

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри  
канд. техн. наук, доц.  
\_\_\_\_\_ О.В. Попов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**  
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ  
«МАГІСТР»

**Тема: «Керування процесом технічного обслуговування компонентів  
повітряних суден»**

**Виконав:** \_\_\_\_\_ **К.В. Стечок**

**Керівник: канд. наук, доц.** \_\_\_\_\_ **Р.М. Салімов**

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**охорона праці: канд. техн. наук, доц.** \_\_\_\_\_ **В.І. Казанець**

**охорона навколишнього середовища:**  
**докт.біолог. наук, проф.** \_\_\_\_\_ **В.Д. Савицький**

**Нормоконтролер** \_\_\_\_\_

## НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аерокосмічний факультет  
Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден  
Освітній ступень «Магістр»  
Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»  
Освітньо-професійна програма «Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів»

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
канд. техн. наук, доц.  
\_\_\_\_\_ О.В. Попов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

### ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи**  
СТЕЧКА КОСТЯНТИНА ВІКТОРОВИЧА

1. Тема роботи: **«Керування процесом технічного обслуговування компонентів повітряних суден»**

затверджено наказом ректора від 02 листопада 2019 року № 2676/ст.

2. Термін виконання роботи: з 14 жовтня 2019 р. по 29 грудня 2019 р. та з 20 січня 2020 р. по 09 лютого 2020р.

3. Вихідні дані до роботи: статистичні дані з результатів експлуатації повітряних суден, нормативно-правова документація з підтримання льотної придатності авіаційної техніки, вимоги та умови виконання робіт з технічного обслуговування компонентів повітряних суден.

4. Зміст пояснювальної записки: проектування структури і опис схеми роботи цифрового двійника, вибір сценаріїв для реалізації, опис роботи і реалізації методу ідентифікації і діагностики, розробка методів розрахунку параметрів, області застосування цифрового двійника.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: схема досліджень, функціональна схема цифрового двійника, інтерфейси програм для реалізації сценаріїв діагностики і ідентифікації, структура нейронної мережі, графіки залежності параметрів.

6. Календарний план-графік

Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
Аналіз сучасних методів керування процесом технічного обслуговування компонентів повітряних суден	10.11.19 – 14.11.19	
Аналіз застосування цифрових двійників як сучасний метод контролю технічного стану компонентів повітряних суден.	15.11.19 – 19.11.19	
Аналіз основних питань впровадження цифрових двійників для контролю технічного стану	20.11.19 – 24.11.19	
Розробка сценарію діагностики технічного стану компонентів повітряного судна	25.11.19 – 30.11.19	
Розробка програми для реалізації сценарію діагностики компонентів повітряних суден	01.12.18 – 13.12.19	
Розробка нейронної мережі для діагностики компонентів та її тестування	14.12.18 – 27.12.19	
Виконання окремих розділів роботи: охорона праці, охорона навколишнього середовища	05.01.20 – 19.01.20	
Попередній захист дипломної роботи	20.01.20 – 24.01.20	

7. Консультанти по окремих розділам

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Канд. техн. наук, доцент Казанець В.І.		
Охорона навколишнього середовища	Докт. біолог. наук, професор В.Д. Савицький		

8. Дата видачі завдання: «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 року.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: «Керування процесом технічного обслуговування компонентів повітряних суден»:

с., 33 рис., 4 табл., 12 джерела

Об'єкт дослідження – процес управління якістю технічного обслуговування авіаційної техніки в межах використання технології цифрових двійників.

Предмет дослідження – комплекс робіт з розробки та впровадження технології цифрових двійників в процес діагностики авіаційної техніки.

Мета дипломної роботи – забезпечення якості робіт авіаційних спеціалістів при ТО з використанням технології цифрових двійників для підвищення ефективності заходів, що спрямовані на оптимізацію технічного обслуговування

Для реалізації поставленої мети в роботі поставлені наступні задачі:

- дослідити сучасні методи контролю технічного стану ГТД;
- проаналізувати перспективи використання цифрових двійників;
- провести аналіз моделі поведінки двигуна під час експлуатації;
- розробити методикау ефективного впровадження цифрових двійників в процес діагностики технічного стану ГТД.

Методи дослідження.

Для рішення поставлених задач застосовувалися елементи теорій надійності, та методи математичного та комп'ютерного моделювання.

У даній роботі була розглянута архітектура цифрового двійника, що дозволяє збирати інформацію з аналізованих об'єктів, зберігати її в базу даних і аналізувати її, з можливістю навчання на попередніх результатах.

Описано метод реалізації сценаріїв у вигляді додатку. Для отримання інформації та аналізу використовуються SPARQL-запити. Для отримання залежності параметрів реалізована нейронна мережа з сигмоїдальною активаційною функцією, що навчається методом зворотного поширення помилки.

**ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, СЦЕНАРІЙ ДІАГНОСТИКИ, СЦЕНАРІЙ ІДЕНТИФІКАЦІЇ, БАЗА ЗНАНЬ, НЕЙРОННА МЕРЕЖА, БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА, ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, АВІАЦІЙНА ТЕХНІКА.**

## Зміст

ВСТУП.....	10
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК.....	9
1 ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ЯК СУЧАСНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНИХ ГТД.....	13
1.1 Методи контролю технічного стану авіаційних ГТД.....	13
1.2 Базова концепція технології цифрових двійників.....	15
1.3 Загальні вимоги , що пред'являються до цифрових двійників.....	19
1.4 Функціональна схема цифрового двійника та повний опис взаємодії елементів функціональної схеми.....	21
1.5 Поточна реалізація цифрових двійників.....	24
1.6 Сценарії реалізації цифрових двійників.....	26
1.7 Постановка задачі та схема проведення досліджень.....	27
2 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ СЦЕНАРІЮ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОМПОНЕНТІВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН.....	29
2.1 Метод реалізації сценарію діагностики.....	29
2.2 Опис програмної реалізації цифрового двійника.....	30
2.3 Взаємодія з базами знань і базами даних.....	31
2.4 Загальний принцип SPARQL запитів та реалізація запиту.....	32
2.5 Необхідні бібліотеки для програмної реалізації.....	35
Висновки до розділу 2.....	37

Отформатированная таблица

3 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ СЦЕНАРІЮ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОМПОНЕНТІВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН.....	38
3.1 Методи реалізації сценарію діагностики цифрових двійників.....	38
3.2 Поняття нейронної мережі та її структура.....	39
3.3 Види нейронних мереж .....	44
3.4 Створення нейронної мережі та необхідні для неї бібліотеки.....	45
3.5 Навчання нейронної мережі.....	48
3.6 Використання технології багаторівневого моделювання.....	51
3.7 Тестування системи.....	53
3.7.1 Реалізація сценарію діагностики.....	54
3.7.2 Реалізація сценарію ідентифікації.....	56
Висновки до розділу 3.....	61
4 ОСНОВНІ ПИТАННЯ, ПОВ'ЯЗАНІ З ВПРОВАДЖЕННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ.....	62
4.1 Основні проблеми впровадження цифрових двійників для проведення діагностики компонентів авіаційної техніки.....	62
4.2 Перспективи використання цифрових двійників.....	63
4.3 Приклади використання цифрового двійника для моделювання поведінки двигуна під час експлуатації.....	67
4.4 Тепловий стан охолоджувальної турбіною лопатки та її розрахунок.....	70
Висновки до розділу 4.....	72
5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	73
5.1 Аналіз екологічної безпеки авійного двигуна.....	73

Отформатированная таблица

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

5.2	Забезпечення екологічної безпеки.....	73
5.3	Розрахунок контрольного параметра емісії двигуна на відповідність їх нормам льотної придатності.....	74
5.4	Заходи, що підвищують екологічну безпеку авіаційного двигуна.....	79
	Висновки до розділу 5.....	82
6	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	83
6.1	Небезпечні і шкідливі виробничі фактори при технічному обслуговуванні двигуна (ДНАОП 5.1 30-1.06.98, ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ, ГОСТ 12.0.003 74 ССБТ).....	83
6.2	Організаційні та конструктивно-технологічні заходи щодо зменшення рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	84
6.3.1	Розрахунок шуму вентилятора.....	85
6.3.2	Загальні висновки і рекомендації.....	69
6.4	Пожежна і вибухова безпека при технічному обслуговуванні ВМД.....	86
6.5	Загальні вимоги безпеки при технічному обслуговуванні двигуна.....	90
6.5.1	Вимоги до технологічних процесів.....	90
	Висновки до розділу 6.....	92
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	71
	СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ	72
	ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

8

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: интервал после: 0 пт

Отформатировано: По центру, Отступ: Выступ: 0,35 см, интервал после: 0 пт

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру, Отступ: Выступ: 0,35 см, Справа: 0,02 см

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК І ТЕРМІНІВ

CAD (Computer-Aided Design) - система автоматизованого проектування;

DTA (Digital Twin Aggregate) - агреговані двійники;

DTI (Digital Twin Instance) - цифрові двійники-екземпляри;

DTP (Digital Twin Prototype) - цифрові двійники-прототипи;

FEA (Finite Element Analysis) - метод скінченних елементів;

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) - аналіз видів і наслідків відмов;

HMI(Human-machine interface) - людино-машинний інтерфейс;

NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) - генетичний алгоритм сортування без домінування;

RDF(Resource Description Framework) - середо опису ресурсу;

SPARQL(SPARQL Protocol and RDF Query Language) - протокол SPARQL і мова запитів RDF;

АТ - авіаційна техніка;

БП - безпека польотів;

ГТД – газотурбінний двигун.

ЕОМ - електронно-обчислювальна машина;

ЖЦ - життєвий цикл;

ІСАО - міжнародна організація цивільної авіації;

НМ - нейронна мережа;

СУБД - система управління базами даних;

СУБЗ - система управління базами знань;

ЦД - цифровий двійник;

ЦФ - цільова функція;

ШНМ - штучна нейронна мережа;

## ВСТУП

На сьогоднішній день автоматизація виробничих процесів просунулася далеко вперед. Проводиться велика модернізація, розроблено безліч систем управління і стеження, роботу контролюють безліч датчиків і приладів, багато процесів тепер виконуються автоматично. Інформація, вироблена щодня на таких підприємствах, вимірюється в терабайтах. Для контролю і аналізу робіт потрібно відпрацювати цей обсяг даних і традиційні методи обробки інформації вже не є ефективними. Тому розробка системи, аналізує великий потік відомостей в реальному часі, є на сьогодні актуальним завданням.

У пошуках рішення для роботи з можливістю контролю систем, обробкою показників, прогнозування і при цьому мінімізації будь-яких втрат, з'явилася і ідея цифрового двійника.

Цифровий двійник (ЦД) являє собою програмно-аналітичний комплекс, що повторює дані з контрольованого пристрою і здатний аналізувати інформацію, зберігати її та видавати рекомендації користувачеві. Так само в можливості цифрового двійника входить віртуальне моделювання як всієї системи, так і окремих об'єктів. Таким чином, застосовуючи його, підвищується точність необхідних обчислень при контролі виробничого процесу.

Змоделювавши таку систему, можна відстежувати не тільки процес створення продукту, але і його характеристики, з можливістю коригування в момент експлуатації, інакше кажучи, керувати всіма факторами, впливають на якість і ціну виробництва. завдяки такому моделюванню існує можливість показати залежність стану об'єкта при зміні будь-яких характеристик.

Особливість цифрових двійників полягає ще і в їх навченості, максимальне використання попереднього досвіду при створенні нового продукту. Існує і можливість подальшого планування, що сильно відрізняє роботу цифрового двійника від стандартного моделювання. З огляду на отримані раніше параметри, двійник може прогнозувати поведінку і показники продукції в режимі експлуатації.

Як приклад, може бути розглянуто виробництво двигуна. Обговорюючи з замовником умови експлуатації, з'являється можливість прогнозувати поведінки двигуна і на підставі даних, отриманих від цифрового двійника, обговорювати додаткові характеристики пристрою. Це теж, як відомо, входить в можливості цифрового двійника. Володіючи цією інформацією, з'являється можливість передбачати всі недоліки роботи ще на стадії виробництва.

Область застосування цифрового двійника актуальна для виробництв, де:

1. Продукція матиме тривалий життєвий цикл;
2. Велика кількість встановленого обладнання;
3. Непередбачені умови експлуатації;
4. Необхідність в моніторинг і контроль стану продукції.

До таких виробництв нафтовидобувні, енергетичні, машинобудівні комплекси, виробництво авіабудівне та інші.

Важливим показником є наявність обладнання, що створює великий обсяг інформації. Так як для коректної роботи цифрової двійник повинен спиратися на дані, отримані з датчиків. Чим більше обсяг одержуваної інформації і вона актуальніше, тим більше його ефективність і точніше результат.

З цих же причин, при роботі підприємства з цифровим двійником, важливо враховувати структура підприємства. Практична цінність цифрового двійника, здебільшого, полягає в:

1. Швидкості прийняття технічних рішень;
2. Точна оцінка технічного стану компонента;
3. Фіксація і перенесення досвіду для подальших фахівців;
4. Мінімізація числа фізичних випробувань;
5. Виявлення ризиків та недоліків на ранній стадії.

Дана магістерська робота присвячена розробці методів, що реалізують сценарії цифрового двійника, а саме сценарій ідентифікації та діагностики. За виконання сценарію діагностики повинен аналізувати вхідний сигнал і встановлювати можливість виникнення помилки і передбачувати її рішення. За сценарієм ідентифікації по вхідних і вихідних параметрів досліджуваного об'єкта повинна визначатися функція залежності і виконуватися наступна параметрична оптимізація.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ЯК СУЧАСНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНИХ ГТД**

#### **1.1 Методи контролю технічного стану авіаційних ГТД**

Сучасні газотурбінні двигуни є дорогими виробами, вартість їх ремонту також дуже висока, тому збільшення ресурса економічно вигідно за умови забезпечення високого рівня надійності двигунів. Це може бути досягнуто насамперед шляхом впровадження технічної діагностики, що дозволяє виявляти несправності двигуна на ранній стадії їх розвитку. Впровадження засобів і методів діагностики дозволяє запобігати відмови двигунів у польоті і тим самим максимально використовувати індивідуальні можливості експлуатації кожного двигуна без виконання примусових ремонтів. Крім того, впровадження діагностики дозволяє попереджати вторинні руйнування двигунів і тим самим зменшувати витрати на відновлення відмовили двигунів.

Для технічної діагностики двигунів використовують і вдосконалюють такі основні методи:

- візуальний огляд та огляд за допомогою оптичних пристроїв;
- методи неруйнівного фізичного контролю;
- контроль вібрації двигуна;
- контроль стану масла, що характеризує стан вузлів, що омиваються маслом;
- контроль параметрів, що характеризують стан ГТД.

Авіаційний газотурбінний двигун є складним виробом, і жоден з перерахованих методів окремо не може дати достовірну оцінку його технічного стану. Тільки вдосконалення методів комплексної оцінки може підвищити достовірність контролю технічного стану газотурбінного двигуна.

Метод візуального огляду є оперативним видом контролю технічного стану корпусів двигуна, герметичності паливної та масляної систем силової установки, вхідних напрямних апаратів і лопаток перших ступенів компресорів та останніх

ступенів турбіни, а також інших доступних елементів двигуна і систем силової установки. Проте найбільш навантаженими в двигуні є перші ступені турбіни, камери згорання, останні ступені компресора, опори трансмісії двигуна і інші елементи, які часто недоступні для візуального контролю.

Для контролю окремих конструктивних елементів двигуна використовуються різні методи неруйнівного фізичного контролю, такі як струмовихровий, ультразвуковий, магнітний. Однак зазначені методи вимагають великих трудовитрат і мають обмежені сфери застосування. Тому вони використовуються, як правило, як додаткові види контролю для уточнення характеру дефекту.

Під контролем вібрації зазвичай мають на увазі контроль інтенсивності загальної вібрації двигуна. Корпуси авіадвигуна відчувають вібрації, породжувані обертовими вузлами і автоколивальними процесами в газо - повітряний тракті в широкому діапазоні частот. Найбільш небезпечні вібрації, викликані невідповідними відцентровими силами. Частотний діапазон таких вібрацій знаходиться в межах від 50 до 300 Гц і залежить від величини дисбалансу обертових частин роторів двигуна. В даний час всі літаки з ГТД обладнані вібровимірювальною апаратурою, що дозволяє проводити контроль загальної вібрації двигуна в низькочастотній області, інтенсивність роторної вібрації.

Найпростішими способами контролю зношування деталей є: періодичний контроль наявності стружки на маслофільтрах, установка і контроль магнітних пробок і сигналізаторів стружки. Магнітні пробки і сигналізатори стружки встановлюють в трубопроводах відкачування масла, в коробках приводів і редукторах. Зазначені методи контролю дозволяють в ряді випадків виявляти початкові руйнування зношуваних деталей, що омиваються маслом. Аналіз стану частинок, що вловлюються магнітними пробками або фільтрами, може дозволити часто визначити причину їх появи.

## **1.2 Базова концепція технології цифрових двійників**

Термін DigitalTwins («цифрові двійники») з'явився ще на початку 2000-х, але з кожним роком, у міру розвитку технологій, він отримує нове наповнення. Базова концепція не складна для розуміння: моніторинг фізичного об'єкта здійснюється на основі замкнутого циклу інформаційного обміну між ним і його віртуальною моделлю (тим самим цифровим двійником).

Виробничі компанії використовують цифрові моделі для випуску нових виробів. Ця практика поширена досить давно, але раніше в більшості випадків після отримання готового продукту віртуальну модель відправляли в архів. У концепції цифрового двійника віртуальна модель не відкидається після створення матеріального об'єкта, а використовується в зв'язці з фізичним протягом усього життєвого циклу: на етапі тестування, доопрацювання, експлуатації та утилізації. Фізичний об'єкт використовує датчики, які збирають дані про стан об'єкта в реальному часі, після чого ці дані надсилаються цифровому двійникові. На основі отриманих даних уточнюється цифрова модель, яка, в свою чергу, дає рекомендації щодо оптимізації режиму експлуатації та обслуговування реального об'єкта. Наприклад, пророкує ймовірність відмови певного вузла, уточнює час профілактичного обслуговування, проведення технічного огляду, зміни фільтрів і так далі.

Виробничі активи генерують мільйони точок даних, цінність яких можна аналізувати. Цифрові двійники допомагають підвищити ефективність платформи, вирішити проблеми проектування на ранньому етапі, навчити співробітників, забезпечити підтримку інноваційних розробок та багато іншого.

Всі зацікавлені сторони мають доступ до одних і тих же постійно оновлюється цифровим двійникам з будь-якої точки світу, що забезпечує їх ефективну роботу.

Вперше повноцінно ця концепція була описана в Мічиганському університеті в 2002 р. Зараз цифровим двійником називають віртуальну модель, яка на мікро- і макрорівні або описує реально існуючий об'єкт (виступаючи як дубль готового конкретного виробу), або лежить в основі майбутнього об'єкта. При цьому будь-яка

інформація, яка може бути отримана при тестуванні фізичного об'єкта, повинна бути отримана і на базі тестування його цифрового двійника.

Зараз поширена класифікація, що включає три типи двійників:

- цифрові двійники-прототипи (DigitalTwinPrototype, DTP);
- цифрові двійники-екземпляри (DigitalTwinInstance, DTI) ;
- агреговані двійники (DigitalTwinAggregate, DTA).

DTP-двійник характеризує фізичний об'єкт, прототипом якого він є, і містить інформацію, необхідну для опису і створення фізичної версії об'єкта. Ця інформація включає вимоги до виробництва, анотований тривимірну модель, специфікацію на матеріали, процеси, послуги та утилізацію.

DTI-двійники описують конкретний фізичний об'єкт, з яким двійник залишається пов'язаним протягом усього терміну служби. Двійники цього типу зазвичай містять анотований 3D-модель із загальними розмірами і допусками, специфікацію на матеріали, в якій перераховані поточні і минулі компоненти, специфікацію на процеси з перерахуванням операцій, які були виконані при створенні цього фізичного об'єкта, а також результати будь-яких тестів на об'єкті, записи про сервісне обслуговування, включаючи заміну компонентів, операційні показники, результати тестів і вимірювань, отримані від датчиків, поточні та прогнозовані значення параметрів моніторингу.

DTA-двійники визначаються як обчислювальна система, яка має доступ до всіх цифрових двійникам-екземплярів і може посылати їм запити в режимі випадкових або проактивних опитувань.

Рішення з використанням цифрових двійників будуються на цілому комплексі технологій. Віртуальна модель, як правило, знаходиться в хмарі. Для побудови комплексної моделі цифрових двійників застосовуються різні інструменти, зокрема, використовуються чисельні методи моделювання фізичних процесів в матеріалах об'єкта з метою прогнозування реакції виробу на різні експлуатаційні навантаження, наприклад, на базі методу скінченних елементів (FEA - FiniteElementAnalysis). Також застосовуються CAD (Computer-AidedDesign)-моделі, які несуть інформацію про

зовнішній вигляд і структуру об'єктів, інформацію про матеріали, процесах, розмірах і інших параметрах. Використовуються також FMEA-моделі (Failure Mode and Effects Analysis - «аналіз видів і наслідків відмов»), засновані на аналізі надійності систем. Вони можуть об'єднувати математичні моделі відмови зі статистичною базою даних про режими відмови.

Цифрова модель містить також історію обслуговування та експлуатації виробу. У сукупності всі ці дані дозволяють прогнозувати поведінку реального об'єкта. Крім того, можливий моніторинг і тестування цілого парку об'єктів та проведення аналізу на основі агрегованих даних.

Важливо відзначити, що в цифрових двійників задіяні і технології машинного навчання, тому що вони є, по суті, самонавчається, які використовують інформацію з цілого ряду джерел, включаючи дані з датчиків, які здійснюють моніторинг різних показників робочого стану фізичного об'єкта, відомості від фахівців-експертів і від інших подібних машин або парків машин, а також більших систем, частиною яких може бути спостережуваний фізичний об'єкт, технології які використовуються в цифрових двійниках зображені на рисунку 1.1.

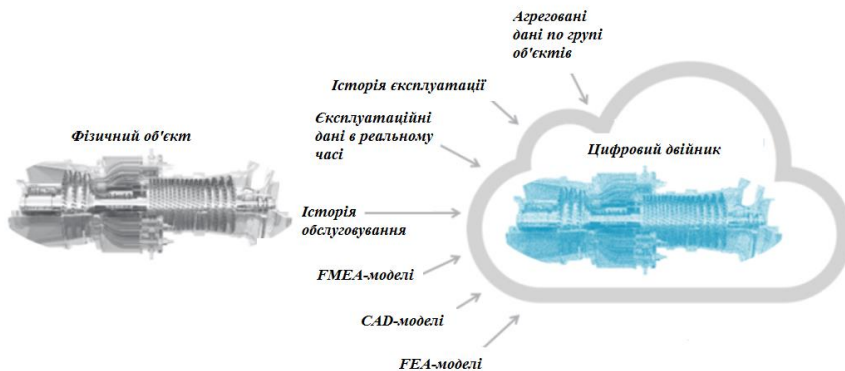


Рисунок 1.1 - Технології які лежать в основі «Цифрових двійників»

Симбіоз з технологіями інтернету речей є драйвером для розвитку обох технологій. Цифрові двійники отримують реальні дані з датчиків, які здійснюють моніторинг реальних об'єктів, в той час як інтернет речей забезпечує збір і аналіз даних з різного роду сенсорів і дозволяє зробити цей процес економічним і ефективним.

Коротко простежуючи історію розвитку концепції цифрових двійників, можна сказати, що з того моменту, як людина почала створювати матеріальні вироби, він використовував віртуальні моделі-двійники. Спочатку він створював їх в своїй уяві, потім на папері, потім в комп'ютері, а тепер і в хмарі, використовуючи розумні датчики, інтернет речей, штучний інтелект. На кожному новому етапі в концепцію додавалися нові цифрові технології і методи моделювання, прогнозування, аналізу, навчання.

Щоб такий механізм запрацював, інженери забезпечують майбутній збір даних з тисяч місць кожного агрегату ще на етапах проектування і виробництва двигуна. Потім ці дані використовуються для створення цифрової моделі, яка відстежує і контролює пристрій в режимі реального часу, поставляючи авіакомпанії протягом усього його життєвого циклу необхідну інформацію, наприклад температуру двигуна, тиск і швидкість повітряного потоку.

Впроваджуючи цифрових двійників і створюючи віртуальну модель агрегату, експлуатуючі організації можуть отримувати ранні попередження, прогнози і навіть план дій, моделюючи сценарії «що-якщо», засновані на інформації про погоду, продуктивності, експлуатаційних моментах, багатьох інших змінних і допомагають підтримувати повітряні судна в робочому стані якомога довше.

Компанія GE допомогла розробити перший в світі цифровий двійник для шасі літака. Датчики були розміщені на типових місцях ймовірних відмов цього агрегату, таких як гідравлічний тиск і температура гальма, щоб забезпечити надходження даних в реальному часі і здійснити раннє передбачення збоїв або визначити строк, що залишився служби шасі.

Маючи такого роду дані, інженери і IT-служби можуть порівнювати інформацію, зібрану датчиками, з цифровим двійником, який здатний проходити

через ті ж самі робочі режими, піддаючись регулярному зносу, що і реальний двигун, включаючи зліт і політ при різних погодних умовах. Якщо два набори даних не збігаються, то може бути відправлений запит на проведення технічного обслуговування.

Згідно з аналітичними даними, компанії, які інвестують в технологію цифрових двійників, отримують 30% -ве тимчасове поліпшення циклу критичних процесів, включаючи техобслуговування.

### **1.3 Загальні вимоги , що пред'являються до цифрових двійників**

Цифровий двійник повинен виконувати функції пристрою, контролюючого і оптимізуючого процес виробництва. Для того, щоб він приносив дійсно користь підприємству та окупався в собівартості, необхідно реалізувати систему, що задовольняє певним вимогам, без яких його потенціал не буде витрачений максимально. Структура системи повинна враховувати отримання інформації, оптимальність доступу до неї, автоматичне взаємодія з наступними пристроями.

Таким чином, до вимог до системи можна віднести:

Зберігання інформації про регламентні значеннях параметрів. Припустимо, що ЦД має прямий доступ до джерела інформації і може в режимі реального часу безперервно отримувати її. Але в чому тоді сенс? Для початку, потрібно ідентифікувати сам вхідний сигнал: його приналежність до системи, одиницю виміру і т.д. Далі, його необхідно проаналізувати. Як мінімум, визначити, чи входить сигнал в допустимі межі.

Для такого рішення система повинна міркувати, маючи якусь логіку, факти і правила. Також необхідно охопити великий спектр інформації і для подібних завдань система повинна самостійно підтримувати правила логічного висновку. Тому для такого випадку необхідні бази знань. В даному випадку границі можна отримати, використовуючи бази знань з заданими значеннями з регламенту. Таким чином, тільки для первинного аналізу вже потрібно звернення до додаткових даних, так як

кордони можуть бути різними, також як і сигнал. Даний етап не можна упускати, адже якщо кордони не будуть задані, подальша робота буде вже некоректна.

Нехай це був перший крок при надходженні сигналу. Що далі? Далі, слідуючи основних функцій ЦД, система повинна вміти прогнозувати подальшу поведінку контрольованого пристрою або підбирати значення оптимальної роботи виробництва, інакше кажучи, вплинути на роботу контрольованого пристрою. Для цього необхідно зрозуміти залежність надходження сигналу від інших параметрів. Щоб знайти цю залежність, необхідні значення тих самих, інших параметрів. Для зберігання цієї інформації необхідні бази даних (БД). В БД може міститися накопичувальна інформація про вхідні сигнали, але не задана їх приналежність один до одного.

Швидкий пошук інформації про параметри, помилки і причини їх виникнення. Для того, щоб система не простоювала, адже робота ЦД повинна підтримувати роботу в режимі реального часу, дані, необхідний швидкий пошук даних, необхідних для аналізу. Звичайні запити системи керування базами даних (СКБД) можуть дозволити витягти великий обсяг інформації про попередні показники. Однак, для того, щоб надіслати запит, необхідно знати параметри, за якими буде здійснюватися його реалізація. Для цього, початковий сигнал повинен не на пряму підключатися до БД, а взаємодіяти з нею через обробник. Нехай це буде блок інформаційно-вимірювальних систем, який буде приводити обробляти вхідний сигнал і вже його, в обробленому вигляді, записувати в БД.

Отже, потрібно отримати можливість впливати на управління вхідним параметром і привести його до бажаного виду, за допомогою зміни параметрів, від яких він залежить. Іншими словами, виконати оптимізацію. Для виконання цього завдання потрібно мати певний набір інформації, а саме: що потрібно оптимізувати, як визначити залежність і куди виводити результат.

Як бути з визначенням залежності параметрів? БД не може мати у своєму розпорядженні такої інформації у вигляді готових формул. Це була б неправильна запис і неоптимальна, так як система повинна бути навченою і підлаштовуватися під певні ситуації. Так як кожен раз надходять нові значення, без певної залежності, її необхідно визначати. Повертаючись до задачі знаходження залежності параметрів,

варто відзначити, що це трудомісткий процес, який найкраще реалізовувати окремим блоком. Завдання буде ускладнювати можливість залежності як лінійної, так і нелінійної. Якби вони були спочатку відомі, то це скоротило б процес обробки інформації, але так як завдання ЦД наближені до реальних, то в реальних умовах допустима невизначеність цього показника. Для вирішення такого роду завдань вирішено використовувати нейронну мережу (НМ), як найбільш ефективний спосіб, на якого не впливає тип системи. Нехай це буде блок ідентифікації, спрямований на визначення цієї самої залежності. Нову модель необхідно перевести в цифровий вигляд, а після протестувати.

Для тестування моделей необхідне середовище випробування моделей. Як такого середовища можуть бути використані такі програми, як MATLAB, в якій можна було б зберігати вже готові формули і уявлення моделей, але таке рішення не оптимально, кожен випадок вимагає індивідуального обчислення. Після знаходження залежності, коли відомі параметри, від яких залежить поточний сигнал і їх зв'язок, можна приступити до оптимізації. Завдання оптимізації повинна бути аналогічно реалізована в окремому блоці. Як повинна проводитися? Методи багатокритеріальної оптимізації, реалізовані на багатьох програмних мовах. Після отримання оптимальних значень, їх необхідно передати пристрою, щоб воно відрегулювала параметри відповідно до знайдених. Результуючі дані повинні відправлятися на блок, який повинен передати значення в об'єкт управління. Використовуючи всі дані, пов'язані з вимогами реалізації ЦД, можна приступати до побудови його схеми.

#### **1.4 Функціональна схема цифрового двійника та повний опис взаємодії елементів функціональної схеми**

Для побудови цифрового двійника необхідно побудувати схему його реалізації, яка б відповідала вихідним вимогам. З умов, модель повинна забезпечувати контроль над конкретним елементом, взаємодіяти з ним шляхом отримання інформації, збереженні цієї інформації і обробки її за двома сценаріями. Повинно проводитися попереднє тестування результатів. Відповідно до результату, на елемент можуть надсилатися ті чи інші команди. Іншими словами, необхідна інформаційно-

вимірювальна система, підключена до об'єкта управління і отримує від нього значення певних параметрів. На рисунку 1.2 представлена функціональна схема такої моделі, яка задовольняє вимоги по підключенню роботою з інформацією.



Рисунок 1.2 - Функціональна схема взаємодії ЦД і досліджуваного об'єкта

Загальне уявлення про кожен елемент наведеної схеми:

1. Об'єкт управління - пристрій за поведінкою якого ведеться спостереження. В даному випадку це можуть бути датчики, показники яких і будуть вхідними параметрами цифрового двійника;

2. Інформаційно-вимірювальні системи – сукупність вимірювальних технічних засобів, для отримання і обробки інформації до виду, необхідному системою;

3. Human-machine interface (НМІ) - забезпечення зв'язку між оператором і установкою. Якщо існує інформація, яку необхідно в терміновому порядку відобразити, то вона проходить саме через цей блок. Наприклад, колірні індикатори, часткове відображення параметрів і т.д. ;

4. Система управління базами знань - працює при здійсненні пошуку, записи та вилучення інформації з бази знань системи. БЗ містять не тільки інформацію про отриманий об'єкті, але і правила виводу, що дозволяють будувати семантичну зв'язок

між вхідними і наявними даними. Така організація свідчить про те, що система є навченою;

5. Система управління базами даних - забезпечує запис і зберігання необхідної інформації (в загальному випадку використовується клієнт-серверна, в тестовому варіанті представлена файл-серверна, тому що інформація записана локально у вигляді файлу);

6. Блок ідентифікації - реалізація сценарію 2;

7. Блок оптимізації - реалізація сценарію 2;

8. Цифрова модель - здійснює побудову за наявними даними моделі, що включає в себе набір параметрів і функцій, що реалізують алгоритм процесу функціонування об'єкта моделювання. Завдяки цій моделі, є можливість проектування і прогнозування поведінки моделі;

9. Засоби випробування моделей - різні програмні середовища, що здійснюють перевірку отриманих систем для мінімізації помилок і перевірка моделей на цілісність і відповідність встановленим вимогам;

10. Система управління технологічним процесом (СУТП) - виконує роль «пульта управління», реалізує взаємодію з датчиками, посилаючи їм команди про необхідні зміни або про припинення роботи, наприклад, під час аналізу вхідних даних і виникненні критичної ситуації.

З об'єкта управління через сенсори і датчики інформація передається в вимірювальну систему. ОУ є основним джерелом інформації для всієї системи.

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) обробляє отримані про поточні показники дані і передає їх в СУБД і СУБЗ. Таким чином, підтримується актуальність інформації, що зберігається в базах.

Після здійснюється перехід вхідної інформації в СУБЗ, де вона порівнюється з певними критеріями. Даний блок видає результат порівняння на НМІ. Залежно від результату, загоряється колірної ідентифікатор, що сповіщає про можливі неполадки системи. У разі незадовільного результату сигналу, буде відправлений сигнал в СУТП для призупинення роботи системи і подальшого прийняття рішень.

Дані з СУБД використовуються в блоці ідентифікації. Блок ідентифікації працює з отриманою інформацією і містить в собі можливості визначати залежність між вхідними параметрами і передає нові значення в цифрову модель. Також визначає найбільш підходящі значення для оптимізації того чи іншого параметра. Іншими словами, здійснює підготовку даних для моделювання.

Результуюча інформація надходить до блоку цифрового моделювання, де здійснюється аналіз всіх параметрів і власне, складання моделі, описаній структурною схемою і її математичним описом.

Отримана модель надходить на блок випробування. У ньому проводиться тестування і перевірка, після чого модель затверджується системою і передається в інші блоки. Наприклад, на блок НМІ, що транслює результат або на СУТП, для реалізації моделі. Також отримана модель переходить в блок оптимізації, де перевіряється на виконання умов для поточного параметра. Дані аналізуються відповідно до отриманих з ІВС і перевіряються на граничні умови. На цьому етапі проводиться рекомендації по відношенню до моделі.

Наступним етапом є прийом і передача всієї результуючої інформації в СУТП. Саме цей блок здійснює передачу результатів обчислення і команд в об'єкт управління.

Також ІВС передає інформацію в НМІ для виведення поточних показників з контрольованого пристрою. Для здійснення роботи в реальному часі дані також передаються в блок оптимізації безпосередньо. Ці ж показники використовуються в середовищі випробування моделей.

### **1.5 Поточна реалізація цифрових двійників**

Створення повноцінного цифрового двійника дуже велика задача, яка потребує великого витрата ресурсів і часу. Для реалізації подібного проекту необхідно володіти великим спектром інформації. Дані для самої взаємодії системи з об'єктом повинні включати в себе:

1. Знання про роботу об'єкта, який буде аналізуватися (наприклад, які функції виконує спостережуваний об'єкт, на що потрібно звертати увагу при аналізі, а власне, від цього залежать цілі ЦД і кількість даних, необхідних для аналізу);

2. Дані показників об'єкта (Спостережувані параметри, якими надалі заповнюється БД);

3. Теоретичні дані (На них ґрунтується БЗ. Складаються відповідно до технічної документації, нормативами показників, передачі знань, накопичених в ході роботи з об'єктом);

4. Загальна структура підприємства і цілі роботи з об'єктом і результатами його аналізу (необхідно знати як використовується сам об'єкт і як потрібно забезпечити виведення інформації з ЦД. Від цього залежить область і метод впровадження цифрового двійника, так як необхідно встановити і розрахунок точок підключення);

5. Критерії оптимальності роботи об'єкта з ЦД (Враховувати вимоги по обробці інформації з об'єкта і отриманні зворотного зв'язку від ЦД. Як приклад критеріїв: швидкодія системи, допустима похибка результатів, необхідні режими роботи. В залежності від даного пункту, замовник може розрахувати, на скільки буде вигідно придбання ЦД);

6. Технічна інформація (Необхідна для реалізації методів безпосереднього підключення до об'єкта управління).

Після отримання необхідних даних слід реалізація проекту. Це велика робота, що включає в себе безліч аспектів програмної діяльності. Повинно бути задіяно безліч мов різного рівня. Починаючи з забезпечення роботи з датчиками, що використовують низькорівневі мови, закінчуючи користувача інтерфейсами, написаними на мові високого рівня. Реалізацію можна розбити на передбачувані розділи:

1. Взаємодія з об'єктом;
2. Запис і зберігання інформації;
3. Отримання інформації;
4. Інтерфейс;
5. Методи розрахунків;

6. Моделювання;

7. Автоматичне тестування.

Зазвичай подібними проектами займається команда з розподіленими обов'язками. Тому даний проект є лише частиною загальної структури цифрового двійника, а саме, демонструє реалізацію певних його сценаріїв поведінки і загальний принцип взаємодії з СУБД і СУБЗ для обробки отриманої інформації.

### **1.6 Сценарії реалізації цифрових двійників**

В даному випадку, кажучи про сценарії, мається на увазі опис гіпотетичної послідовності подій, яка б показала причинно-наслідкові зв'язки між ними, ключові параметри та очікувані результати виконання цих подій.

Цифровий двійник виконує 2 сценарії:

#### **1. Діагностики**

Модуль діагностики працює з алгоритмами, заснованими на зверненні до бази знань і виведення результуючого значення на НМІ. З неї будуть отримані необхідні дані конкретно для показників поточного досліджуваного об'єкта, результат порівняння поточного значення показників з оптимальним і висновок рекомендацій і відомостей по відношенню до поточного стану. Сценарій діагностики створений для аналізу роботи пристроїв в реальному часі, що необхідно для контролю виробництва та запобігання аварійним ситуаціям.

#### **2. Ідентифікації**

Сценарій ідентифікації призначений для знаходження залежності параметрів і подальшої оптимізації виробничого процесу. Може працювати як в режимі реального часу, так і з даними, отриманими в результаті спостережень і занесених в інформаційну базу (докладніше буде розглянуто далі). Чим більш актуальною інформація, що міститься в базі даних, тим точніше вийде результат. Результат роботи надсилається в цифрову модель, для подальшої корекції параметрів об'єкта.

## **1.7 Постановка задачі та схема проведення досліджень**

### **Мета та задачі дослідження.**

**Мета досліджень** – підвищення ефективності заходів ,що спрямовані на оптимізацію технічного обслуговування

Для реалізації поставленої мети в роботі поставлені наступні задачі:

- дослідити сучасні методи контролю технічного стану ГТД;
- проаналізувати перспективи використання цифрових двійників;
- провести аналіз моделі поведінки двигуна підчас експлуатації;
- розробити методику ефективного впровадження цифрових двійників в

процес діагностики технічного стану ГТД.

**Об’єкт дослідження** – процес управління якістю технічного обслуговування авіаційної техніки в межах використання технології цифрових двійників.

**Предмет дослідження** – комплекс робіт з розробки та впровадження технології цифрових двійників в процес діагностики авіаційної техніки.

### **Методи дослідження.**

Для розв’язання поставлених задач застосовувалися елементи теорії надійності та управління, теорій дослідження операцій і масового обслуговування, відповідно до схеми досліджень, наданої на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 - Схема досліджень

## **РОЗДІЛ 2**

### **ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ СЦЕНАРІЮ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОМПОНЕНТІВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН**

#### **2.1 Метод реалізації сценарію діагностики**

Як було сказано раніше, сценарій діагностики необхідний для аналізу поточного стану системи і можливого запобігання і вирішення помилок. Необхідно визначити, в який діапазон допустимості потрапляє вхідний значення, в залежності від результату, видавати варіанти причин потрапляння в даний діапазон і рекомендації по нормалізації стану. Надалі, такий метод, при розбитті показників на менші кордону дозволяє відстежити відхилення ще на ранніх стадіях і запобігти їх, запропонувавши найбільш ймовірні фактори неполадок.

Даний метод аналогічний FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) аналізу, заснованому на виявленні та запобіганні помилок. Даний метод виявляє всі можливі помилки, що впливають на роботу спостерігається системи, підходить для аналізу остаточної конструкції обладнання або відстеження будь-яких серйозних змін.

Основна мета і завдання даного блоку - виявити і запобігти або виправити дефекти виробництва.

Якщо розглядати окремий показник продукту, то це допоможе його проблеми на ранніх стадіях і скорочує ресурси, витрачені на виправлення неполадок. На багатьох підприємствах дана система може бути обов'язковою, де контроль не обходимо для запобігання критичних ситуацій.

Багато що залежить від області застосування ЦД, використовуваної БЗ і стадії виявлення несправностей. Тому для реалізації даного блоку необхідний попередній етап моделювання та аналізу систем, з якого буде заповнена інформація в БД, а саме:

1. Область виникнення проблем;
2. Визначення меж значень для параметра;
3. Потенційні неполадки;
4. Причини неполадок;
5. Можливості контролю неполадок.

Для точності аналізу буде введено поняття частоти виникнення помилки, що підвищить ймовірність її виправлення в наступних ситуаціях.

Можливості функціоналу

1) Отримання результату відхилення вхідного параметра.

Маючи вхідні дані, система посилає запит до бази знань, звідки отримує інформацію про допустимість поточного показника;

2) Отримання інформації про відхилення.

Якщо показник перевищує допустимі межі, то буде отримана інформація про можливі причини неполадок системи;

3) Отримання рекомендацій для виправлення неполадок.

Залежно від введеного показника, повертається ряд рекомендацій щодо запобігання та усунення неполадки для мінімізації відхилення.

## **2.2 Опис програмної реалізації цифрового двійника**

Додаток реалізовано на МВР С #. Містить призначений для користувача інтерфейс, у вигляді стандартної WindowsForm. Програма має прямий доступ до бази знань, реалізованої у вигляді файлу з розширенням .owl.

У файлі IB.owl внесена інформація про показники.

Кожен показник має:

a) Допустимі межі;

b) Можливі помилки;

c) Можливе рішення помилок.

Отримане значення перевіряється на допустимість відхилення параметра від заданих обмежень. Обмеження система отримує з інформаційної бази, посилаючи SPARQL-запит. Відповідно до критичності, вікно зі значенням вхідного параметра змінює кольорову індикацію.

Можливі помилки містять припущення про причини відхилення і ідентифікатор, який вказує на ймовірність, того, що саме поточна помилка є причиною. Система навчаюся. При використанні даної системи, якщо користувач

переконався в походженні помилки, то він повідомляє про це і системі. Дана дія підвищить ефективність роботи системи в подальшій експлуатації.

Можливе рішення помилок містить припущення про причини неполадки системи. Дана інформація береться з бази знань, закріпленої за кожним досліджуваним об'єктом.

База знань динамічна. Користувач, у разі необхідності, при виявленні нових причин неполадок або знаходженні додаткових рішень, може занести цю інформацію в поточному вікні зображеному на рисунку 2.1.

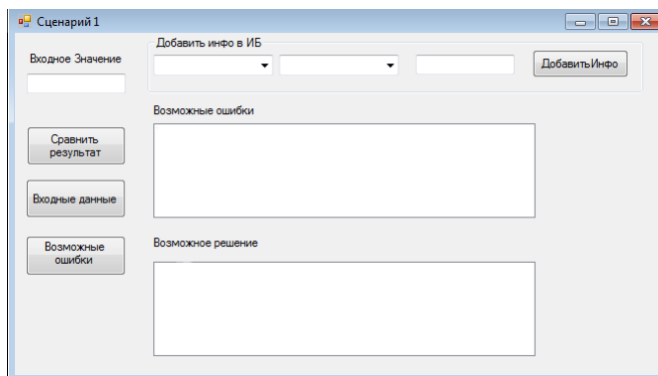


Рисунок 2.1 - Інтерфейс програми для реалізації сценарію діагностики

### 2.3 Взаємодія з базами знань і базами даних

Дані представлені в числовій формі і послідовно записані в текстовому файлі. Взаємодія з файлами реалізовано програмно через стандартну бібліотеку System.IO, що дозволяє працювати з файлами з розширенням .txt.

Більшість класів і функцій бібліотеки System.IO розташовані в mscorlib.dll, частина присутня в System.dll.

Для зчитання файлів БД були використані наступні класи і функції з простору імен System.IO:

Для зчитання в режимі реального часу створений об'єкт класу FileSystemWatcher. До створеному об'єкту буде вироблено звернення при останньому

зміні в файлі. Для цього використовується властивість `NotifyFilter`. Забезпечення доступності компонента реалізовано за допомогою властивості `EnableRaisingEvents`.

Фрагмент реалізованого коду:

```
FileSystemWatcher watcher = new FileSystemWatcher ( ".././", "Info.txt");  
watcher.NotifyFilter = NotifyFilters.LastWrite;  
watcher.EnableRaisingEvents = true;
```

Таким чином, реалізована система для отримання змінної інформацією з файлу в режимі реального часу.

База знань теж буде файловою. Дані зберігаються в файлі з розширенням `.owl`. Для читання даного файлу знову буде використана бібліотека `System.IO`. Необхідно створити об'єкт класу `StreamReader` для зчитування символів з потоку байтів в певній кодуванні. Був реалізований новий екземпляр класу `StreamReader` для читання файлу, розташованого за адресою, заданому змінної `file`. Читання здійснюється з використанням кодування `UTF8`:

```
StreamReader reader = new StreamReader (file, Encoding.UTF8);
```

`UTF8` - кодування юнікода, що містить 2 байта і дозволяє кодувати складні символи. У поточній роботі необхідна для прочитання російських символів, що містяться в БЗ.

#### **2.4 Загальний принцип SPARQL запитів та реалізація запиту**

Для визначення меж і можливості реалізації система буде звертатися за допомогою `SPARQL`-запитів. Чому не стандартний `SQL`?

Справа в тому, що для аналізу вже недостатньо застосування стандартної архітектури «ключ-значення». Система повинна бути більш гнучкою, має можливості самостійного аналізу і знаходження залежностей. Якщо є якийсь параметр, то у нього є свої допустимі показники, значення яких необхідні для аналізу ситуації. Таким чином, необхідна робота з онтологіями. Звичайний запит не має такої кількості динамічних показників, що склало б більший обсяг роботи для отримання аналогічних даних. `SPARQL` дозволяє звертатися до `web` ресурсів, що є ще одним його перевагою, тому що в стандартних запитах `SQL` є обмеження на ресурси -

інформація шукається в межах бази даних. ще однією складністю для SQL є обробка інформації в формі графів. Запит не зможе обійти кожну гілку або відразу кілька і повернутися до кореневого значенням. Такий функціональністю володіють SPARQL-запити.

SPARQL, мова запитів для інформації, представлена у вигляді RDF. RDF (Resource Description Framework) - являє інформацію з використанням "трійок", кожна з яких складається з суб'єкта, предиката і об'єкта.

Для запису моделі RDF не в графічному вигляді використовується формат Turtle (Terse RDF Triple Language, короткий мову RDF Triple), який є одним з різновидів N3. Нотація 3 (Notation3, більш відомий як N3) - широко поширений короткий спосіб запису моделей RDF не в XML.

Приклад:

: Chistka a: Reshenie.

В даному випадку

Суб'єкт -: chistka, предикат а й об'єкт -: Reshenie.

Суб'єкт деякий ресурс (ідентифікатор ресурсу).

Об'єкт - значення властивості (може бути виражено іншим об'єктом).

Предикат - то яким чином один об'єкт взаємодіє з іншим.

Для ідентифікації суб'єктів, об'єктів і предикатів використовується ідентифікатор Uniform Resource Identifier (URI).

Для реалізації даного запиту, необхідно локально створити файл, з містяться даними для можливості звернення до сторінки. В даному файлі повинні бути вказані дані, аналогічно локальній базі знань. (Приклад заповнення БД наведено в Додатку 1).

Інформація, що міститься у файлі, може бути заповнена попередньо користувачем і поповнюватися в ході роботи. Інформація береться відповідно до технічних вимог і відповідної документації. У кожного параметра є допустимі значення для критичної області та нормальної. Наприклад, при ідентифікації помилки, якщо передбачувана причина її виникнення відповідає дійсності, система додає значення до лічильника ймовірності виникнення даної помилки.

Запит для визначення граничного значення.

```
PREFIX : <http://www.semanticweb.org/digitalTwin/>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX xml: <http://www.w3.org/XML/1998/namespace>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
SELECT ?sub
WHERE
    { :raskhodNeftiNaUstanovke :haveValue ?sub.
      ?sub :max ?t2 FILTER (?t2 >= 675).
      ?sub :min ?t1 FILTER (?t1 <= 675). }
```

Результатом запиту буде таблиця, яка містить значення:

?sub - об'єкта, який є об'єктом, що характеризує заданий суб'єкт raskhodNeftiNaUstanovke і суб'єктом з певним предикатом для об'єктів t1 і t2. При цьому, на об'єкти t2 і t1 накладається умова, що вхідний значення (в даному випадку 675), має бути  $t2 \geq$  і  $t1 \leq$ . Значення, яке задовольняє даному запити, буде результатом запити і використовуватися для подальшої роботи програми.

Саме цей запит визначає колір індикації, яку ЦД буде посилати установці для сигналізації про помилку.

Приклад запити для виведення всіх помилок і рекомендацій їх виправлення:

```
PREFIX : <http://www.semanticweb.org/digitalTwin/>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX xml: <http://www.w3.org/XML/1998/namespace>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
SELECT ?label ?count ?slabel ?reason
WHERE
    { :raskhodNeftiNaUstanovke :deviationReason ?reason.
```

```
: raskhodNeftiNaUstanovke :deviationSolution ?solution.
```

```
?reason rdfs:label ?label.
```

```
?reason :use_freq ?count.
```

```
?solution rdfs:label ?slabel.}
```

У наведеному запиті буде виведена таблиця для подальшої обробки, що складається з? Label? Count? Slabel? Reason, де:

? Reason - суб'єкт характеризує причину відхилення (: deviationReason) об'єкта; raskhodNeftiNaUstanovke. (Даний параметр необхідний для подальшої роботи, а саме для роботи зі зміною лічильника виникнень помилок)

? Label - суб'єкт характеризує назва (rdfs: label) об'єкта reason.

? Count - суб'єкт характеризує частоту виникнення (: use\_freq) об'єкта reason.

? Slabel - суб'єкт характеризує назва (rdfs: label) об'єкта solution (solution - об'єкт, що містить рішення для

raskhodNeftiNaUstanovke, але так як в подальшому немає необхідності змінювати його властивості, то і виводити його необов'язково).

## 2.5 Необхідні бібліотеки для програмної реалізації

Повна бібліотека для аналізу, управління, запитів і записи RDF. Безкоштовно і з відкритим вихідним кодом по дозвільній ліцензії MIT.

Основна бібліотека доступна через NuGet-це найпростіший і рекомендований спосіб додавання dotNetRDF в проект.

Основні класи бібліотеки можна знайти в VDS.Пространство імен RDF. Всі основні класи засновані або на інтерфейсах, або на абстрактних класах, щоб зробити бібліотеку максимально розширюється. Ці ключові інтерфейси наступні:

INode представляє вузол в графі RDF, представляє значення виразу RDF.

Інтерфейс IGraph для графіків документ RDF формує Графік в математичному сенсі. (Специфікація W3C) - тому ми представляємо набори трійок у вигляді графіків.

Для отримання можливості читання коду бібліотеки і його функцій необхідно додатково додавання VDS.RDF на початку коду. Трійка є основною одиницею даних RDF, вузли самі по собі не мають сенсу, але використовуються в потрійній формі

заяву, яке стверджує деякі знання. Трійка складається з суб'єкта, предиката і об'єкта. Це інтерпретується як твердження, що деякий суб'єкт пов'язаний з деяким об'єктом ставленням, зазначеним предикатом.

Компоненти класу Triple є вузлами, що означає, що будь-який з класів вузлів, описаних в попередньому розділі, може використовуватися в будь-якому з розділів.

На практиці Специфікація RDF обмежує, які типи вузлів можуть відображатися в якій позиції, але так як деякі просунуті синтаксиси RDF, такі як Нотація 3, розширюють специфікацію і послаблюють ці правила, тому допустимо будь-який тип вузла в будь-якій позиції.

Клас Sparql ResultSet використовується для представлення результатів запитів SELECT і ASK. Результуючий набір містить таблицю елементів результатів Sparql в разі запиту SELECT або одне логічне значення в разі запиту ASK.

Властивість Results надає набір об'єктів результатів Sparql в вигляді суворо типізованого списку <результат Sparql>. Ви можете використовувати це для перерахування результатів або ви можете перерахувати безпосередньо над результуючим набором.

## **Висновки до розділу 2**

1. Розглянуто основні методи реалізації сценарію діагностики для цифрового двійника для аналізу поточного стану системи і можливого запобігання і вирішення помилок.
2. Проведено необхідний попередній етап моделювання та аналізу систем, з якого буде заповнена інформація в базу даних.
3. Створено програму для реалізації сценарію діагностики з можливістю подальшого заповнення та корегування параметрів.

### РОЗДІЛ 3

## ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ СЦЕНАРІЮ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОМПОНЕНТІВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

### 3.1 Методи реалізації сценарію діагностики цифрових двійників

Сценарій ідентифікації є попереднім завданням оптимізації.

Як говорилося вище, однією з функцій цифрового двійника є оптимізація роботи виробництва. На цифровий двійник надходить безліч даних і, крім їх сортування і попереднього аналізу, для підвищення ефективності виробництва потрібно знайти оптимальні значення параметрів.

Аналізуючи поточну модель, він повинен пропонувати рішення, а можливо і реалізовувати їх, по збільшенню або зменшенню тих чи інших параметрів. Бажані параметри, до яких потрібно прийти, є ключовими показниками ефективності (Key Performance Indicators, KPI).

На цифровий двійник надходить безліч даних і, крім їх сортування і попереднього аналізу, для підвищення ефективності виробництва потрібно знайти їх оптимальні значення, відповідно до бажаного KPI.

Таким чином, KPI можна представити у вигляді функції, що залежить від декількох параметрів, яку необхідно оптимізувати:

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , де  $x$  - критерії,  $n$  - число критеріїв.

Цей вираз є цільовою функцією, яку в залежності від вимог, можна мінімізувати або максимізувати. Як приклад даного завдання, в якості цільової функції буде «Підсумковий обсяг витрат палива», що залежить від показників безповоротних втрат, експлуатаційної готовності та енергоефективності виробничих потужностей. І нехай системі необхідно знайти рішення для зменшення обсягу витрат палива.

Таким чином, завдання полягає в знаходженні найкращого значення кожного критерію, при яких цільова функція прагнути до максимуму.

Також будь-яка задача оптимізації може містити кордону параметрів  $g(x) \leq 0$ . Наприклад, якщо треба знайти значення в певних межах, адже витрата - не може бути нескінченною або експлуатант може дозволити оплатити собі тільки певну витрату.

Оптимальним рішенням є знаходження найкращих показників, що враховує кожен критерій. Знаходження такого рішення з'явилося в зв'язку з тим, що багато параметрів можуть виявитися конфліктуючі, або потрібно одночасне перебування рішення для суперечать цільових функцій (Бажання підвищити обсяг виробництва, скоротивши витрачається матеріал).

Ефективним вирішенням цієї проблеми є рішення, коли не можна поліпшити один параметр, що не погіршивши при цьому інший (Оптимальне рішення Парето). Наступна виникає проблема полягає в тому, що подібних рішень нескінченно багато і треба знайти найбільш підходяще з них.

Завдання такого роду можна вирішувати різними способами, наприклад, шляхом цільового програмування, в слідстві чого, знаходиться єдине рішення. В умовах невизначеності цільова функція представляється у вигляді суми критеріїв. Це є найкращим рішенням невизначеною залежності.

Таким чином, для оптимізації необхідно знати, як мінімум, залежність параметрів. Тобто знайти залежність однієї величини від іншої, у вигляді функції  $f(x)$ . Для знаходження наближеного значення цієї функції можна використовувати стандартні методи апроксимації. Як точок можна було б використовувати значення вхідних параметрів і знайдену функцію представляти у вигляді, зручному для подальших обчислень. Однак в даному випадку, ні число параметрів, лінійність або нелінійність системи залишаються невідомими. Тому, необхідно вдатися до більш широкою завданню перебування залежності параметрів або завданню «Ідентифікації», що виконується цифровим двійником.

### **3.2 Поняття нейронної мережі та її структура**

Для початку, необхідно розібратися, що таке нейронні мережі.

Штучна нейронна мережа (ШНМ) - реалізована як математична модель в програмному або апаратному вигляді. Основна ідея структури НМ була створена аналогічно біологічним нервовим системам, що обробляють інформацію. Ключовим елементом цієї парадигми є нова структура системи обробки інформації. Вона

складається з великої кількості взаємопов'язаних елементів обробки (нейронів), що працюють в унісон для вирішення конкретних завдань.

НМ налаштовується для конкретної функції, такий як розпізнавання образів, дискримінантного аналізу або класифікація даних, в процесі навчання. Можливість навчання - є основною особливістю нейронних мереж і їх великою перевагою, по відношенню до інших алгоритмам. Навчання в системах включає коригування синаптичних зв'язків між нейронами.

Нейронні мережі, з їх чудовою здатність витягувати сенс зі складних або неточних даних, можуть бути використані для вилучення шаблонів і виявлення тенденцій, які занадто складні, щоб бути поміченими людьми або іншими програмами.

Навчена нейронна мережа може розглядатися як "експерт" в інформації, яка була дана для аналізу. Потім цей експерт може використовуватися для складання прогнозів з урахуванням нових ситуацій, що представляють інтерес. Така особливість дозволяє використовувати ЦФ на основі НМ в якості прогнозує елемента.

Інші переваги НМ:

1. Адаптивне навчання: здатність навчитися виконувати завдання на основі даних, наданих для професійно-технічної підготовки.

2. Самоорганізації: НМ може створити своє уявлення інформації, яку вона отримує під час навчання.

3. Відмовостійкість: часткове руйнування мережі призводить до відповідного зниження продуктивності. Однак деякі мережеві можливості можуть бути збережені навіть при значному пошкодженні мережі

4. Швидкодія: кожен з нейронів, по суті, є мікропроцесором, але оскільки нейронна мережа складається з тисяч таких нейронів, між якими розподіляється завдання, її рішення відбувається дуже швидко - набагато швидше, ніж при використанні звичайних алгоритмів рішення.

Не варто вважати, що НМ - ідеальне рішення всіх обчислювальних операцій. Є також маса недоліків і якщо один з них критично не відповідає поставленим умовам

завдання, то потрібно відмовитися від даного виду аналізу і вдатися до пошуку іншого рішення.

До недоліків НМ відносяться:

а. Наближеність рішення. У НМ досить висока похибка, особливо на початкових стадіях навчання. Чим довше навчається НС, тим точніше буде результат її обчислень. У деяких областях навіть найменші похибки неприпустимі.

б. Багатокрокові рішення. НМ не вирішує завдання покроково, нейрони обробляються паралельно, не враховуючи обчислення сусідніх нейронів.

с. Обчислювальні процеси. Грунтуючись на попередніх висловлюваннях, можна зробити висновок, що НС не можуть виконати точне обчислення математичних рівнянь, так як дана процедура вимагає послідовного аналізу і точного значення.

Слід враховувати, що будь-яка НМ складається мінімум з двох шарів: приймає сигнали і обробного. І якщо НМ складається тільки з цих шарів, то вона є одношаровою, якщо більше - багатшаровою.

Таким чином, одношарова НМ - сигнали відразу передаються з вхідного шару на вихідний, який виконує обробку і видає результат.

Багатшарові системи - складаються з вхідного, прихованого і обробного шару.

Найбільш поширений тип штучної багатшарової нейронної мережі складається з трьох рівнів, таких як: шар "вхідних" значень з'єднаний з шаром "прихованих" (або внутрішніх) нейронів, який з'єднаний з шаром "вихідних" нейронів. Структура нейронної мережі що складається з 3 шарів наведено на рисунку 3.1.

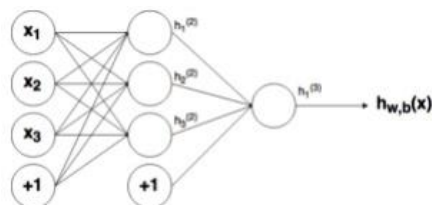


Рисунок 3.1 - Структура НМ з 3 шарів

Активність вхідних нейронів являє необроблену інформацію, яка подається в мережу. Активність кожного нейрона прихованого шару визначається активністю вхідних нейронів і вагою зв'язків між вхідними і прихованими нейронами.

Поведінка вихідних нейронів залежить від активності прихованих нейронів і ваги між прихованими і вихідними одиницями.

Цей простий Тип мережі цікавий тим, що приховані нейрони можуть вільно створювати свої власні уявлення вхідних даних. Ваги між вхідними і прихованими нейронами визначають, коли кожен нейрон прихованого шару активний, і тому, змінюючи ці ваги, змінюється уявлення прихованого нейрона.

Розглянута вище мережу, що складається з вхідного шару, прихованого шару і вихідного шару, де кожен з яких містить безліч нейронів. Тепер необхідно розглянути структуру і роботу кожного штучного нейрона наведеної мережі, щоб зрозуміти як вони взаємодіють між собою:

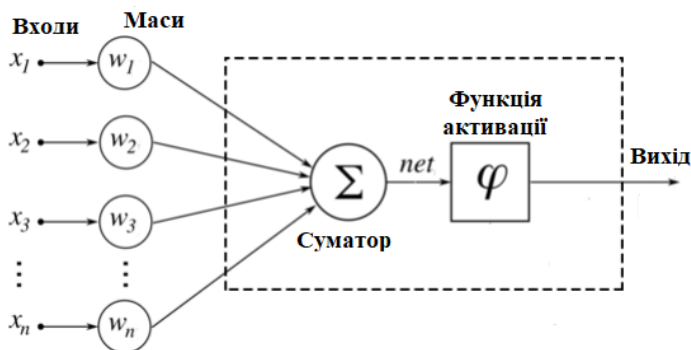


Рисунок 3.2 - Модель штучного нейрона

Сам нейрон - структурна одиниця, на вхід якої надходить інформація, виконує перетворюють дії і передає її далі. Якщо говорити точніше, то на вхід кожного нейрона надходить зважена інформація.

Зважена інформація виходить шляхом перемноження вхідного значення на відповідний йому ваговий коефіцієнт, який буде позначений як  $w_i$ - числові значення

ваги. Ваги є значеннями, які будуть змінюватися протягом усього навчання НМ. Під час початку навчання НМ, якщо ваги не задані, то розставляються в випадковому порядку. Для гнучкості навчання НС необхідно ввести додатковий елемент зсуву  $b$ , не є нейроном і його вхідний значення завжди дорівнює константі. Так як його вихід завжди дорівнює 1, то можна ввести його в систему у вигляді додаткового синапсу з вагою і додати до суми цю вагу без згадки самого нейрона.

Потім зважені значення підсумовуються, результатом є зважена сума:

$$Net = x_1w_1 + x_2w_2 \dots + x_nw_n + b = \sum_{i=1}^n x_iw_i + b$$

Мета підсумовування - представити необмежену кількість вхідних сигналів в одне число, яке буде характеризувати сигнал, що надійшов на нейрон.

Так як під час вступу на нейрон по простому значенням суми визначити щось-небудь є важким завданням, необхідно перетворити дані. Отриману суму слід провести через активаційну функцію.

Активаційна функція, аргументом якої є виважена сума, перетворює значення на число, яке є виходом нейрона.

Введене позначення:

$$out = \varphi(net)$$

Вибір активаційної функції залежить від необхідного діапазону значень. Наприклад, функцією активації може бути і проста лінійна функція  $f(x)$ , але ніколи не використовується, крім тих випадків, коли необхідно протестувати НС або передати значення без перетворень.

Найбільш ефективними активаційними функціями є сигмоїдальні з діапазоном значень  $[0,1]$ . Саме з нею розглядаються більшість прикладів створення НМ.

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

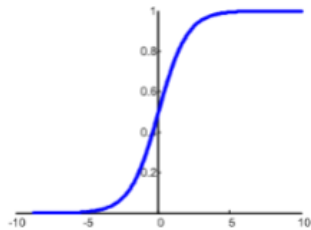


Рисунок 3.3 - Графік зміни сигмоїда

Якщо необхідно враховувати діапазон з негативними значеннями, то потрібно використовувати в якості активаційної функції гіперболічний тангенс.

Він дає результат в діапазоні  $[-1; 1]$ . Його функція має вигляд:

$$\varphi(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$$

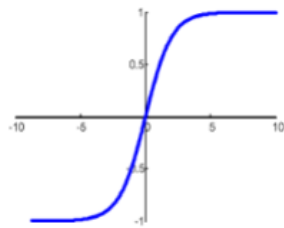


Рисунок 3.4 - Графік зміни гіперболічного тангенса

### 3.3 Види нейронних мереж

Мережі прямого мовлення - дозволяють сигналам рухатися тільки по одному шляху: від входу сигналу до виходу. Немає зворотного зв'язку (петель), тобто вихід будь-якого шару не впливає на той же самий шар. Такі нейромережі широко використовуються в розпізнаванні образів. Цей тип організації також називається "від низу до верху" або "зверху вниз".

Мережі зворотного зв'язку - допускають наявність сигналів, що рухаються в обох напрямках шляхом введення петлі в мережі. Такі мережі досить потужні і

можуть стати надзвичайно складними. Мережі зворотного зв'язку динамічні, їх "стан" безперервно змінюється, поки вони не досягнуть точки рівноваги. Вони залишаються в точці рівноваги до тих пір, поки вхідні дані не зміняться, і не буде знайдено нове рівновагу. Дана архітектура ОС також може називатися інтерактивною.

За типом архітектури існує і таке розбиття: одношарові і багатошарові архітектури. Одношарова архітектура, в якій всі нейрони пов'язані один з одним, є найпоширеніший і простий вид і має дещо більшою передбачуваною обчислювальною потужністю, ніж ієрархічні багатошарові архітектури. У багатошарових мережах нейронів часто нумеруються по верствам, а не по глобальній нумерації.

Як найпростіший приклад НМ - перцептрони. Основне використання даного виду мереж - розпізнавання образів, хоча їх можливості розширилися набагато більше. Перцептрон приймає кілька довічних вхідних сигналів,  $x_1, x_2, \dots$ , і виробляє одиничний бінарний вихід.

#### 3.4 Створення нейронної мережі та необхідні для неї бібліотеки

Нехай на вході НМ подаються значення зі входу елемента, а на останньому шарі - значення виходу. Число внутрішніх елементів залежить від користувача. Як активационної функції - сигмоїда. Структура створеної нейронної мережі зображена на рисунку 3.5.

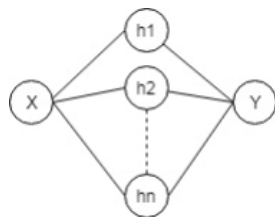


Рисунок 3.5 - Структура створеної НС

Результатом Роботи такий НМ після багаторазового навчання, буде функція залежності  $Y(x)$ . Завдання апроксимації функції, використовуючи НМ, є вирішеною при наближенні результату до вихідної функції.

Реалізація на C #:

1. Користувач вибирає файл зі значеннями функції (y). X приймається за час і відраховується від 1 до останньої точки з файлу.
2. Після завантаження файлу, точки відобразяться на графіку.
3. Користувачеві необхідно задати значення для навчання нейромережі: відхилення, момент, крутизна (альфа), число ітерацій, число нейронів на внутрішньому шарі.
4. При виконанні команди і заданих параметрів, НМ побудує графік, який буде поступово наблизитися до заданих точках.

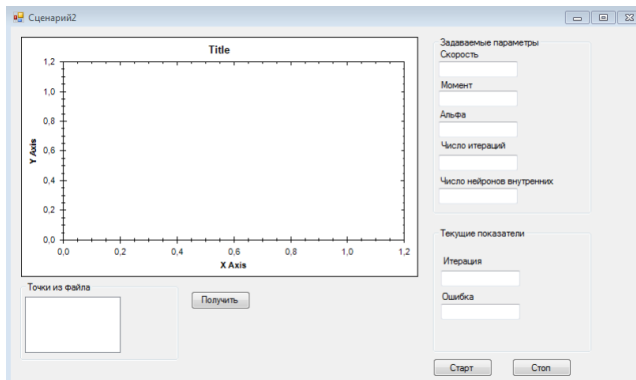


Рисунок 3.6 - Интерфейс программы

AForge.NET - це бібліотека з відкритим вихідним кодом на мові C #, призначена для розробки і досліджень в області комп'ютерного зору і штучного інтелекту. Наприклад, обробка зображень, нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка, машинне навчання, робототехніка і так далі. Використання бібліотеки:

Для активації бібліотеки, як і будь-який інший, потрібно її підключити, прописавши команди:

```
using AForge;  
using AForge.Neuro;  
using AForge.Neuro.Learning;  
using AForge.Controls;
```

Простір імен AForge.Neuro містить інтерфейси і класи для обчислень нейронних мереж. Простір імен та його підпростору містять класи, що дозволяють як створювати популярні архітектури нейронних мереж, так і навчати ці мережі.

Створення НМ, використовуючи бібліотеку:

```
ActivationNetwork network = new ActivationNetwork (  
new SigmoidFunction (sigmoidAlphaValue), // активаційна функція - сигмоид  
1) Число входів  
neuronsInFirstLayer, // число нейронів в прихованому шарі  
2) Число виходів
```

Мережа активації є базою для багатошарової нейронної мережі з функціями активації. Він складається з рівнів активації.

Простір імен Learning містить інтерфейси і класи для навчання нейронів і нейронних мереж. Був використаний конкретно клас BackPropagationLearning. Клас реалізує алгоритм навчання за алгоритмом зворотного поширення, який широко використовується для навчання багатошарових нейронних мереж з функціями безперервної активації.

Навчання через бібліотеку:

```
BackPropagationLearning teacher = new BackPropagationLearning (network);  
teacher.Momentum = momentum; // Значення визначає частину попереднього  
поновлення ваг для використання на поточному ітерації.
```

Оновлені значення ваги обчислюються на кожній ітерації в залежності від помилки нейрона. Момент визначає обсяг оновлення з попередньої ітерації і кількість оновлення від поточної ітерації. Наприклад, якщо значення дорівнює 0.1, то для поновлення значення ваги використовується 0.1 частина попереднього поновлення і 0.9 частина поточного оновлення. Значення за замовчуванням дорівнює 0.0.

```
teacher.LearningRate = learningRate; // Значення визначає швидкість навчання.  
Значення за замовчуванням дорівнює 0.1.
```

Отримання значень відбувається за допомогою методу класу Compute. Забезпечує отримання значення вихідного вектора НМ.

### 3.5 Навчання нейронної мережі

Під навчанням нейронної мережі мається на увазі знаходження коефіцієнтів зв'язку між нейронами. В процесі навчання НМ має здатність знаходити зв'язок між вхідними та вихідними даними і можливість узагальнити їх. Успішне навчання призводить до здатності НМ знаходженні вірного результату, відсутнього в навчальній вибірці або аналізувати навіть спотворені дані.

Розрахунки значень ваг, які з'єднують шари в мережі, це як раз те, що мається на увазі під поняттям навчання системи. У контрольованому навчанні ідея полягає в тому, щоб зменшити похибку між входом і потрібним виходом. Наприклад, якщо є нейромережа, яка повинна видавати результат, наприклад, на виході повинна бути 1, але на ділі НМ видає 3. Тоді різниця між значеннями  $3-1 = 2$  і буде помилкою НМ. Однак для знаходження помилок у НС формули трохи більше. Є багато способів знаходження помилок, буде застосований той, який дає середню точність обчислень: Mean Squared Error (далі MSE).

Завдання навчання НМ - скоротити це відхилення і знайти ваги, при яких НМ видає необхідний результат.

Сенс контрольованого навчання в тому, що надається багато пар вхід-вихід вже відомих даних і потрібно міняти значення ваг, ґрунтуючись на цих прикладах, щоб значення помилки стало мінімальним.

Ці пари входу-виходу позначаються як  $(x(1), y(1)), \dots (x(m), y(m))$ , де  $m$  є кількістю екземплярів для навчання. Кожне значення входу або виходу може являти собою вектор значень, наприклад  $x(1)$  не обов'язково тільки одне значення, воно може містити  $N$  розмірний набір значень.

У навчанні мережі, використовуючи  $(x, y)$ , метою є поліпшення знаходження правильного  $y$  при відомому  $x$ . Це робиться через зміну значень ваг, щоб мінімізувати похибку. Як тоді міняти їх значення? Для цього застосовується метод градієнтного спуску. Наприклад, можна розглянути наступний графік залежності похибки від скалярного значення ваги,  $w$ :

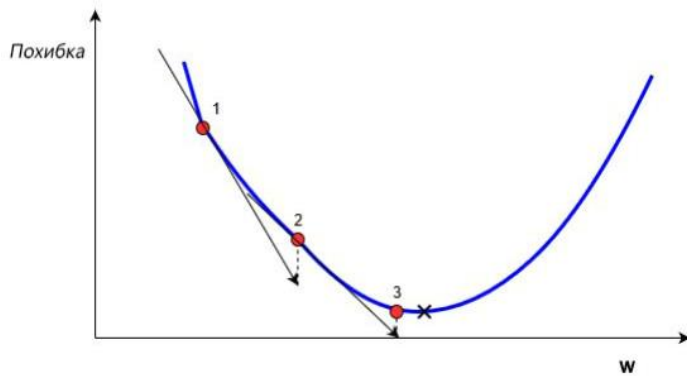


Рисунок 3.7 - Графік залежності помилки від ваги

Мінімальне значення помилки, позначене на графіку в самому низу, відповідає при певному значенні ваги  $w$ . Але значення цієї ваги невідомо, що служить ґрунтом для виконання завдання знаходження цього значення.

Як визначити вагу, при якому графік приймає мінімальне значення? Якщо спочатку ніякі ваги не задані, то необхідно використовувати випадкові значення ваги  $w$ , і кожну таку спробу підбору ваги необхідно фіксувати. На даному графіку точками зображені варіанти можливих ваг, відповідно до послідовності їх підбору. Щоб наблизити значення точок на кривій до мінімального значення, позначеному хрестиком, можна скористатися вже існуючим методом.

Для навчання НМ є кілька найпоширеніших способів навчання, а саме методи:

1. Зворотного поширення
2. Пружності поширення
3. Генетичний Алгоритм

Спочатку знаходиться градієнт помилки на «1» по відношенню до  $w$ .

Градієнт є рівнем нахилу кривої у відповідній точці. Він зображений на графіку у вигляді чорних стрілок. Градієнт також дає деяку інформацію про напрямлення - якщо він позитивний при збільшенні  $w$ , то в цьому напрямку помилка буде збільшуватися, якщо негативний - зменшуватися. Величина градієнта показує, як

швидко крива похибки або функція змінюється у відповідній точці. Чим більше значення, тим швидше змінюється похибка у відповідній точці в залежності від  $w$ .

У методі градієнтного спуску використовується градієнт, щоб знаходити наступну зміну  $w$ , таким чином, шукаючи мінімальне значення.

Кожну ітерацію знаходиться нове значення  $w$  за формулою:

$$w = w_{\text{ст}} - \alpha \cdot \nabla_{\text{error}},$$

де  $w$  - шукане нове значення;

$w_{\text{ст}}$  - попереднє значення  $w$ ;

$\nabla_{\text{error}}$  - градієнт похибки на попередній ітерації;

$\alpha$  - швидкість навчання НМ, інакше кажучи, крок.

Кожну ітерацію алгоритму навчання, градієнт повинен зменшуватися. Як тільки відповідь досягне значення, близького до заданої точності, процес припиняється.

Для НС здійснюється метод градієнтного спуску в вигляді:

$$w_{ij} = w_{ij} - \frac{\alpha \cdot \delta}{\delta \cdot w_{ij}} J(w, b).$$

По проходженню через екземпляри навчання потрібно мати окрему змінну, яка дорівнює сумі приватних похідних функції оцінки кожного примірника ( $\Delta W$ ).

$$\Delta W = \Delta W - \frac{\alpha \delta J}{\delta \Delta W} J(W, b, x^{(z)}, y^{(z)}).$$

Аналогічно буде знайдено зміщення на кожному шарі:

$$\Delta b = \Delta b - \frac{\alpha \delta J}{\delta \Delta b}.$$

Виконання алгоритму слід, що ми будемо повторювати градієнтний спуск, поки функція оцінки не досягне мінімуму.

### **3.6 Використання технології багаторівневого моделювання**

У процесі аналізу і синтезу складних систем необхідно враховувати велику кількість властивостей, функцій і структурних характеристик, в результаті чого побудова єдиної математичної моделі виявляється скрутним і недоцільним. Тому при дослідженні складних систем використовують безліч різних концептуальних, математичних і фізичних моделей, які дозволяють всебічно розкрити зміст системи.

Як правило, дослідження починають з побудови найбільш загальних моделей, що дозволяють визначити зовнішні характеристики системи і її взаємодія з навколишнім середовищем, а потім здійснюють деталізацію системи з подальшою побудовою моделей і дослідженням її окремих елементів, відносин, зв'язків і взаємодій між ними, аналізують структуру і поведінку системи на рівні взаємодіючих елементів. При необхідності більш детального дослідження кожен елемент знову знає розподілу і розглядається як система, що має свої елементи і структуру. Такий принцип многоступенчатості моделювання та дослідження, що впливає з властивостей ієрархічності будь-якої системи, широко застосовується всіма дослідниками.

Необхідність використання багаторівневого моделювання полягає в наступному :

- Недоцільність прямого чисельного моделювання високого рівня;
- Необхідність підвищення рівня моделювання системи низького тиску зі зростанням ступеня двоконтурності турбореактивного двигуна;
- Труднощі використання традиційної 1D моделі для передбачення характеристик зовнішнього контуру і сильний вплив на них різних зовнішніх факторів;
- Швидкий прогрес у розвитку чисельних методів і технологій.

Дослідження складної системи необхідно проводити на кожному рівні поділу. На верхньому рівні складна система може розглядатися як елемент системи вищого рангу і досліджуватися «в цілому» для визначення її зовнішніх характеристик; на

наступних рівнях розподілу будуть вивчатися різні підсистеми і елементи, виявлення властивостей яких дозволить уточнити зовнішні характеристики системи.

Структура багаторівневого математичного моделювання включає в себе використання традиційної 1D математичної моделі в якості джерела вихідних даних для 3D моделей вузлів і як джерело інтегральних характеристик двигуна, з якими порівнюються отримані результати та використання в 1D моделі двигуна для ув'язки (погодження) режимів роботи компресорної (вентилятор, підпірні ступені) і турбінної частин контуру низького тиску. Приклад використання багаторівневого моделювання зображено на рисунках 3.8-3.9.

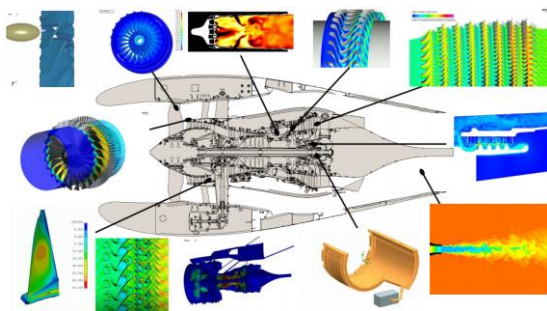


Рисунок 3.8 - Приклад використання багаторівневого моделювання

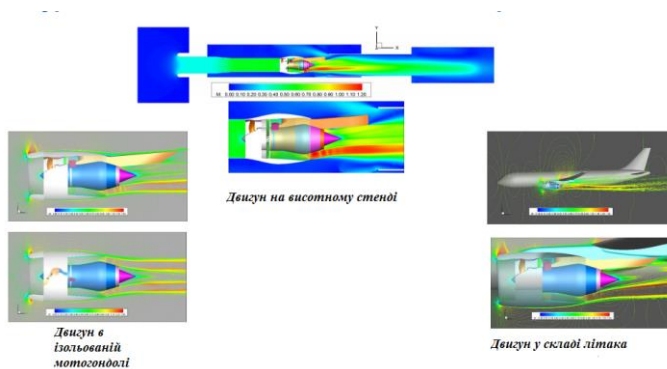


Рисунок 3.9 - Приклад використання багаторівневого моделювання двигуна на стенді та у складі літака

До основних компонентів багаторівневого моделювання відносять :

- Діалогова підсистема «Двигун»;
- CAD – система;
- Створення розрахункових моделей;
- CFD – додаток;
- Обробка результатів;
- підсистема інформаційної;
- підтримки.

### 3.7 Тестування системи

На схемі представлені ті частини стандартної схеми цифрового двійника, які реалізовані в поточному проекті.



Рисунок 3.10 - Реалізовані частини ЦД

Так як реалізація має локальний характер, то реалізована файлова БД, що містить інформацію, отриману безпосередньо з датчиків.

Як приклад будуть розглянуті датчики паливного насоса.

Для показання роботи цифрового двійника не потрібно розбирати загальну схему виробництва, досить розглянути один блок і показати на ньому як двійник

отримує і обробляє інформацію. Залежно від розглянутого блоку, залежать ключові показники ефективності (KPI) процесу виробництва, необхідні в подальшому для оптимізації.

### **3.7.1 Реалізація сценарію діагностики**

Програма має інтерфейс, наведений вже раніше. Користувачеві доступні команди:

Порівняти результат - порівнює максимальне значення з отриманих з граничними значеннями поточного параметра, розташованого в базі знань. Залежно від критичності відхилення, виводиться колірна індикація поля з виведеним значенням.

Вхідні дані - відкриває діалогове вікно, що дозволяє зчитувати вхідні параметри з файлу;

Можливі помилки - виводить значення можливих причин виникнення помилок і рекомендації щодо їх виправлення. Дані беруться із запиту, відправленого в БЗ. Біля кожної причини варто «лічильник помилок».

Перехід до сценарію 2 - відкриває діалогове вікно з реалізацією другого сценарію;

Додати інформацію - можливість гнучкого зміни і редагування бази знань. У додатку А наведено фрагмент БЗ саме для цього показника.

Як видно на рисунку 3.11, значення вхідного параметра в межах допустимого.

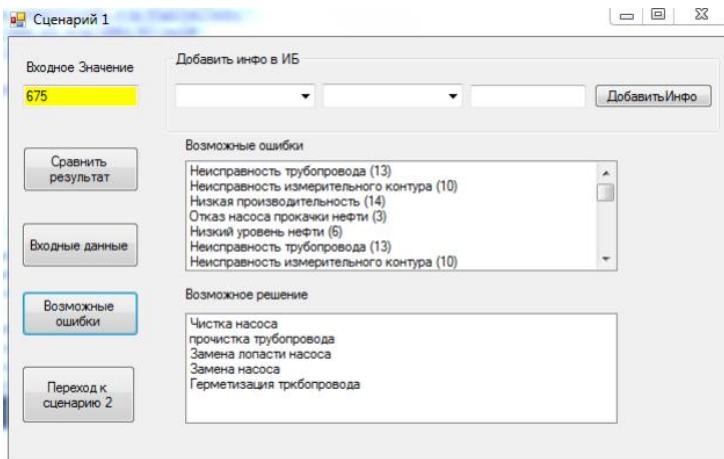


Рисунок 3.11 - Пример реализации сценария 1

Якщо помилка визначена вірно, то користувач подвійним натисканням на помилку підтверджує її вірність і лічильник збільшується.

Нижче на рисунку 3.12 наведено приклад результату такої дії. Можна помітити, що причина «Відмова насоса підкачки палива» мала значення лічильника 3, а в подальшому зображенні, після натискання, змінилося на 4.

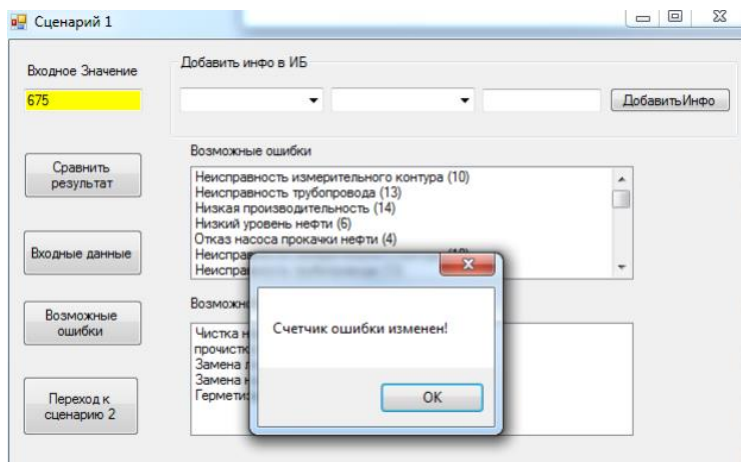


Рисунок 3.12 - Результат при підтвердженні достовірності помилки

Додати Інформацію - функція, що носить допоміжний характер, тому що в дійсності база знань повинна бути ретельно спроектована і модифікуватися іншими способами. Можна додавати нові значення, але при зміні попередніх даних, вони будуть видалені.

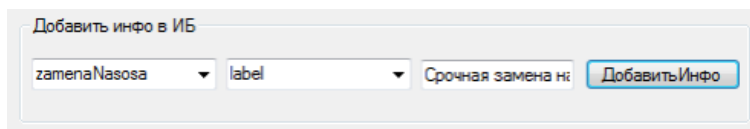


Рисунок 3.13 - Зміна старого триплета

```
52 :zamenaNasosa :label "Срочная замена насоса".  
53 :zamenaNasosa a :Reshenie.  
54 :zamenaNasosa rdfs:label "Замена насоса".  
55
```

Рисунок 3.14 - Результат команди «Додати інформацію»

### 3.7.2 Реалізація сценарію ідентифікації

Доступні команди:

Отримати - відкриває діалогове вікно, що дозволяє зчитувати інформацію з файлу і привласнювати їй значення x і y.

Старт - Запускає роботу НС.

Стоп - Дозволяє перервати обчислення.

Можливість задавати значення для НС: Швидкість, момент, альфа (крутизна активаційної функції), число ітерацій, число нейронів внутрішнього шару.

В якості вхідних параметрів будуть розглянуті Загальний витрата палива (по координаті OX, вхідний параметр) і отримана корисна енергія (по координаті OY, вихідний параметр).

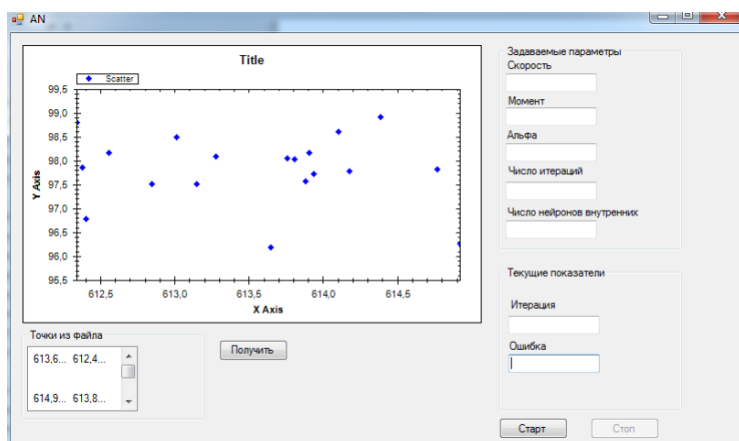


Рисунок 3.15 - Результат після відкриття файлу зі значеннями

Нехай будуть задані значення:

Швидкість = 0,1;

Момент = 0,5;

альфа (крутизна активаційної функції) = 2;

число ітерацій = 100000;

число нейронів внутрішнього шару = 20.

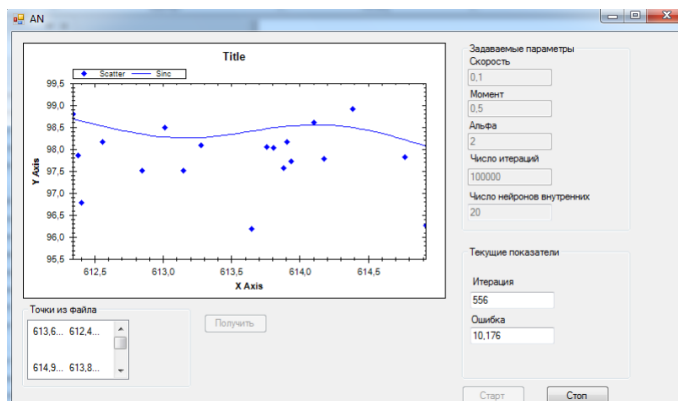


Рисунок 3.16 - Апроксимация на 556 итерации

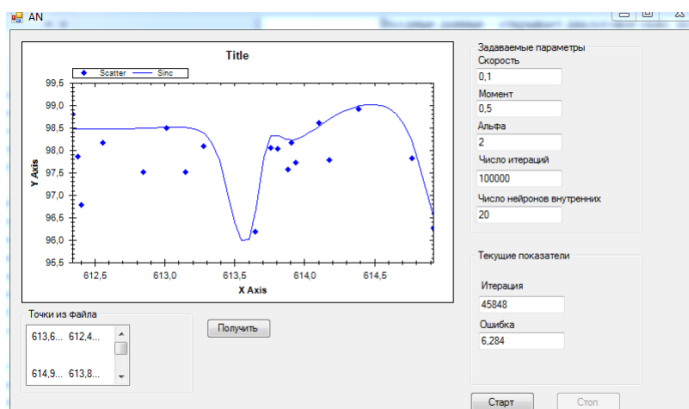


Рисунок 3.17 - Апроксимация на 45848 итерации

Можна помітити, що помилка значно зменшилася. І якби система навчалася на постійній основі і мала місце для зберігання отриманих результатів, то помилка прагнула б до 0.

Тепер досвідченим шляхом буде розглянуто вплив зміни параметрів на отриману функцію. Однак, при вказівці малого числа нейронів і зміні значення альфа, НМ не дає необхідного результату.

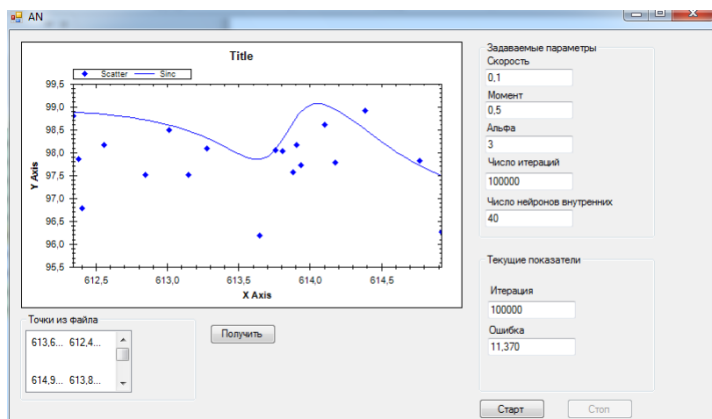


Рисунок 3.18 - Результат при збільшенні значення  $\alpha$

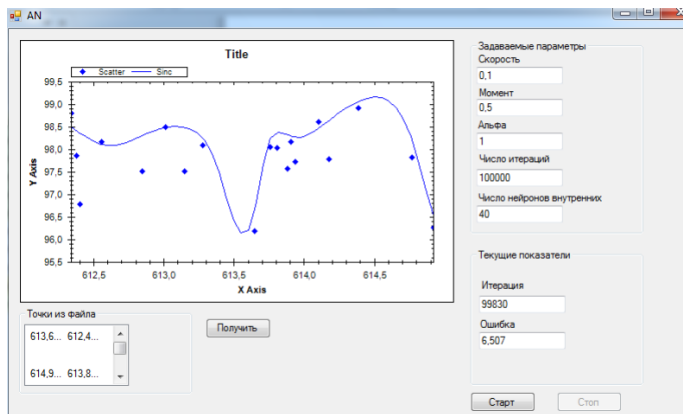


Рисунок 3.19 - Результат при зменшенні значення  $\alpha$

Спроба зменшити коефіцієнт теж не призводить до належного результату. Для досягнення перш отриманого відхилення потрібно в 2 рази більше ітерацій.

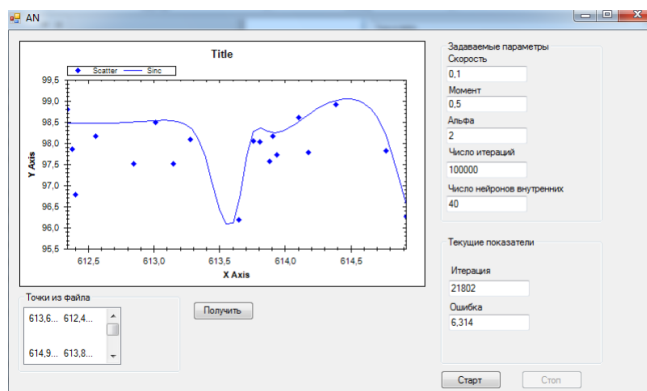


Рисунок 3.20 - Результат при збільшенні числа внутрішніх нейронів

Приклад отриманих вагових коефіцієнтів в ході побудови мережі наведено на малюнку 3.21.

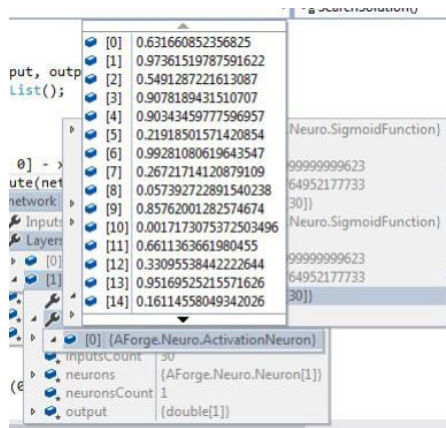


Рисунок 3.21 - Вагові коефіцієнти вихідного шару НМ

### **Висновки до розділу 3**

1. Проаналізовано основні методи реалізації сценарію діагностики цифрових двійників.

2. Обрано оптимальне рішення для знаходження найкращих показників, що враховують кожен критерій. Знаходження такого рішення з'явилося в зв'язку з тим, що багато параметрів можуть виявитися конфліктуючі, або потрібно одночасне перебування рішення для суперечать цільових функцій.

3. Порівняно результати максимального значення з отриманих з граничними значеннями поточного параметра, розташованого в базі даних. Залежно від критичності відхилення, виводиться колірна індикація поля з виведеним значенням.

4. Розглянуто загальну витрата палива (вхідний параметр) і отримана корисна енергія (вихідний параметр) та проаналізовані їх залежності.

## РОЗДІЛ 4 ОСНОВНІ ПИТАННЯ, ПОВ'ЯЗАНІ З ВПРОВАДЖЕННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

### 4.1 Основні проблеми впровадження цифрових двійників для проведення діагностики компонентів авіаційної техніки

Для успішного впровадження технологій цифрових двійників треба подолати ряд перешкод:

По-перше, нерозвиненість системи передачі даних в системі CAD / CAM / CAE. Для її вирішення необхідно створення єдиної цифрової платформи, що об'єднує галузі проектування, чисельних розрахунків і випробувань, що дозволить встановити надійний контакт між різними підрозділами підприємств і корпорації в цілому, скоротити час проектування та зменшити кількість помилок при передачі даних.

Іншою проблемою може стати обмежена пропускну здатність інформаційних систем. Якщо використання цифрових двійників передбачає оперування великими обсягами структурованих і неструктурованих даних (BigData), то для їх успішної передачі і обробки необхідно створення магістралей передачі даних з високою пропускну здатністю, а також різних схем хмарного зберігання і передачі.

Ну і, звичайно, на проведення настільки великої кількості розрахунків для наповнення цифрових моделей, що становлять цифровий двійник, необхідні великі обчислювальні потужності. Це вирішується створенням обчислювальних кластерів великої потужності, як на базі підприємств, корпорацій, так і на базі провідних інститутів країни. Необхідно буде модифікувати існуючі системи управління даними, більш активно використовувати промисловий інтернет речей і, безумовно, не забувати і про безпеку передачі даних.

Окремо хотів би виділити необхідність створення єдиних підходів і методик, що плануються до використання в цифрових двійників. У сучасному світі створити газотурбінний двигун без кооперації неможливо, а це підвищує ризик виникнення конфліктів в підходах до створення конструкції і подальшої її ув'язці.

#### **4.2 Перспективи використання цифрових двійників**

Дійсно, цифрові рішення можуть мати величезний вплив на організацію процесів, які ніколи не могла бути реалізовані до появи поєднаних, розумних технологій. Особливий інтерес представляється поняттям “цифрового двійника”: цифровим зображенням у реальному часі фізичного об’єкта або процесу, що допомагає оптимізувати виробничу ефективність.

До недавнього часу цифровий двійник і величезна кількість даних, які він обробляє, часто залишалися ілюзорними для підприємств через обмеженість обчислювальної чи пропускну здатності, вартості обладнання. Однак впливи цих перешкод останнім часом суттєво зменшились. Значно нижчі витрати та покращення потужності та можливостей призвели до експоненційних змін, які дозволяють лідерам поєднувати інформаційні технології та технологію операцій, що дозволяє створювати та використовувати цифрового двійника[6].

Тож чому цифровий двійник настільки важливий, і чому організації повинні це враховувати? Цифровий двійник дозволяє компаніям прослідкувати повний цикл виробничих процесів від розробки та виробництва до закінчення життєвого циклу продукту. Це, в свою чергу, може дозволити їм аналізувати не тільки кінцевий продукт, як це було задумано, але також ефективність системи, яка розробила продукт і як продукт використовується в цільовій галузі. Завдяки створенню цифрового двійника, компанії можуть значно підвищити швидкості виходу на ринок з новим продуктом, покращувати якість продукту, зменшувати кількість дефектів, дозволить швидко та ефективно усувати поломки та помилки, розробляти нові бізнес-моделі для отримання більшого доходу.

Цифровий двійник дозволяє компаніям швидше вирішувати фізичні проблеми, виявляючи їх раніше, прогнозувати результати з великою точністю, створювати якісніші продукти та, в кінцевому рахунку, краще обслуговувати своїх клієнтів. Завдяки такому розумному дизайну архітектури, компанії можуть реалізувати ці переваги швидше, ніж будь-коли раніше.

Створення цифрового двійника може бути надзвичайно важким завданням, якщо компанія хоче впровадити його у всіх сферах відразу. Ключем до розв'язання

може стати впровадження технології в одній сфері, з подальшим розширенням[7]. Але перш ніж впроваджувати технологію ми повинні мати чітке розуміння цілей та підходів до розвитку цифрового двійника, щоб уникнути перевантаження та забезпечити максимальну продуктивність.

Розглянемо типові переваги, які дає ця концепція:

1. Наглядність: цифровий близнюк дозволяє наглядно демонструвати роботу різноманітних машин, а також великих взаємозалежних систем, таких як виробничий цех або аеропорт.

2. Прогноз: використовуючи різні методи моделювання (на основі фізики та математики), модель цифрової близнюка може бути використана для прогнозування майбутнього стану машини.

3. Аналіз: через належним чином розроблені інтерфейси, легко взаємодіяти з моделлю і аналізувати ситуації критичні та недопустимі для цього виробу

4. Механізм документації та комунікації для розуміння та пояснення поведінки: модель цифрової близнюка може бути використана, як механізм зв'язку та документації, який може бути використаний для розуміння, а також для пояснення поведінки окремої машини або їх взаємодії.

5. Об'єднання бізнес-додатків різноманітних систем: модель цифрового близнюка може бути використана для роботи з бізнес-програмами для досягнення максимальних прибутків в бізнесі. Наприклад в контексті операцій з ланцюгами поставок, включаючи виробництво, закупівлю, складування, транспорт та логістику .

Нагальною проблемою для будь-якої компанії, яка починає оцифрування, може стати чітке розуміння користі від інвестицій у створення цифрового двійника, як цей новий підхід може призвести до змін в діяльності компанії та веденні бізнесу, що призведе до переоцінки вартості бізнесу. У минулому створення цифрових двійників було дорогим та мало продуктивним. Розвиток технологій в сферах зберігання інформації та її обчислення, значно розширило можливість для створення цифрового двійника, що у свою чергу, полегшило ведення бізнесу.

Розглядаючи комерційну цінність, яку пропонує цифровий двійник, компанії повинні зосереджуватися на питаннях, пов'язаних зі стратегічною продуктивністю та

динамікою ринку, включаючи покращення якості та тривалість експлуатації продукту, швидших циклах проектування, потенціалах нових джерел надходжень та кращим управлінням витратами. Ці стратегічні питання, крім іншого, можуть перетворюватися на конкретні програми, які може реалізувати цифровий двійник.

Дивлячись на переваги, перераховані вище, не слід дивуватись, що більшість постачальників зацікавилися цією концепцією. Майже кожна платформа реалізувала певні можливості для цифрових двійників, хоча існують реальні відмінності у термінах їх зрілості та бачення. У таблиці 4.1 наведено короткий опис таких значень за категоріями.

Технологія створення цифрового двійника такої складної технічної системи як газотурбінний двигун є наукомісткою і методологічно складним завданням. Провідні міжнародні компанії активно працюють в цьому напрямку, застосовуючи всі доступні сучасні рішення. Наші ключові конкуренти реалізують методології його створення, і вже починають їх успішне застосування. Необхідність і неминучість запровадження технології цифрового двійника визначена в усіх передових двигунобудівних корпораціях.

Очевидно, для створення і впровадження технології цифрового двійника необхідного рівня не обійтися без використання існуючого світового досвіду, кооперації з провідними галузевими інститутами та науковими організаціями, співпраці і обміну знаннями між конструкторськими бюро і включення в роботу науково-технічних та інженерних центрів. Головне завдання при цьому - зберегти і акумулювати існуючий рівень знань і досвіду, а також постійно шукати нові шляхи розвитку і вдосконалення технологій чисельного моделювання.

Таблиця 4.1 – Переваги використання цифрового двійника

Категорії зачення	Потенційні переваги
Якість	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Поліпшення загальної якості;</li> <li>• Передбачення якості та попередження дефектів;</li> <li>• Передбачення тенденції зміни якості та готовність до вирішення проблем.</li> </ul>
Гарантійні витрати на обслуговування	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Розуміння поточної конфігурації обладнання для проведення продуктивнішого обслуговування;</li> <li>• Проактивне і точніше визначення питання гарантій та претензій, щоб зменшити загальну гарантійну вартість та покращення поживання клієнтів.</li> </ul>
Записи затримок і серіалізації	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Створення цифрових записів серіалізації для частин і сировини, щоб краще керувати відкликаннями та гарантійними вимогами, а також задовольняти вимоги, необхідні для відстеження.</li> </ul>
Витрати на введення нового продукту та час виконання	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Скорочення часу виходу нового продукту;</li> <li>• Визачення компонентів довгострокового виробництва та вплив на ланцюжок постачання.</li> </ul>

Дивлячись на переваги, перераховані вище, не слід дивуватись, що більшість постачальників зацікавилися цією концепцією. Майже кожна платформа реалізувала певні можливості для цифрових двійників, хоча існують реальні відмінності у термінах їх зрілості та бачення. На широкому рівні ці реалізації зазвичай діляться на дві категорії:

Застосування технології цифрових двійників, починаючи з етапу концептуальної опрацювання, дозволяє визначити оптимальну архітектуру систем двигуна, забезпечити контроль над якістю проектних рішень постачальників систем, провести аналіз спільної роботи систем, підсистем і агрегатів і вузлів в різних умовах, а також ефективно інтегрувати системи в складі двигуна .

Використання інтегрованого цифрового двійника ГТД і виробництва уможливить вже на етапі проектування оцінити вплив на реалізацію конструкторської ідеї реальних можливостей виробництва, витрати на освоєння виробництва і безпосередньо саме виготовлення. Більш того, це створює базу знань по прийнятим і знехтуваним проектним рішенням з повним контекстним описом причин і наслідків, які обґрунтовують прийняті рішення.

#### **4.3 Приклади використання цифрового двійника для моделювання поведінки двигуна під час експлуатації**

Очевидно, для створення і впровадження технології цифрового двійника необхідного рівня не обійтися без використання існуючого світового досвіду, кооперації з провідними галузевими інститутами та науковими організаціями, співпраці і обміну знаннями між конструкторськими бюро і включення в роботу науково-технічних та інженерних центрів. Головне завдання при цьому - зберегти і акумулювати існуючий рівень знань і досвіду, а також постійно шукати нові шляхи розвитку і вдосконалення технологій чисельного моделювання.

Розглянемо основні існуючі моделі поведінки двигуна під час його експлуатації і випробувань:

1. Попадання птаха у турбіну двигуна зображено на рисунку 4.1.

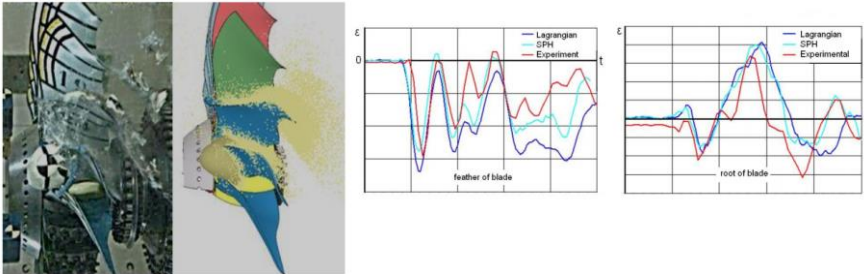


Рисунок 4.1-Порівняння розрахункових і експериментальних даних по кінограмах процесу і за деформаціями в найбільш навантажених точках

2. Моделювання ефективності системи проти обледеніння зображено на рисунку 4.2.

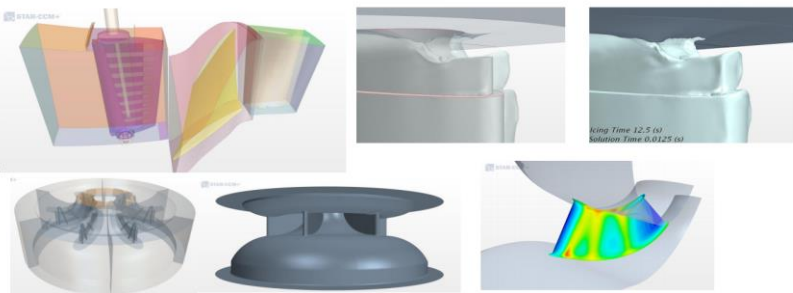


Рисунок 4.2-Моделювання обмерзання лопаток

3. Флаттер лопаток вентилятора зображено на рисунку 4.3

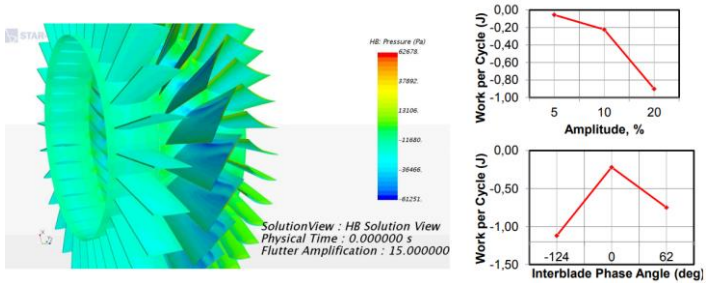


Рисунок 4.3-Моделювання флатеру лопаток вентилятора

4. Оптимізація компресора зображена на рисунку 4.4.

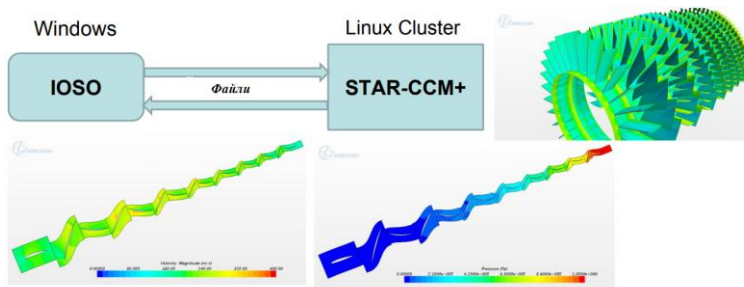


Рисунок 4.4-Моделювання компресора , з метою його оптимізації

5. Камера згоряння і моделювання паливних форсунок, горіння, емісія, охолодження камери згоряння зображена на рисунку 4.5.

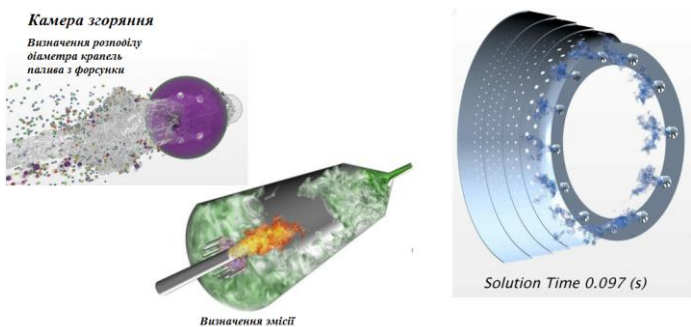


Рисунок 4.5-Модельовання камери згоряння з метою її оптимізації  
6.Роторна динаміка зображена на рисунку 4.6.

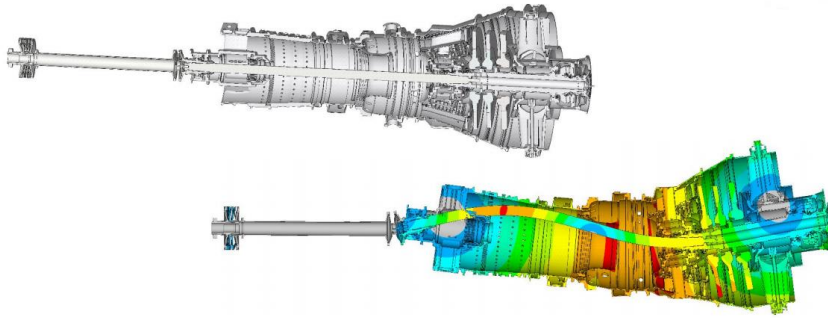


Рисунок 4.6-Визначення переміщень ротора при обертанні на критичних швидкостях з урахуванням жорсткості корпусу і елементів ротора

#### 4.4 Тепловий стан охолоджувальної турбіною лопатки та її розрахунок

Попередній розрахунок параметрів проточної частини ротора високого тиску для одержання вихідних даних про тепловий і напружений стан робочих лопаток турбіни ВТ та вала турбіни виконується в такій послідовності:

1. Статична температура газу на вході в РК ТВТ

$$T_{1r} = T_r^* - \frac{c_{1r}^2}{2c_{pr}}$$

2. Статичний тиск газу на вході в РК ТВТ

$$p_{1r} = p_{1r}^* \left( \frac{T_{1r}}{T_{1r}^*} \right)^{\frac{k_r}{k_r - 1}}$$

3. Густина газу на вході в РК ТВТ

$$\rho_{1r} = \frac{p_{1r}}{R_r T_{1r}}$$

4. Діаметр лабіринту масляної порожнини визначається з креслення двигуна прототипу, з урахуванням інших конструктивних міркувань

5. Статична температура газу на виході з РК ТВТ

$$T_{2г} = T_{г}^* - \frac{c_{2г}^2}{2c_{pг}}$$

6. Статичний тиск газу на виході з РК ТВТ

$$p_{2г} = p_{2г}^* \left( \frac{T_{2г}}{T_{г}^*} \right)^{\frac{kг}{kг-1}}$$

7. Густина газу на виході з РК ТВТ

$$\rho_{2г} = \frac{p_{2г}}{R_{г}T_{2г}}$$

8. Температура в кореневому перерізі робочої лопатки ТВТ

$$T_{л} = \frac{T_{1г} + T_{2г}}{2} - (423 \dots 473)$$

Результат розрахунку лопатки турбіни зображено на рисунку 4.7.

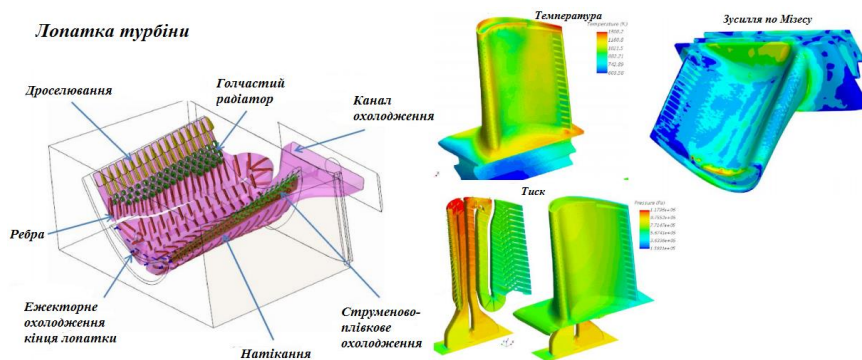


Рисунок 4.7 - Визначення теплового стану і гарячого стану лопатки всередині лопатки

#### **Висновки до розділу 4**

1. Проведено аналіз основних проблем впровадження цифрових двійників для проведення діагностики компонентів авіаційної техніки.
2. Розглянуто основні перспективи та переваги використання технології цифрових двійників для проведення діагностики компонентів повітряних суден.
3. Було виконано розрахунок теплового стану охолоджувальної турбіною лопатки та запропоновані приклади використання цифрового двійника для моделювання поведінки двигуна під час експлуатації.

## **РОЗДІЛ 5**

### **ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

#### **5.1 Аналіз екологічної небезпеки авійного двигуна**

Авіаційні двигуни зумовлюють несприятливий вплив на навколишнє середовище, а саме:

- викиди різних шкідливих продуктів згоряння палива (емісія);
- створюваний двигунами шум на місцевості. Емісію прийнято характеризувати кількістю шкідливих речовин (в грамах) що виділилися при згорянні 1 кг палива (індекс емісії EI).

В авіації норми гранично допустимих викидів встановлюються на чотири компонента емісії: окис вуглецю (CO), незгорілі вуглеводні (CnHm), оксиди азоту (NO), частки сажі (дим).

Перші два компоненти утворюються при неповному згорянні палива в камері згоряння, що відбувається на знижених режимах роботи двигуна. Оксиди азоту утворюються в зонах камери згоряння з високою температурою, тому їх емісія різко зростає при зльоті. Найбільше диміння двигунів спостерігається також на злітній режимі.

#### **5.2 Забезпечення екологічної безпеки**

Так як літак після зльоту швидко виходить із зони аеродрому, то найбільшу небезпеку для навколишнього середовища представляють викиди оксидів вуглецю і не згорілих вуглеводнів на режимах малого газу при рулінні перед зльотом і після посадки. На цих етапах можна вимкати частину двигунів і виробляти рулювання на одному або двох двигунах, що призводить до зниження забрудненості навколишнього середовища.

При виключенні частини двигунів на рулінні одночасно знижується рівень шуму, створюваний літаком на місцевості в районі аеродрому.

Для зниження рівня шуму в спроектованому двигуні застосовуються такі конструктивні рішення, як використання акустичних панелей, які поглинають шум, а

також збільшення зазорів між робочими лопатками і спрямляючими апаратами в вентиляторі.

### 5.3 Розрахунок контрольного параметра емісії двигуна на відповідність їх нормам льотної придатності

При складанні та контролі виконання планів з охорони навколишнього середовища на підприємствах цивільної авіації враховуються окис вуглецю (CO), незгорілі вуглеводні (CH), оксиди азоту (NOx), оксиди сірки (SOx) і тверді частинки.

Маса викидів шкідливих речовин (ВШР) в зоні аеропорту обчислюється для злітно-посадкового циклу (ЗПЦ). Характеристики режимів ЗПЦ дані в табл.5.1.

Таблиця 5.1.

Характеристики режимів ЗПЦ

Характеристика режиму	$\bar{P}$	Тривалість, хв.
Холостий хід (режим МГ) при рулінні перед вильотом	0,07	14,0
Злітний режим	1,00	0,7
Режим набору висоти (до 1000м)	0,35	2,2
Режим заходу на посадку(з висоти 1000м)	0,30	4,0
Холостий хід (режим МГ) при рулінні після посадки	0,07	6,0

Розрахунок  $M_{ia/n}$  маси річних викидів CH, CO, NOx, SOx і твердих частинок для двигуна одного типу ПС виконаний по формулі 5.1

$$M_{ia/n} = \sum_{i=1}^n M_{in} + \sum_{i=1}^n M_{iBn} \quad (5,1)$$

де,  $\sum_{i=1}^n M_{in}$  - маса шкідливих речовин, що викидуються при наземних операціях.

$$\sum_{i=1}^n M_{iH} = \sum_{i=1}^n K_{iH} G_{TH} \quad (5,2)$$

де,  $K_{iH}$  - коефіцієнт викиду і-го інгредієнта при наземних операціях (індекс емісії), кг. шкідливих речовин / кг. палива;

$G_{TH}$  - маса палива витраченого двигунами ПС даного типу при наземних операціях за рік, кг / рік.

$$G_{TH} = C_{удмг} P_{МГ} T_{МГ} \quad (5.3)$$

де,  $C_{удмг}$  - питома витрата палива при роботі двигуна на режимі малого газу, кг / рік;

$P_{МГ}$  - тяга двигуна на режимі малого газу, Н;

$T_{МГ}$  - режимна робота двигунів на режимі малого газу, год / рік.

$$T_{МГ} = t_{МГ} \cdot N \cdot n \quad (5,4)$$

де,  $t_{МГ}$  – напрацювання двигуна на режимі малого газу за один ЗПЦ, год;

$N$  – річна кількість зльотів- посадок ПС даного типу в аеропорту;

$n$  – кількість двигунів на даному типі ПС;

$\sum_{i=1}^n M_{iBn}$  – маса шкідливих речовин, що викидаються при зльоті-посадці, кг.

Значення інгредієнтів шкідливих речовин наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

## Значення інгредієнтів шкідливих речовин

Шкідливі речовини	CO	CH	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	тв. част.
K <sub>IH</sub> (проектований двигун кг.шк. реч./кг.палива)	0,0075	0,00055	0,00017	0,00021	0,00096
K <sub>IH</sub> (базовий варіант, двигуни ПС-90А, кг.шк.реч/кг.палива)	0,0085	0,00068	0,00021	0,00024	0,00096

Для порівняння за базовий варіант прийнятий двигун що експлуатується в даний час в багатьох літаках Ту-154М з двигунами Д-30КУ.

Надалі індексом "пр" позначимо проектований варіант, а індексом "б" - базовий варіант.

Тяги проектного двигуна Д-30КУ на режимі малого газу складають:

$$P_{MG}^{np} = 11190 \text{ Н} = 11,9 \text{ кН.}$$

$$P_{MG}^b = 10700 \text{ Н} = 10,7 \text{ кН.}$$

Маємо питомі витрати палива на малому газі при роботі на землі проектного і базового двигунів:

$$C_{VD}^{np} = 0,0439 \text{ кг/Н.ч;}$$

$$C_{VD}^b = 0,049 \text{ кг/Н.ч;}$$

Час для режиму малого газу:

$$t_{MG}^{np} = t_{MG}^b = 14 + 6 = 20 \text{ хв.} = 0,3 \text{ год.}$$

Приймаємо в середньому 3 зльоти-посадки на добу для проектного і базового літака в базовому аеропорту. Тоді річна кількість зльотів-посадок складе:

$$N^{np} = N^b = 365 \cdot 3 = 1095$$

Маємо кількість двигунів на проектному і базовому літаках відповідно:

/о

$$n^{np} = 2 ; n^{\bar{}} = 2;$$

Режимну роботу двигунів на малому газі визначимо по формулі, наведеній раніше:

$$T_{MG}^{np} = t_{MG}^{np} \cdot N^{np} \cdot n^{np} = 0,367 \cdot 1095 \cdot 2 = 657 \text{ год./рік.}$$

$$T_{MG}^{\bar{}} = t_{MG}^{\bar{}} \cdot N^{\bar{}} \cdot n^{\bar{}} = 0,367 \cdot 1095 \cdot 2 = 657 \text{ год./рік.}$$

Маса витраченого палива на режимі малого газу складає:

$$G_{TH}^{np} = C_{удмг}^{np} \cdot P_{MG}^{np} \cdot T_{MG}^{np} = 0,0439 \cdot 11900 \cdot 657 = 343223,37 \text{ кг/год.}$$

$$G_{TH}^{\bar{}} = C_{удмг}^{\bar{}} \cdot P_{MG}^{\bar{}} \cdot T_{MG}^{\bar{}} = 0,049 \cdot 10700 \cdot 657 = 344465,1 \text{ кг/год.}$$

Маса, викинута за рік при злітно-посадочних операціях, для різних типів ПС визначається за формулою:

$$\sum_{i=1}^n M_{iBn} = \sum_{i=1}^n [n(W_{i1}T_{1Bn} + W_{i2}T_{2Bn} + W_{i3}T_{3Bn})]N \quad (5,5)$$

де:  $T_{1Bn}$  – режимне напрацювання двигунів при зльоті, год.;

$T_{2Bn}$  – режимне напрацювання двигунів при наборі висоти 1000 м, год.;

$T_{3Bn}$  – режимне напрацювання двигунів при зниженні з висоти 1000 м, год.;

$W_i$  – масова швидкість емісії і-го інгредієнта при певному режимі роботи двигуна, кг / рік.

Відповідні масові швидкості емісії для різних режимів роботи двигуна проєктованого і базового варіантів представимо в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

## Масова швидкість емісії

Тип двигуна	$P_{\text{max}}$ , кН	Режим роботи двигуна	$W_i$ , кг/год.				
			CO	CH	$NO_x$	$SO_x$	тв.ч.
Проектований варіант.	121,64	1. Злітний	3,5	0,2	6,0	0,16	0,55
		2. Номінальний	3,5	0,2	4,5	0,14	0,6
		3. 0,42 номіналу	6,0	0,8	1,5	0,08	0,39
Базовий варіант	160	1. Злітний	6,5	0,2	7,5	0,175	0,701
		2. Номінальний	7,0	0,2	5,5	0,161	0,643
		3. 0,42 номіналу	20	1,0	1,5	0,097	0,39

Результати розрахунків викидів шкідливих речовин при наземних операціях МіН, при зльоті-посадці МіВп, річних викидів  $M_{ia/n}$  для різних категорій шкідливих речовин представимо в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

## Річні викиди шкідливих речовин

Викиди шкідливих речовин	Шкідливі речовини				
	CO	CH	NO	SO <sub>x</sub>	тв. ч.
$M_{iH}^{np}$ , кг	2784,9	204	63	7,8	30,6
$M_{iH}^{\sigma}$ , кг	3316	243	93	10,6	42,4
$M_{iBn}^{np}$ , кг	1253,3	138,70	745,80	27,29	119,86
$M_{iBn}^{\sigma}$ , кг	3668,3	168,10	857,40	31,75	127,68
$M_{ia/n}^{np}$ , кг	4038,2	342,7	808,8	35,09	150,46
$M_{ia/n}^{\sigma}$ , кг	6984,3	421,1	950,4	42,35	170,28

Як бачимо з наведеної вище таблиці річні викиди шкідливих речовин в районі базового аеропорту для проєктованого літака значно менше аналогічних викидів для базового літака, що свідчить на користь проєктованого варіанта з екологічної точки зору.

#### **5.4. Заходи, що підвищують екологічну безпеку авіаційного двигуна**

Організація робіт з охорони навколишнього середовища в ЦА визначаються спеціальними положеннями про охорону природи, навколишнього середовища і поліпшення використання природних ресурсів в ЦА.

Розробку природоохоронних заходів та контроль за їх своєчасним виконанням здійснює департамент ЦА.

На авіапідприємствах найбільш актуальними напрямками діяльності щодо зменшення впливу авіації на навколишнє середовище є наступні:

- зниження забрудненості атмосферного повітря шкідливими речовинами від двигунів ВС, бензинових двигунів і дизелів наземного обладнання та спец автотранспорту;

- Скорочення скидання неочищених стічних вод і шкідливих викидів з територій авіапідприємств в ґрунт, річки і водойми;

- зменшення дратівної дії авіаційних та інших виробничих шумів;

- захист від впливу електромагнітних боротьба з ерозією полів;

- рекультівація земель і ґрунтів для подальшого використання їх в сільськогосподарських цілях;

Впровадження організаційно-технічних заходів з охорони природи і раціонального використання природних ресурсів є обов'язком керівника авіапідприємства. Керівництво цими заходами покладається на головних інженерів та заступників начальників аеропортів, заводів, навчальних закладів та організацій.

У цивільній авіації розроблений комплекс заходів щодо повного припинення скидання неочищених стічних вод в річки та інші водойми. В очисних спорудах аеропортів і підприємств ГА застосовуються механічні, хімічні, фізико-хімічні, біологічні методи очищення.

Механічне очищення із застосуванням відстійників, нафтопасток, масло пасток забезпечує виділення з побутових стічних вод до 60% нерозчинених жорсткодисперсних домішок, мінеральних і органічних забруднень, а з виробничих до 95%

При застосуванні хімічних методів очищення (нейтралізація, регулювання) ефективно очищаються стічні води зарядно-акумуляторних станцій і гальванічних цехів хімічними реагентами і мінеральними коагулянтами. Отримувані сполуки стають менш токсичними або випадають в осад.

Фізико-хімічні методи очищення (флотація, екстракція, електрокоагуляція) використовують найчастіше спільно з механічною і хімічною очисткою.

Процес очищення флотацією полягає в дії молекулярних сил, які сприяють злиттю органічних речовин (наприклад, нафтопродуктів) з бульбашками повітря і спливання піни утворюється на поверхню.

Метод електрокоагуляції заснований на використанні електричного струму для здійснення процесу коагуляції.

Біологічний метод очищення стічних вод із застосуванням установок, що працюють за методом повного окислення, заснований на здатності мікроорганізмів використовувати в процесі своєї життєдіяльності неокислені неорганічні і розчинені органічні речовини стічних вод. Цей метод полягає в мінералізації органічних забруднень стічних вод за допомогою біохімічних процесів, що відбуваються всередині клітин мікроорганізмів.

Біохімічний метод очищення застосовується, як правило, на останній стадії всього комплексу очисних споруд. Цей метод є універсальним, так як біохімічному розпаду практично піддаються всі органічні речовини. Метод заснований на здатності мікроорганізмів використовувати в процесі своєї життєдіяльності різні розчинені органічні речовини і мінеральні сполуки стічних вод.

При біохімічній очистці стічних вод всі речовини, необхідні для життєдіяльності, мікроорганізми отримують з очищується стічної рідини. Ефективність очищення залежить від ряду факторів: складу води, природи забруднюючих речовин, їх концентрації, наявності у воді достатньої кількості

біогенних елементів (азоту, фосфору, калію, заліза), кількості розчиненого кисню, вміст іонів водню, температури. Так, наприклад, концентрація водневих іонів в стічних водах повинна лежати в межах від 6,5 до 8,5 рН, а температура від 6 ° С до 30 ° С.

Через надмірну кількість використаного стічних вод, їх фізико-хімічного складу в авіапідприємствах можуть застосовуватися комбіновані методи очищення.

Ефективними внутрішньо заводськими заходами з охорони ґрунтів і об'єктів є:

- вдосконалення існуючих технологічних процесів, створення замкнутих, циклічних, маловідходних йди безвідходних процесів;

- правильним експлуатація та удосконалення діючих пилогазоочисних споруд і споруд з очищення стічних худоба велика проведення інвентаризації джерел викидів шкідливих речовин в атмосферу і в водні об'єкти та створення на базі цих даних карт-схем.

З метою запобігання виснаження вод в авіаційних підприємствах доцільно передбачати комплексне використання води. Наприклад, застосування технічної та очищеної стічної води при процесах мийки деталей, агрегатів і ВС, при промиванні виробів в гальванічних цехах, при поливі і очищення штучних покриттів ангарів, місць стоянок, руліжних доріжок і ВПП.

Для аеропортів III V класів необхідно передбачати спільну очищення виробничих і побутових стічних вод при наступних використаннях їх для технічного водопостачання.

З метою економії водних ресурсів необхідно багаторазове використання води в технологічних операціях. Для цього стічні води піддаються методам доочищення. Повторне використання очищених стічних вод скорочує скидання в каналізацію і в 20-25 разів зменшує споживання природної води.

### **Висновки до розділу 5**

Розрахунок контрольного параметра емісії проєктованого двигуна на відповідність їх нормам льотної придатності показали що річні викиди шкідливих речовин в районі базового аеропорту для проєктованого двигуна істотно зменшена ніж на двигуні прототипі, що свідчить на користь проєктованого варіанта з екологічної точки зору.

## РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 6.1 Небезпечні і шкідливі виробничі фактори при технічному обслуговуванні двигуна (ДНАОП 5.1 30-1.06.98, ГОСТ 12.1.004-91ССБТ, ГОСТ 12.0.003 74 ССБТ)

Якісний і своєчасний аналіз причин травматизму і профзахворювання дозволяє усунути в технологічних процесах небезпечні і шкідливі фактори або розробити ефективні заходи безпеки. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні, психологічні.

При обслуговуванні силових установок на обслуговуючий персонал можуть впливати наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

- незахищені рухливі елементи літака і силовий установці, підвішених механізмів і виробничого обладнання;
- транспортні засоби для доставки до літака і від нього двигунів, агрегатів, устаткування;
- розлітаються уламки, елементи, деталі СУ;
- падаючі двигуни та інші деталі авіаційної техніки, інструменти та матеріали при ТО високорозташованих СУ і агрегатів;
- струменів відпрацьованих газів, предмети, що потрапили в ці струменя;
- повітряні усмоктуючі потоки;
- повітряні атмосферні потоки;
- підвищені рівні шуму, вібрації та ультразвуку при запуску і випробуванні авіаційних двигунів і при ультразвуковому контролі СУ;
- фізичні перевантаження при ТО агрегатів СУ, розташованих в важкодоступних місцях;
- розташування робочого місця поблизу до неогорджених частин на висотах 1,3 м і більше;
- підвищений рівень інфрачервоної радіації від нагрітих частин АТ;

- підвищений рівень ультрафіолетового та теплового випромінювань при виконанні зварювальних робіт;

- хімічні речовини, що входять до складу застосовуваних матеріалів (герметиків, клеїв і т.д.)

## **6.2 Організаційні та конструктивно-технологічні заходи щодо зменшення рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів**

Цими заходами є:

- ТО високорозташованих двигунів виконувати із застосуванням спеціальних драбин, трапів і рухомих пристроїв;

- не допускається підйом агрегатів масою більше 10 кг по приставних і бортовим сходах;

- при повертанні ротора двигуна робочий персонал повинен знаходитися поза зоною його обертання;

- перед виконанням ТО переконатися в надійній фіксації кришок капотів;

- при роботах на високо розташованих частинах СУ інструменти та обладнання розміщувати в сортовиках;

- при роботах в каналах проточної частини працюючий повинен бути забезпечений спеціальним фалом;

- запуск і випробування АТ виробляти після припинення інших робіт, при наявності на місці засобів пожежогасіння;

- забороняється перебувати в зоні закінчення газового струменя;

- особа, що контролює запуск двигуна на землі, має бути забезпечено засобами зв'язку з кабіною екіпажу і засобами захисту органів слуху;

- регулювальні роботи на працюючому двигуні забороняються;

- при нанесенні змащення, герметиків, лакофарбових матеріалів на вузли та деталі СУ необхідно запобігати попаданню матеріалів на відкриті ділянки тіла;

- роботи проводити із застосуванням засобів індивідуального захисту;

- промивка паливних і масляні фільтри агрегатів СУ повинна проводитися тільки на ділянках промивання;

- огляд сопел і турбін двигуна з реверсивним пристроєм необхідно проводити при повністю підбурювання тиску;

- при підігріві агрегатів СУ необхідно дотримуватися температурного режиму;

- роботи із застосуванням підсвічування проводити за допомогою переносних ламп  $U = 12 \text{ В}$ ,  $U = 24 \text{ В}$ ;

- при виконанні робіт у важкодоступних місцях СУ необхідно найбільш раціональне положення працюючого.

4.3 Розрахунок рівня шуму двигуна і забезпечення шумобезпеки в розробленому проекті

Проектований двигун має подовжену мотогондолах зі звукопоглинаючим покриттями і облицьовану звукобирними панелями газогенераторну частина двигуна. Оскільки газогенераторна частина ТРДД великій мірі двоконтурності, вхідний канал компресора виконаний у вигляді криволінійного каналу, що зменшує шум компресора в передній півплощині. З боку реактивного сопла компресор і камера згоряння відділена від навколишнього середовища багатоступінчастої турбіною з конфузорними каналами решіток, в яких генерується шум істотно менше ніж в компресорі. У двигунах, виконаних по трьохвальній схемі, шум турбіни НД ще менше внаслідок більш низьких окружних швидкостей. Основний шум, що генерується ТРДД, це шум вентилятора на режимах прямої і реверсної тяг і шум від взаємодії реактивних струменів з закрилками при зльоті - посадці літака.

Сумарний шум ТРДД перебувають розслідування щодо формулі:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg(100,1L_{\text{вл}} + 100,1L_{\text{с1}} + 100,1L_{\text{с2}} + 100,1L_{\text{инт}})$$

де  $L_{\text{вл}}$ ,  $L_{\text{с1}}$ ,  $L_{\text{с2}}$ ,  $L_{\text{инт}}$  – шуми, створювані окремо вентилятором, реактивними струменями внутрішнього і зовнішнього контурів і системою інтеграції «двигун - планер», відповідно.

### 6.3.1 Розрахунок шуму вентилятора

$$L_{\text{вл}} = 41,5 \cdot \lg u_{\text{ок}} + 7,5 \cdot \lg G_{\text{в}} - 10 \cdot \lg l - 0,04 \cdot l + 5 \cdot \lg z$$

где  $u_{\text{ок}}=500 \text{ м/с}$  – окружна швидкість кінцевих частин робочих лопаток;

$G_{\text{в}}=215,8 \text{ кг/с}$  – витрата повітря через вентилятор;

$l = 450$  м - відстань від двигуна до контрольної точки на місцевості;

$z=2$  – число двигунів;

$$L_{вл} = 41,5 \cdot \lg u_{ок} + 7,5 \cdot \lg G_g - 10 \cdot \lg l - 0,04 \cdot l + 5 \cdot \lg z = 86,77 \text{ дБ.}$$

### 6.3.2. Розрахунок шуму реактивних струменів

$$L_c = 8 \cdot \lg W_c - 20 \cdot \lg l + 0,003 \cdot l + 117$$

где  $W_c$  – акустична потужність струї.

$$W_c = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \rho_c \cdot F_c \cdot (v_c - v_n)^8 / a_n^5$$

где  $a_n=340$  м/с – швидкість звуку в навколишньому середовищі;

$\rho_c, c_c$  – густина і швидкість струї у вихідному перерізі сопла;

$$\rho_{c1}=0,481 \text{ кг/м}^3; \rho_{c2}=1,12 \text{ кг/м}^3;$$

$c_{c1}=834,11$  м/с;  $c_{c2}=429$  м/с;

$v_n=70$  м/с – швидкість польоту;

$F_c$  – площа вихідних перерізів сопел;

$$F_{c1}=0,1615 \text{ м}^2; F_{c2}=0,415 \text{ м}^2.$$

$$W_{c1} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot 0,481 \cdot 0,1615 \cdot (834,11 - 70)^8 / 340^5 = 40100$$

$$W_{c2} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot 1,12 \cdot 0,415 \cdot (429 - 70)^8 / 340^5 = 112$$

$$L_{c1} = 8 \cdot \lg 40100 - 20 \cdot \lg 450 + 0,003 \cdot 450 + 117 = 102,11 \text{ дБ}$$

$$L_{c2} = 8 \cdot \lg 112 - 20 \cdot \lg 450 + 0,003 \cdot 450 + 117 = 81,679 \text{ дБ}$$

$L_{инт}$  – шум від зіткнення реактивних струменів з закрилком визначається за статистичними даними:  $L_{инт}=96$  дБ

Сумарний рівень шуму літака :

$$L_z = 10 \cdot \lg(100,1 \cdot 86,77 + 100,1 \cdot 102,11 + 100,1 \cdot 81,679 + 100,1 \cdot 96) = 95,5 \text{ дБ}$$

### 6.4 Пожежна і вибухова безпека при технічному обслуговуванні ВМД

Авіаційні двигуни є пожежонебезпечними об'єктами. Це обумовлено проектують в них процесами горіння палива, подача його під великим тиском, високою температурою корпусу двигуна і прилеглих до нього агрегатів, можливістю викиду факела полум'я при запуску двигуна.

Пожежа на двигуні може викликати загоряння легкозаймистих матеріалів, що знаходяться в безпосередній близькості від двигуна, а також конструкцій літака. Згідно ГОСТ 12.1.004-85 - небезпечними факторами пожежі, які впливають на людей, стосовно авіаційного двигуна є:

- відкрите полум'я;
- іскри;
- висока температура повітря;
- дим;
- знижений вміст кисню в повітрі;
- виділення при горінні токсичних речовин.

Причинами пожежі на двигуні можуть бути наступні:

- необережне поводження з відкритим вогнем поблизу двигуна;
- підтікання паливно-мастільних матеріалів;
- коротке замикання електропроводки;
- нагрів підшипників двигуна, прогар жарових труб камери згоряння;
- порушення технології запуску двигуна і його випробування (повторний запуск після невеликого без проміжної холодної прокрутки для видалення залишків палива з двигуна).

Причинами вибуху на двигуні можуть бути:

- руйнування деталей двигуна і порушення розлітаються осколками паливо підводних магістралей;
- скупчення парів ПММ в підкапотному просторі двигуна;
- недостатній дренаж палива з вибухонебезпечних зон ТРДД;
- коротке замикання електропроводки або іскра від необережного удару інструменту при ТО;
- прогар жарової труби камери згоряння і викид факела полум'я на магістралях підведення палива до форсунок.

Для зменшення можливого впливу на обслуговуючий персонал небезпечних факторів пожежі та вибуху на стадії проектування передбачені наступні конструктивні заходи:

- проектування високонавантажених елементів двигуна з достатнім коефіцієнтом запасу міцності;

- корпус двигуна повинен по можливості локалізувати розлітаються частини при руйнуванні;

- паливо падаючі магістралі мають в зоні підвищених температур не замкнуту термоізоляцію, а електроізоляцію;

- агрегати і вузли двигуна мають надійні ущільнювачі;

- зв'язані деталі і вузли двигуна повинні мати металізацію для зняття залишкового статичної електрики;

- забезпечується ефективний дренаж палива і пожежонебезпечних зон двигуна;

- відсіки двигуна розділені протипожежними перегородками;

- двигун має ефективну систему змащення, що забезпечує надійне охолодження підшипників роторів;

- для попередження екіпажу або техперсоналу про можливу пожежу на двигуні і для його ліквідації застосована система сигналізації і пожежогасіння.

Вона завчасно забезпечує інформування екіпажу про підвищення температури в пожежонебезпечних зонах двигуна і автоматично включає першу чергу пожежогасіння при виникненні пожежі.

Протипожежна система складається з вогнегасників типу УБЦ-10-1, двох блоків електромагнітних розподільних кранів, розпилювальних колекторів, ударного механізму включення і системи сигналізації. Вогнегасники розряджаються в три черги. Всі вогнегасники об'єднані загальним колектором (рис 4.1).

Розпилювальні колектори в мотогондалах встановлені на двигунах. Для викиду вогнегасної складу в дрібно-розпиленому стані в колекторах висвердлені отвори  $d = 0,8$  мм. Колектори виконані зі сталевих труб. У кожній гондолі встановлено по 18 датчиків сигналізації пожежі. При виникненні пожежі в будь-якому відсіку спрацьовує система сигналізації і загоряється табло "Пожежа".

Одночасно замикається ланцюг подачі струму на лампу кнопку і електромагнітний кран подачі гасить складу. Електромагнітний кран відкриває подачу вогнегасного складу і замикає кінцеві вимикачі, що забезпечують самоблокування крана і підготовку

ланцюга включення другої черги і третьої черги вогнегасників. Одночасно подається команда на закриття заслінки обдування генератора, при цьому надходження повітря в підкапотний простір припиняється. При повторному виникненні пожежі, якщо чергу вогнегасників вже витрачена, автоматичного включення вогнегасників не відбувається і третя черга вогнегасників включається вручну.

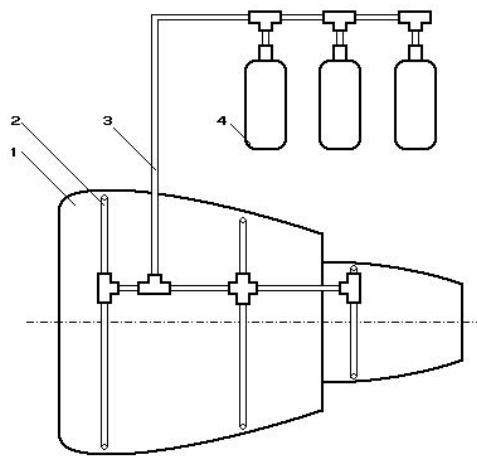


Рис.6.1. Схема протипожежної системи ВМД

1 - газотурбінний двигун; 2 - розпилювальні колектори; 3 - магістраль подачі ОВ;  
4 - вогнегасники.

При утворенні пари палива в замкнутому просторі в певних обсягах може статися вибух при наявності джерела запалення.

Крім того в ангарах аеропортів де обслуговуючий персонал теж схильний до ризику виникнення пожежі, як в літаку так і в самому ангарі встановлюються засоби пожежогасіння. Засобами пожежогасіння в ангарі можуть бути, сплінтерні, повітрянопінні і вуглекислотні та ін. Також при виникненні пожежі в літаку в конструкції літака є частини, або є агрегати пожежа на яких можна загасити лише порошковими засобами пожежогасіння.

## **6.5 Загальні вимоги безпеки при технічному обслуговуванні двигуна**

При виконанні робіт з технічного обслуговування двигунів, при їх запуску, випробуванні та при виконанні заключних робіт після випробування і виключення двигунів на працюючих можуть впливати такі і шкідливі виробничі фактори:

- незахищені рухливі елементи повітряного судна і силової установки (обертові ротори двигуна, стулки капотів, реверсивні пристрої);
- транспортні засоби для доставки до повітряного судна і від нього двигунів, агрегатів, обладнання, ПММ і т.д. ;
- розлітаються осколки, елементи, деталі силової установки і обладнання при руйнуванні двигуна або допоміжної силової установки;
- паливно-мастильні матеріали (гас, мастила), шкідливі продукти згоряння палив, шампуні, проникаючі в організм людини через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкірні покриви і слизові оболонки.

### **6.5.1 Вимоги до технологічних процесів**

- організація і проведення технологічних процесів підготовки повітряного судна до запуску і випробування двигунів і проведення заключних робіт повинні забезпечити усунення або зменшення впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на працюючих;

- при повертанні ротора двигуна працюючі повинні знаходитися поза зоною обертання ротора;

- запуск і випробування двигунів слід робити тільки в тому випадку, якщо інші роботи на повітряному судні припинені. У повітряного судна дозволяється перебувати тільки персоналу, що бере безпосередню участь у підготовці та проведенні запуску. Інженерно-технічний персонал не повинен знаходитися при запусках двигуна в площині обертання його ротора;

- в зоні закінчення газового струменя при працюючому двигуні не повинні перебувати люди, обладнання і споруди. Небезпечними є відстані менше 50 м в напрямку виходу газів з двигуна і менше 10 м перед повітрязабірником двигуна;

- особа, що контролює запуск двигунів на землі, має бути забезпечено засобами зв'язку з кабіною екіпажу і засобами індивідуального захисту органів слуху;

- перед випробуванням двигунів і реверсивних пристроїв в літню пору необхідно проводити полив водою майданчика запуску з метою запобігання підвищеного пилоутворення;

- запуск і випробування двигунів слід робити тільки при наявності на місці запуску засобів пожежогасіння. Перший запуск двигуна після його установки на повітряне судно дозволяється про-переводити при наявності пожежного автомобіля з розрахунком біля повітряного судна;

- регулювальні роботи на працюючому двигуні заборонені. Визначення місця течії палива, масла або гідрорідини з агрегатів двигуна проводиться при роботі двигуна з дотриманням запобіжних заходів від попадання персоналу в зону усмоктувальної або виходить струменя, а також із застосуванням засобів індивідуального захисту органів слуху;

- при підігріві двигуна і агрегатів силової установки необхідно дотримуватися температурного режиму відповідно до технологічних вимог по кожному типу силової установки, не допускаючи напрямки гарячого повітря на ізоляцію електропроводки, агрегати паливної та масляної систем і на працюючих.

### **Висновки до розділу 6**

При розрахунку рівня шуму двигуні в межа, що сумарний рівень шуму. За нормами ІКАО з 1978 року рівень шуму для літаків з двома двигунами і злітної максимальною масою до 300 т становить 102 дБ в контрольованій точці вимірювання шуму збоку від ЗПС. шуму двигуна відповідати нормам ІКАО.

В умовах АТБ в цеху ПТО після виконання періодичних форм, проводиться випробування двигунів на всіх режимах роботи. З підвищенням режиму роботи зростає рівень шуму. Для уникнення впливу цього шуму на технічний персонал цеху рекомендується спорудити шумопоглинальний ангар або полуангар, де і виробляти випробування двигунів. Полуангари знижують рівень шуму на 20 дБ у всіх напрямках. Ангари наземного типу, при наявності щільно закриваються воріт, шумопоглинаючих панелей знижують шум на 40 дБ, що істотно знижує рівень шкідливих впливів на технічний персонал.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджено сучасні методи контролю технічного стану ГТД та підтримання їх льотної придатності.

2. В роботі проведено аналіз системи технічного обслуговування і ремонту, й рекомендацій експлуатантам цивільних повітряних суден для формування своїх програм ТО та розроблено схему контролю і діагностики компонентів повітряних суден.

3. Проаналізовано перспективи та переваги використання технології цифрових двійників та сучасні проблеми пов'язані з їх впровадженням в програму ТО.

4. Визначено мету, задачі досліджень, об'єкт, предмет та методи досліджень. На основі цього розроблено схему досліджень.

5. Проведені дослідження довели, що актуальність оптимізації системи підтримання льотної придатності компонентів повітряних суден набуває особливого значення саме під час впровадження новітніх технологій для контролю за технічним станом компонентів повітряних суден.

6. Для побудови цифрового двійника було побудовано схему його реалізації, яка б відповідала вихідним вимогам. З умов, модель повинна забезпечувати контроль над конкретним елементом, взаємодіяти з ним шляхом отримання інформації, збереженні цієї інформації і обробки її за двома сценаріями.

7. Проведено попереднє тестування результатів. Відповідно до результату, на елемент можуть надсилатися ті чи інші команди. Іншими словами, необхідна інформаційно-вимірювальна система, підключена до об'єкта управління і отримує від нього значення певних параметрів.

8. Було проведено розрахунок теплового і гарячого стану робочих лопаток турбіни, їх аналіз та побудований цифровий двійник який відповідає отриманим параметрам.

9. Розроблено методологічний підхід до формування комплексу робіт з технічного обслуговування авіаційної техніки у вигляді методики.

10. В межах дипломної роботи було розроблено інструкцію з охорони праці та спеціальні вимоги з безпеки праці під час виконання технічного обслуговування двигуна, а також розроблені заходи з охорони навколишнього середовища для забезпечення авіаційної безпеки авіаційного двигуна.

#### **Наукова новизна:**

- Доопрацьовані деякі аспекти сучасних технологій ТО підтримання льотної придатності компонентів ПС.
- Розроблено функціональну схему взаємодії ЦД і досліджуваного об'єкта з технічного обслуговування і ремонту авіаційної техніки.
- Розроблені концептуально-методологічні аспекти складання методики створення цифрового двійника компонентів ПС для підтримання льотної придатності.

#### **Практична значимість**

Результати магістерської роботи сприяють підвищенню ефективності використання повітряних суден, збереження льотної придатності компонентів повітряних суден та перехід до прогностичного технічного обслуговування з використанням технології цифрових двійників для підвищення ефективності заходів, що спрямовані на оптимізацію витрат на технічне обслуговування.

### Список бібліографічних посилань використаних джерел

1. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А.Гаврилова, В.Ф.Хорошевский– СПб: Изд. Питер, 2000. – 384 с.
2. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Люгер Дж.Ф. – Москва. Изд. «Вильямс», 2003. – 864 с.
3. Ф. Уоссермен. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. / Ю.А. Зуев, В.А. Точенов– Москва. Изд. «Мир»,1992 – 184 с.
4. Хайкин С. Нейронные сети/ Хайкин С.- Москва. Изд. «Вильямс», 2005.-1104 с.
5. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. Заведений/ Ясницкий Л.Н. - Москва. Изд. «Академия», 2005.-176 с.
6. С.Н. Гончаренко. Модели и методы оптимизации плана добычи и первичной переработки нефти / С.Н. Гончаренко, З.А. Сафронова. – СПб. Изд. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал, 2008 – 9 с.
7. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер - Москва, Изд. «Радио и связь»,1992 – 504 с.
8. Horn J. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization / Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation/ Horn J, Nafpliotis N., Goldberg D.E. - NJ: IEEE Press, 1994. - 82–87с.
9. Deb K. Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA–II / Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A - IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002. - 182–197с.
10. Richard P. Lipmann. An Introduction to Computing with Neural Nets / Richard P. Lipmann. - IEEE ASSP Magazine,1987 – 19с.

11. Fonseca C.M. Genetic algorithm for multiobjective optimization, formulation, discussion and generalization / C.M. Fonseca, P.J. Fleming – Proceeding of the Fifth International Conference. CA. University of Sheffield, U.K ,1993. – 423c.
12. Maillard E.P. RBF neural network, basis functions and genetic algorithm / E.P. Maillard, D. Gueriot // Proc. Int. Conf. Neural Networks, Houston, TX. – 1997.– 2187c.