових джерел енергії повинна забезпечувати (без їх проміжків дозарядки або дозаправки) послідовні запуски, кількість яких повинно бути як мінімум на одиницю більше числа двигунів на ЛА.

4. Запуск двигуна повинен бути автоматизованим і відповідати наступним вимогам:

- система запуску повинна вмикатися шляхом натискання на пускову кнопку;

- процес запуску до моменту виходу авіаційного двигуна на заданий режим повинен відбуватися автоматично, без виконання додаткових ручних операцій після натискання на пускову кнопку і установки ручки управління двигуном (РУД) в положення яке відповідає запуску;

- автоматика системи запуску повинна забезпечувати стійку роботу авіадвигуна в процесі запуску і виходу на режим малого газу за визначений час;

- система запуску двигуна на землі і в польоті повинна автоматично відключатись і готуватись до наступного запуску;

- на літаках які мають два і більше двигунів система запуску повинна забезпечувати можливість запуску одного з двигунів, а також запуск наступних (як одночасний так і послідовний) з використанням енергії раніш запущених двигунів.

5. Система запуску повинна бути безпечною і при необхідності забезпечувати швидке зупинення процесу запуску.

6. Система запуску повинна мати мінімальні габарити і вагу, а агрегати системи запуску – можливість багатоцільового використання.

7. Система запуску повинна мати низьку вартість виготовлення і технічного обслуговування.

8. Ресурс системи запуску повинен бути співмірним з ресурсом авіаційного двигуна або планера.

У зв'язку з тим, що електрична система запуску, незалежно від типу електричної машини у своєму складі, використовує один вид енергії, то вимоги 1...5 будемо вважати однаковими по складності при їх реалізації.

У подальшому порівняльну оцінку характеристик типів електричних машин проведемо враховуючи вимоги 6...8.

Електричні машини як електромеханічні перетворювачі (ЕП) поділені на три класи: індуктивні електричні машини, у яких робочим полем є магнітне поле; ємнісні ЕП, у яких перетворення електричної енергії в механічну і зворотно здійснюється електричним полем, і індуктивно-ємнісні ЕП, в яких електромеханічне перетворення здійснюється магнітним і електричним полями [14, с. 15...17].

Найбільш поширені для застосування в якості ЕП використовують індуктивні електричні машини котрі по виду живлення поділяють на електричні машини змінного і постійного струму.

Машини змінного струму поділяються на синхронні і асинхронні, колекторні машини змінного струму.

В синхронних машинах (СМ) кутова швидкість ротора ω_p і кутова швидкість магнітного поля ω_c рівні між собою.

В асинхронних машинах (АМ) кутова швидкість ротора не дорівнює кутовій швидкості поля $\omega_p \neq \omega_c$. При цьому ω_p може бути менше або більше кутової швидкості поля. Напрямки обертання ротора і поля статора можуть бути протилежними.

Колекторні машини змінного струму відрізняються від асинхронних і синхронних машин тим, що мають механічний перетворювач частоти і числа фаз – колектор, котрий з'єднаний з обмоткою статора або ротора [15, с. 15...17].

Електричні машини постійного струму (МПС) представляють собою по суті синхронні електричні машини які мають комутаційні пристрої. В залежності від типу комутатора МПС поділяють колекторні і вентильні. В режимах генератора і двигуна електромеханічна комутація струму забезпечується щітково-колекторним апаратом. Безконтактні вентильні МПС мають напівпровідниковий комутатор і виконуються з нерухомими обмотками якоря і полюсами котрі обертаються [15, с. 272, 273].

Класифікація безконтактних електричних машин показана на рисунку 2 [16, с. 11].



Рис.2. Класифікація безконтактних електричних машин
Джерело: [11, с. 11]

Дана класифікація використовується для розмітки баз даних електричних машин в задачах машинного навчання.

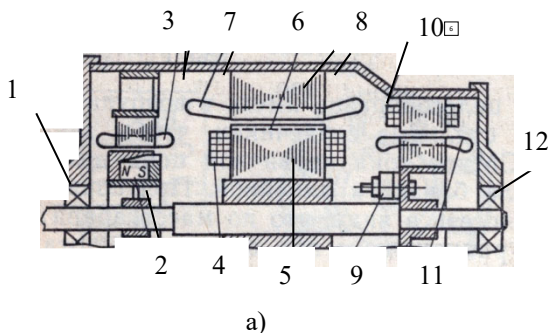
Суміщення функції стартера і генератора об'єднує систему запуску і електропостачання

літака, що вигідно по масі. Збільшення потужності авіадвигунів і заміна постійного струму в системах електропостачання на змінний призвело до зменшення області застосування стартер-генераторів постійного струму. Вони

використовуються для двигунів незначної потужності на легких літаках і вертольотах і іноді для двигунів бортових автономних джерел живлення [17, с. 171]. Враховуючи ці обставини, в подальшому будемо проводити порівняльний аналіз характеристик синхронного генератора і асинхронної машини для застосування їх в електричній системі запуску в режимі двигуна. Генераторний режим електричної машини відноситься до її роботи в системі електропостачання і підлягає окремому розгляду. Відповідно до другого закону електромеханіки всі електричні машини обернені, тобто можуть працювати як в режимі двигуна так і в режимі генератора [14, с. 20...23], тому умови створення стартер-генератора на основі синхронної і асинхронної електричної машини рівнозначні.

Для проведення подальшого аналізу введемо однакові допущення для електричних машин:

1. Діапазон застосування літаків ВТА [17, с. 24]:
 - висота польоту до 13000 м;
 - швидкість польоту до 1.5 М;
 - охолодження стартера – повітряне;
 - допустима частота обертання ротора електричної машини – 10 000 об/хв.
2. Вибір критеріїв для оцінки характеристик (вимоги 6...8):
 - ресурс;
 - надійність (ймовірність безвідмовної роботи);
 - питома вага;
 - допустима частота обертання валу, n_p .



- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. Опорний підшипник | 7. Основна обмотка якоря |
| 2. Індуктор підбуджувача (постійні магніти) | 8. Магнітопровід якоря |
| 3. Обмотка якоря підбуджувача | 9. Випрямляч котрий обертається |
| 4. Основна обмотка збудження | 10. Обмотка збудження збуджувача |
| 5. Магнітопровід ротора | 11. Обмотка якоря збуджувача |
| 6. Короткозамкнена стержнева обмотка (біляча клітка) | 12. Опорний підшипник |

3. Оцінювати безконтактні електричні машини (БЕМ) котрі застосовуються на літальних апаратах з однаковими потужностями.

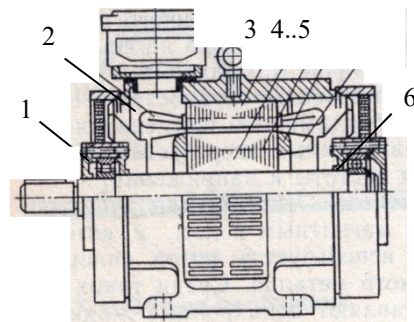
Для прийняття рішення при виборі типу електричної машини (ЕМ) застосуємо апріорні процедури багатокритерійної оптимізації – принцип рівномірної оптимальності [18, с. 43...48].

Кількість альтернатив X і цільові функції $f_1(x) \dots f_n(x)$ задано, цього достатньо для об'єктивного, незалежного від відсутніх у цій моделі факторів (температура, щільність та швидкість повітря) для визначення найвигіднішого рішення. Глобальна якість альтернативи представляє собою суму локальних якостей і має вид:

$$\phi(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x) \dots \dots \dots (3)$$

де: $f_i(x)$ - цільова функція, $i=1 \dots 7$, $f_1(x)$ – номінальна частота обертання, $f_2(x)$ – максимальна частота обертання, $f_3(x)$ – питома вага, $f_4(x)$ – інтенсивність відмов, $f_5(x)$ – ймовірність безвідмовної роботи, $f_6(x)$ – наробіток (години), $f_7(x)$ – ресурс (роки).

Оцінку якості локальних якостей 1...7 – проведемо на основі матеріалів які містяться в науковій літературі і довідкових матеріалах. Аналіз надійності синхронного генератора з обертаючим випрямлячем [16, с. 112] і асинхронної машини з короткозамкненим ротором [16, с. 284] (Рис. 3) проведемо на основі їх конструктивного виконання.



- | |
|-----------------------------------|
| 1. Опорний підшипник |
| 2. Обмотка статора |
| 3. Магнітопровід статора |
| 4. Магнітопровід ротора |
| 5. Обмотка ротора (біляча клітка) |
| 6. Опорний підшипник |

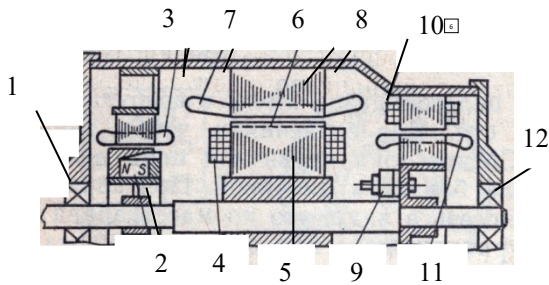
Рис. 3. Ескізи: (а) - синхронного генератора з синхронним збуджувачем і підбуджувачем; (б) - асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором
Джерело: [16, с. 112, 284]

Кожна електрична машина складається з n – елементів, відмова любого з яких веде до її відмови. Таке з'єднання елементів має назву логічна послідовність.

Надійність електричної машини, як системи характеризується потоком відмов Λ , які чисельно дорівнюють сумі інтенсивності відмов його окремих частин:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \dots\dots\dots (4)$$

де: Λ – потік відмов, λ_i – інтенсивність відмови елемента ЕМ, n - кількість елементів.



а)

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. Опорний підшипник | 8. Магнітопровід якоря |
| 2. Індуктор підзбуджувача (постійні магніти) | 9. Випрямляч котрий обертається |
| 3. Обмотка якоря підзбуджувача | 10. Обмотка збудження збуджувача |
| 4. Основна обмотка збудження | 11. Обмотка якоря збуджувача |
| 5. Магнітопровід ротора | 12. Опорний підшипник |
| 6. Короткозамкнена стержнева обмотка (біляча клітка) | |
| 7. Основна обмотка якоря | |

Відповідно до наведених рисунків кількість n – елементів: синхронної машини становить – 12, асинхронної – 6. Логічна послідовність має вид (Рис 4).

$$\rightarrow \lambda_{1c} \rightarrow \lambda_{2c} \rightarrow \lambda_{3c} \rightarrow \dots \rightarrow \lambda_{12c} \rightarrow$$

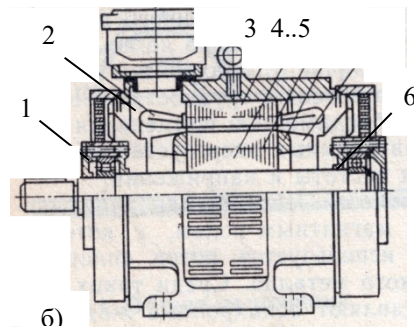
а)

$$\rightarrow \lambda_{1a} \rightarrow \lambda_{2a} \rightarrow \lambda_{3a} \rightarrow \lambda_{4a} \rightarrow \lambda_{5a} \rightarrow \lambda_{6a} \rightarrow$$

б)

Рис.4. Логічна послідовність елементів конструкції СГ (а) і АМ (б)

Джерело: розроблено авторами



б)

- | |
|-----------------------------------|
| 1. Опорний підшипник |
| 2. Обмотка статора |
| 3. Магнітопровід статора |
| 4. Магнітопровід ротора |
| 5. Обмотка ротора (біляча клітка) |
| 6. Опорний підшипник |

Рис. 3. Ескізи: (а) - синхронного генератора з синхронним збуджувачем і підзбуджувачем; (б) - асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Джерело: [16, с. 112, 284]

На підставі структурної схеми і застосувавши формулу 4 отримаємо потік відмов для синхронної - Λ_c і асинхронної Λ_a машин:

$$\Lambda_c = \lambda_{1c} + \lambda_{2c} + \lambda_{3c} + \dots \lambda_{12c} \quad (5)$$

$$\Lambda_a = \lambda_{1a} + \lambda_{2a} + \lambda_{3a} + \lambda_{4a} + \lambda_{5a} + \lambda_{6a} \quad (6)$$

Інтенсивність відмов елементів електричних машин [19, с. 211] становить:

1. Синхронна:

– підшипники ковзання $\lambda_{c1,12} = 2 \times 0.4 \times 10^{-6} 1/200$;

– обмотки $\lambda_{c3,4,7,10,11} = 5 \times 0.045 \times 10^{-6} 1/200$;

– магнітопровід $\lambda_{c5,8} = 2 \times 3.2 \times 10^{-6} 1/200$;

– індуктор $\lambda_{c2} = 2.02 \times 10^{-6} 1/200$;

– короткозамкнена обмотка

$$\lambda_{c6} = 1.2 \times 10^{-6} 1/200 ;$$

– випрямляч котрий обертається

$$\lambda_{c9} = 2.02 \times 10^{-6} 1/200$$

2. Асинхронна:

– підшипники ковзання

$$\lambda_{a1,6} = 2 \times 0.4 \times 10^{-6} 1/200 ;$$

– обмотки $\lambda_{a2} = 0.045 \times 10^{-6} 1/200$;

– магнітопровід $\lambda_{a3,4} = 2 \times 3.2 \times 10^{-6} 1/200$;

– короткозамкнена обмотка

$$\lambda_{a5} = 1.2 \times 10^{-6} 1/200 .$$

Підставивши отримані показники інтенсивності відмов в формули (5), (6) отримаємо значення для потоку відмов:

$$\Lambda_c = 12.665 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (7)$$

$$\Lambda_a = 8.45 \times 10^{-6} \quad (8)$$

Використавши отримані результати потоку відмов визначимо середній наробіток на відмову для синхронної і асинхронної машини за формулами:

$$T_{0c} = 1/\Lambda_c \quad (9)$$

$$T_{0a} = 1/\Lambda_a \quad (10)$$

де: T_{0c}, T_{0a} - середній наробіток на відмову синхронної і асинхронної машини.

Підставивши значення потоку відмов, отримаємо $T_{0c} = 0.079 \times 10^{-6} \text{ год}$, $T_{0a} = 0.2 \times 10^{-6} \text{ год}$.

Ймовірність безвідмовної роботи, наприклад по авіаційному двигуну F109-GA-100 фірми ГЭРРИТТ (США) [20, с. 16, 17] з урахування необхідного ресурсу 1000 годин напрацювання визначимо за формулами:

$$p_c(1000) = e^{-\Lambda_c \times 1000} \quad (11)$$

$$p_a(1000) = e^{-\Lambda_a \times 1000} \quad (12)$$

Підставивши значення потоку відмов, отримаємо: $p_c = 0.9997$, $p_a = 0.9998$.

Чисельні значення ймовірності безвідмовної роботи синхронної і асинхронної машини на часовому інтервалі 1000 годин можемо вважати однаковими. Із-за відсутності паспортних даних на асинхронні двигуни з частотою струму 400 Гц порівняльний аналіз масо-габаритних показників проведемо по довідковим матеріалам (паспортним даним). Синхронні машини типу ГТ [17, с. 98], а асинхронні за розрахунками [21, 18 арк.]. Потужності зазначених електричних машин однакові (табл.1).

Таблиця 1

Паспортні дані синхронного генератора і асинхронного двигуна

Тип машини	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання $n_r, \text{ тис об/хв}$	Максимальна частота обертання $n_r, \text{ тис об/хв}$	Питома вага, кг/кВт×А	Інтенсивність відмов $\lambda, \times 10^{-6}$	Ймовірність безвідмовної роботи	Ресурс, год/років
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Синхронна ГТ120ПЧ6	120	208±2%	6±2%	12	0.72	12.665	0.9997	1500 / 15
Асинхронна *	120	208±2%	8±2%	до 30**	0.414	8.45	0.9998	20000 / 20***

*параметри асинхронної машини отримані в результаті розрахунку асинхронного двигуна підвищеної частоти потужністю 120 кВт для використання в системі запуску газотурбінного двигуна Д-27 [21, 18 арк.] та [22, с. 23...72; 8, с. 5...204; 23, 1 арк.]

**для машин автономної енергетики характерне значення $n_r = (8...30) \text{ тис об/хв}$ [16, с. 45]

***використані параметри двигуна серії АІ по показнику напрацювання обмотки статора [25, с. 295]

Джерело: розроблено авторами за матеріалами [21, 18 арк.; 22, с. 8...72; 8, с. 5...204; 23, 1 арк.; 24, с. 295]

Слід відмітити, що розвиток електричних машин здійснюється за різними напрямками, починаючи від удосконалення конструктивних елементів та заміни новими високотехнологічними матеріалами з метою покращення масово-габаритних характеристик [9, с. 40...43] (Рис. 5), закінчуючи використанням сучасних цифрових та напівпровідникових технологій в частині побудови систем управління електричними машинами.

Результатом технічної еволюції самих електричних машин, використання сучасних технологій інтернету речей та технологій цифрових двійників стали великі масиви даних щодо характеристик машин, які можуть бути використані як вхідні дані методології вибору типу електричної машини для систем запуску авіаційних газотурбінних двигунів.

Наявність таких наборів даних робить можливим вирішення зазначених задач вибору з використання методів інтелектуального аналізу даних, який поєднує в собі підходи машинного

навчання або штучного інтелекту. Кожна електрична машина M_i , $i = [1, ..., N]$ може бути представлена вектором параметрів $X = [x_1, x_2, ..., x_j]$.

Таким чином, набір даних, який описує параметри (характеристики) електричних машин для використання методів інтелектуального аналізу даних, може бути представлений у вигляді фрейму даних наступного вигляду (на прикладі даних, табл.1) (Рис.6).

З погляду методів інтелектуального аналізу даних завдання вибору типу електричної машини для систем запуску авіаційних газотурбінних двигунів можуть передувати задачі класифікації або кластеризації в залежності від логіки дослідження. Розглянемо кожен підхід окремо.



Рис. 5. Шляхи покращення масо-габаритних характеристик електричних машин
Джерело: [9, с. 40...43]

	Power_kW	Voltage_V	RF	Max_RF	Spec_weight	Fail_rate	Prob_FFO	Res_years	Res_hours
ГТ120ПЧ6	120	208	6	12	0.720	12.665	0.9997	15	1500
Asynchronous	120	208	8	30	0.414	8.450	0.9998	20	20000
EM_1	120	208	9	32	0.450	9.210	0.9885	17	14500
EM_2	120	208	13	30	0.450	9.340	0.9875	17	15500

Рис. 6. Приклад фрейму даних, який описує параметри електричних машин
(дві останні машини додані для прикладу і проведення тестування методів)
Джерело: розроблено авторами

Задачі класифікації належать до задач навчання з вчителем та передбачають попереднє навчання моделі на тренувальному розміченому наборі даних, тобто з вказанням типів електричних машин. До такого класу задач відносяться наступні методи: дерева рішень (Decision Tree), метод опорних векторів (Support Vector Machine, SVM), K -найближчих сусідів (K -Nearest Neighbors, KNN) та низка інших методів.

Слід відмітити, що зазначені методи можуть вирішувати як задачі класифікації так і відповідно задачі регресії [24, с. 73]. У зв'язку з тим, що дані методи працюють з різною ефективністю в залежності від типів даних, наприклад, метод рішень, дуже добре працює на невеликих наборах даних категоріального типу, пропонується використовувати метод KNN, в основі якого лежить вимірювання відстаней між об'єктами, описаними цифровими змінними

Алгоритм KNN допоможе нам ідентифікувати

найближчі електричні машини або групи (типи машин) з необхідними нам граничними параметрами. Вирішення такої задачі передбачає використання однієї з метрик відстані між об'єктами дослідження. Найбільш розповсюдженими є “евклідова” (Euclidean Distance) та “Манхеттенська відстань” (Manhattan Distance) [25, с. 258].

“Евклідова відстань” як декартова відстань між двома точками (рис.7), які знаходяться на площині/гіперплощині допомагає нам обчислити чисте зміщення між двома електричними машинами з урахуванням різниці в їх параметрах. Метрика “Манхеттенської відстані” зазвичай використовується, коли нас цікавить загальна відстань між об'єктами дослідження (рис. 8), а не зміщення. Ця метрика обчислюється шляхом підсумовування абсолютної різниці між координатами точок у k -вимірах.

	ГТ120ПЧ6	Asynchronous	ЕМ_1
Asynchronous	18500.010		
ЕМ_1	13000.016	5500.001	
ЕМ_2	14000.014	4500.004	1000.010

Рис. 7. Фрейм даних. “Евклідова відстань” між електричними машинами
Джерело: розроблено авторами

	ГТ120ПЧ6	Asynchronous	ЕМ_1
Asynchronous	18529.521		
ЕМ_1	13028.736	5506.807	
ЕМ_2	14030.607	4508.938	1006.131

Рис. 8. Фрейм даних. “Манхеттенська відстань” між електричними машинами
Джерело: розроблено авторами

Алгоритм класифікації з використанням відстаней передбачає завантаження розмічених фреймів даних (рис. 6) та навчання відповідної моделі, яка дозволить спрогнозувати з певною точністю відношення необхідної нам за вимогами обмежень електричної машини до певного класу машин та навіть “близькість” її до конкретної електричної машини в наборі.

Дані на рисунках 7, 8 демонструють подібні результати, де на перетині колонок та рядок знаходиться значення відстані між електричними машинами. Очевидно, що чим менше це значення, тим ближче за параметрами електричні машини одна до одної.

Задачі кластеризації у машинному навчанні належать до задач навчання без вчителя. Мета кластерного аналізу полягає в тому, щоб розділити набір електричних машин на групи (або кластери), щоб машини в кожній групі були максимально схожі одна на одну за параметрами. Цей процес часто використовується для дослідницького аналізу даних і може допомогти виявити шаблони або

зв'язки в даних, які можуть бути неочевидними. Для кластерного аналізу використовується багато різних алгоритмів, наприклад k-середні, ієрархічна кластеризація та кластеризація на основі щільності [26, с. 166].

Результатом такої кластеризації будуть групи електричних машин з подібними характеристиками без прив'язки до типів, та видів, що дозволить визначати максимально подібну до необхідної за вимогами електричну машину.

Використаний метод починається з обробки кожної електричної машини як окремого кластера, а потім ітеративно об'єднує найближчі кластери, доки не буде досягнуто критерій зупинки. Результатом ієрархічної кластеризації є деревоподібна структура, яка називається дендрограмою, яка ілюструє ієрархічні зв'язки між електричними машинами (Рис. 9), де по горизонталі вказані кластери або ЕМ, а по вертикалі відображено відстані між ними, тобто їх “близькість” за параметрами.

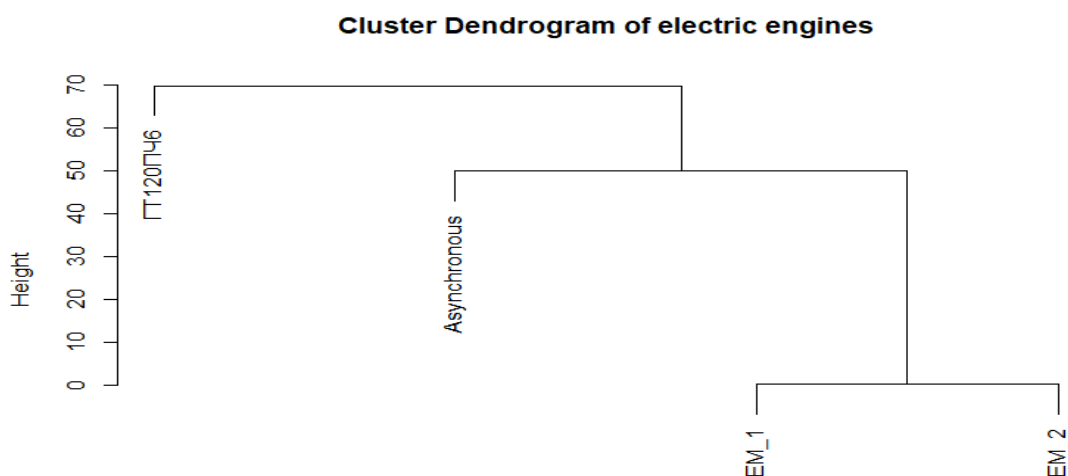


Рис. 9. Дендрограма тестового набору електричних машин
Джерело: розроблено авторами

Таким чином, використання методів аналітичного аналізу даних дозволяє чітко класифікувати електричну машину з необхідними параметрами як таку, що відноситься до відповідного класу (типу) машин, розрахувати її «близькість» до існуючих машин з урахуванням введених обмежень та спростити в подальшому процедури вибору або проектування у разі відсутності готового зразка. Очевидно, що точність методів суттєво залежить від повноти та кількості параметрів в навчальному наборі даних, що накладає певні вимоги щодо його розміру.

Слід відмітити, що змінні в наборі даних мають різні розмірності та масштаби, так потужність вимірюється у Вт то дорівнює 120 Вт, а

ймовірність безвідмовної роботи в безрозмірних одиницях в діапазоні від 0 до 1. У зв'язку з цим, перед застосування інтелектуальних алгоритмів оброблення даних рекомендується нормалізувати дані одним із існуючих методів: Min-Max нормалізація (Рис. 10), або Z-нормалізація (Рис. 11)

На основі отриманих даних (Рис 11) і застосувавши формулу 3, визначимо глобальну якість для синхронної та асинхронної машини відповідно:

$$\phi_c(x) = \sum_{i=1}^7 0.0 + 0.0 + 1 + 1 + 0.99 + 0.0 + 0.0 = 2.99 \dots (13)$$

$$\phi_a(x) = \sum_{i=1}^7 0.285 + 0.9 + 0 + 0 + 1 + 1 + 1 = 4.185 \dots (14)$$

	Power_kW	Voltage_V	RF	Max_RF	Spec_weight	Fail_rate	Prob_FFO	Res_years	Res_hours
ГТ120ПЧ6	1	1	0.0000000	0.0	1.0000000	1.0000000	0.99186992	0.0	0.0000000
Asynchronous	1	1	0.2857143	0.9	0.0000000	0.0000000	1.00000000	1.0	1.0000000
EM_1	1	1	0.4285714	1.0	0.1176471	0.1803084	0.08130081	0.4	0.7027027
EM_2	1	1	1.0000000	0.9	0.1176471	0.2111507	0.00000000	0.4	0.7567568

Рис. 10. Фрейм даних. Нормалізація даних за допомогою методу Min-Max

Джерело: розроблено авторами

	Power_kW	Voltage_V	RF	Max_RF	Spec_weight	Fail_rate	Prob_FFO	Res_years	Res_hours
ГТ120ПЧ6	1	1	-1.0190493	-1.4924050	1.4892520	1.4667307	0.8570889	-1.0914103	-1.4305159
Asynchronous	1	1	-0.3396831	0.4264014	-0.6654105	-0.7823898	0.8718029	1.3339459	0.8960374
EM_1	1	1	0.0000000	0.6396021	-0.4119208	-0.3768544	-0.7908760	-0.1212678	0.2043594
EM_2	1	1	1.3587324	0.4264014	-0.4119208	-0.3074865	-0.9380157	-0.1212678	0.3301190

Рис. 11. Фрейм даних. Z- нормалізація даних

Джерело: розроблено авторами

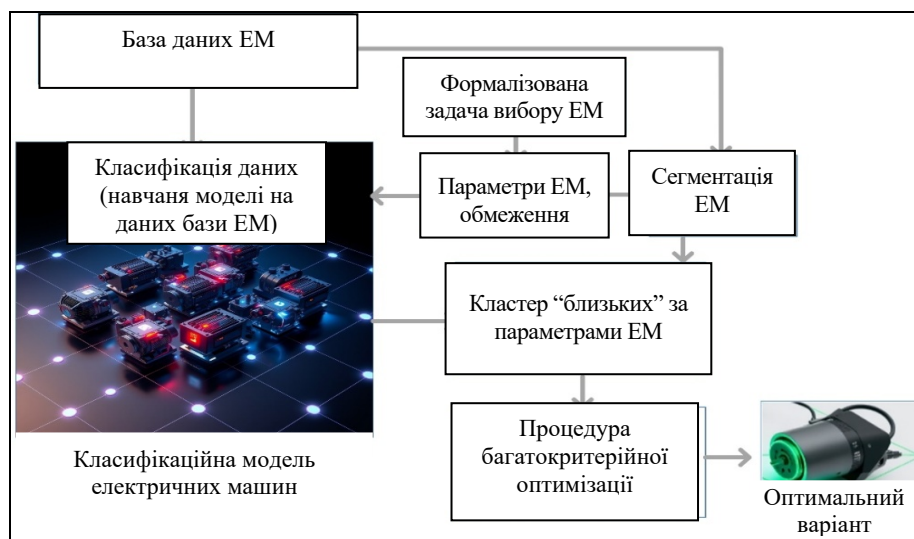


Рис.12. Схема методу інтелектуального аналізу та вибору ЕМ

Джерело: розроблено авторами

Принципова схема інтелектуального аналізу та вибору типу електричної машини для систем запуску авіаційних газотурбінних двигунів на основі поєднання методів машинного навчання та процедури багатокритерійної оптимізації формула

(3) може бути представлена схемою (Рис. 12). Схема описує взаємодію і логіку використання різних методів для вирішення задачі вибору ЕМ. Етап використання методів машинного навчання може бути реалізований заздалегідь на основі

методів класифікації, або паралельно з постановкою задачі вибору ЕМ, коли за заданими вхідними параметрами здійснюється сегментація бази ЕМ, а потім застосовується процедура багатокритерійної оптимізації вже певної кількості ЕМ, які потрапили до одного сегменту.

Висновки

Результати оцінки енергетичних параметрів котрі отримані в процесі побудови методології інтелектуального аналізу та вибору типу електричної машини для систем запуску авіаційних газотурбінних двигунів для перспективних літаків ВТА дозволяють:

визначати асинхронну машину з короткозамкненим ротором як таку, що найбільш доцільно використати в електричній системі запуску перспективних літаків ВТА;

оцінити напрями розвитку технологій які застосовуються для виробництва електричних

машин у майбутньому може змінити пріоритети щодо вибору типу для використання електричній системі запуску;

використати методи аналітичного аналізу даних для більш чіткої класифікації електричних машин з необхідними параметрами як таку, що відноситься до відповідного класу (типу) машин, розрахувати її “близькість” до існуючих машин з урахуванням введених обмежень та спростити в подальшому процедури вибору або проектування у разі відсутності готового зразка.

Подальші дослідження доцільно проводити щодо удосконалення запропонованої методології при проектуванні електричних стартерів (стартер-генераторів) використавши розширену базу даних, яка має бути сформована на достатній кількості визначальних параметрів електричних машин котрі підлягають розгляду.

Список літератури

1. Заріцький І.В., Сторожук С.М., Діденко Ю.Л., Перспективи розвитку електричної системи запуску газотурбінних двигунів військово – транспортних літаків // 36. наук. праць ДНДІА. - К.:ДНДІА, 2016. Вип. № 12(19) - С. 213-217.
2. P. Kolpakchvan, V. Parshukov, E. Yatsenko Determination of Equivalent Circuit Parameters of a Solid Rotor Asynchronous Electric Machine. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. - № 2(9). – pp. 1880-1885. DOI: 10.35940/ijitee.B7909.129219.
3. Левченко Л., Аушева Н., Карасва Н., Бурдєна Н. MODELING OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF ELECTRIC MACHINES. Advanced Information Systems, - 2024. - № 8(1), С. 24-30, DOI: 10.20998/2522-9052.2024.1.03.
4. Victor S. PetrushinN. S. PetrushinB.V. Kalenik. Designing of asynchronous induction machines for adjustable speed asynchronous electric drive systems. 2008. – DOI: 10.7148/2006-0333.
5. J. Li, Guanchun Li. Design and Control of a Superconducting DC Linear Motor for Electromagnetic Launch System Wireless Personal Communications.- №102(1). – 2018. – pp. 611-618. DOI: 10.1007/s11277-017-5068-4.
6. S. Khanahmedova. Some Issues of Increasing the Efficiency of Electric Machines. PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY. - №9(0033-2097). 2024. – P. 171-173.
7. Брускин Д.Э. Зубакин С.И., Самолеты с полностью электрофицированным оборудованием. Сер. Электрооборудование транспорта. – Т. 6 /– М.: ВИНТИ, 1986. – 108 с.
8. Алюшин Г.Н., Торопцев Н.Д., Асинхронные генераторы повышенной частоты. Сер. Основы теории и проектирования – Москва: Машиностроение, 1974. – 343 с
9. Заріцький І.В., Коритько О.І., Вплив четвертої промислової революції на подальший розвиток концепції повністю електрифікованого літака // 36. наук. праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2020. Вип. № 16(23). – С. 40-43.
10. Заріцький І.В., Діденко Ю.Л., Щодо методики синтезу оптимального закону управління асинхронним стартер-генератором електрифікованого літака // 36. наук. праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2017. Вип. №13(20) – С. 171-176.
11. Б.А. Черпенников. Диалектические основы конструирования в самолетостроении. Харьков: Харьковский авиационный институт. (Учебное пособие по курсу “Конструкция самолетов”) 1984. – 128 с. (стор. 82-92);
12. Заріцький І.В., Діденко Ю.Л., Перспективи створення вітчизняного розвідувального літака на основі концепції повністю електрифікованого літака // 36. наук. праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2015. Вип. №12(19) – С. 217-220.
13. Система запуска авиационных двигателей, Методические указания к практической работе., Самарский государственный аэрокосмичный университет им. Академика С.П. Королева., Самара 2002. – 34 с.
14. И.П. Копылов., Электрические машины. Москва: Энергоатомиздат, 1986. - 360 с.
15. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии. Под редакцией доктора технических наук проф. А.И. Бертинова. М.: Энергоиздат, 1982. - 552 с.
16. Д.А. Бут Бесконтактные электрические машины. Учебное пособие для электромех. и электроэнерг. спец. Вузов. – М.: Высш. школ., 1990. – 416 с.
17. Авиационные электрические генераторы. Г.Н. Алюшин, И.М. Ищенко, Д.М. Красношапка, В.С. Мартынюк. Киев.: Киевское ВВАИУ, 1989. -184 с.
18. Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем: М.: Наука., 1986, - 296 с.
19. Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. Надежность электрических машин. Ленинград: Энергия. 1976. - 248 с.
20. Иностранные авиационные двигатели. 11-е издание под редакцией Л.И. Сорокина. ЦИАМ: 1987, - 319 с.

21. Г.Н. Алюшин. Методика розрахунку асинхронного стартера для системи запуску авіаційного двигуна Д-27 (на правах рукопису)., 18 сторінок.
22. Расчет электрических машин переменного тока повышенной частоты. Под редакцией профессора, доктора технических наук Свириденко П.А. Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского 1951. - 189 с.
23. В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович. Электрические машины. Асинхронные машины. Под. ред. И.П. Копылова., М.: Высшая школа. 1988. - 328 с.
24. Nils J. Nilsson. Introduction to machine learning. Robotics Laboratory Department of Computer ScienceStanford University, Stanford, 1998.—188 p.
25. Shai Shalev-Shwartz and Shai Ben-David. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. Cambridge University Press. — 2014. — 449 p. URL. [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://www.cs.huji.ac.il/~shais/UnderstandingMachineLearning/index.html>.
26. Hal Daumé. A Course in Machine Learning. Published by TODO. — 2015. — 193 p.

Надійшла до редколегії 10.11.2024

Схвалена до друку 22.11.2024.

Відомості про авторів

Information about the authors

Заріцький Ігор Володимирович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2510-2946>

Ihor Zaritskyi

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2510-2946>

Заріцький Олег Володимирович

доктор технічних наук
доцент кафедри технологій управління
факультету інформаційних технологій
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6116-4426>

Oleh Zaritskyi

Doctor of Technical Sciences
Associate Professor Department
of Management Technologies
Information Technologies Faculty
Taras Shevchenko National University
Kyiv, Ukraine, 01033
<https://orcid.org/0000-0002-6116-4426>

METHODOLOGY OF INTELLIGENT ANALYSIS AND SELECTION OF THE TYPE OF GAS TURBINE ENGINES FOR PROMISING MILITARY TRANSPORT AIRCRAFT

I. Zaritskyi, O. Zaritskyi

The article deals with topical issues of selecting the type of electric machine for direct-acting aircraft launch systems, which is associated with the transition to the concept of a fully electrified aircraft and, as a result, the use of electric energy on board the aircraft as the main one.

The authors of the article propose a methodology for selecting the type of electric machine for the launch systems of aircraft gas turbine engines of advanced aircraft, which combines modern methods of data mining, machine learning and a priori procedures for multi-criteria optimization - the principle of uniform optimality. A classification of electric machines for airborne launch systems is presented and aircraft performance indicators of two levels are introduced to analyze the impact of the electric machine on operational efficiency. A database of the main parameters has been formed, which make it possible to determine the type of contactless electric machine that should be used in the gas turbine engine launch system of military transport aircraft.

The article proposes and practically considers the use of analytical data analysis methods: classification and clustering, which allow to clearly classify an electric machine with the required energy parameters as belonging to the corresponding class (type) of machines, to calculate its "proximity" to existing machines, taking into account the introduced restrictions and to simplify the subsequent selection or design procedures in the case of absence of a ready-made sample. The specified classification and clustering methods are proposed to be used before applying the a priori multi-criteria optimization procedure using the introduced classification of electric machines as data labels, which allows to carry out a qualitative analysis of electric machines in terms of their characteristics, which are used later in the multi-criteria optimization algorithm.

The research results allowed to draw conclusions regarding the priority of using an asynchronous machine with a squirrel-cage rotor in the electric start system of military transport aviation aircraft, taking into account the introduced restrictions.

Keywords: asynchronous machine, synchronous machine, fully electrified aircraft concept, economic efficiency, data mining, machine learning.