

Д. М. КРИЦЬКИЙ, О. В. ПОПОВ, А. М. БИКОВ, Т. А. БИКОВА, С. А. ЯШИН

РОЗГЛЯД РУХУ БЕЗПЛОТНОГО ТРАНСПОРТУ ЗА ТИПОМ ЛІТАКА

У сучасному світі час та ефективність виготовлення виробів відіграє дуже важливу роль, тому автоматизація на кожному етапі є надважливою. Для автоматизації проєктування використовуються системи автоматизованого проєктування (САПР) також пропонується підхід дослідження функцій і геометрії, який дозволяє проєктувати на основі опису функціональності та геометрії, але, як зазначено в публікації, це дуже добре для прототипування Розглянуто підхід до класифікації систем автоматизації підтримки життєвого циклу інженерних об'єктів, з запропонованою структурою опису проєктованого об'єкта, з використанням потрібного підходу до опису: функціонального, математичного та фізичного. На основі цього підходу описано алгоритм складання функціонального опису життєвого циклу, в основу алгоритму покладено принцип єдності аналізу та синтезу створюваної системи в процесі проєктування. Запропоновані рішення розглядаються з використанням традиційної методології *Aircraft Shaping* на прикладі алгоритму виду літака. Також представлено архітектуру мультиагентної платформи для структурно-параметричного синтезу об'єкта, для зручності використання якої запропоновано використовувати класифікацію задач проєктування у вигляді проєктного куба. Запропонований підхід дозволяє отримати точний опис проєктованого об'єкта та підзадач, необхідних для його створення, що дозволяє скоротити час виконання проєкту. У статті не всі рішення можливо автоматизувати на даному етапі технічної розробки, але того, що можливо автоматизувати, достатньо, щоб отримати скорочення термінів реалізації, а також прискорення процесу прототипування, як це показано в розглянутому прикладі. З отриманих даних, бачимо що фактичні дані протягом усього життєвого циклу (ЖЦ) отримують з прискорення на етапах, що пов'язані зі сприйманням вихідних даних. Отримане скорочення термінів на протязі всього життєвого циклу досягає від 10 % до 21 % від запланованого часу.

Ключові слова: САПР, інженерне проєктування, мультиагентна платформа, прототипування, життєвий цикл.

D. KRYTSKYI, A. POPOV, A. BYKOV, T. BYKOVA, S. YASHIN **CONSIDERATION OF UNMANNED TRAFFIC BY TYPE OF AIRCRAFT**

In today's world, time and efficiency in manufacturing products play a very important role, so automation at every stage is crucial. To automate design, computer-aided design (CAD) systems are used, and a function and geometry research approach is also proposed, which allows designing based on a description of functionality and geometry, but, as noted in the publication, it is very good for prototyping. An approach to the classification of automation systems for supporting the life cycle of engineering objects is considered, with a proposed structure for describing the designed object, using a triple approach to description: functional, mathematical and physical. On the basis of this approach, the algorithm for compiling a functional description of the life cycle is described, based on the principle of unity of analysis and synthesis of the system being created in the design process. The proposed solutions are considered using the traditional *Aircraft Shaping* methodology on the example of the aircraft type algorithm. The architecture of a multiagent platform for structural and parametric synthesis of an object is also presented, for the convenience of which it is proposed to use the classification of design tasks in the form of a design cube. The proposed approach allows obtaining an accurate description of the designed object and the subtasks necessary for its creation, which reduces the project execution time. In this article, not all decisions can be automated at this stage of technical development, but what can be automated is enough to reduce the implementation time and speed up the prototyping process, as shown in the example. From the data obtained, we can see that the actual data throughout the entire life cycle (LC) is obtained from the acceleration at the stages related to the perception of the source data. The resulting reduction in time throughout the life cycle reaches from 10% to 21% of the planned time.

Key words: CAD, engineering design, multi-agent platform, prototyping, life cycle.

Вступ

Прагнення якомога повніше автоматизувати підтримку життєвого циклу інженерного об'єкта (ЖЦІО) призвело до створення численних прикладів автоматизованих систем у вигляді пакетів прикладних програм і варіантів їх поєднання у вигляді інтегрованих комп'ютерних систем – ІКС. Більшість публікацій на тему управління життєвим циклом спрямовані на те, щоб довести, що формалізація процесу проєктування необхідна як для досягнення скорочення часу реалізації, так і витрат. Наприклад, [1] показує необхідність створення формалізованого методу для отримання порівняльних і прозорих оцінок показників стійкості життєвого циклу на ранніх стадіях проєктування та планування проєкту будівельних робіт, що дозволяє порівнювати показники стійкості проєктних концепцій на стадії життєвого циклу та на рівні будівельних компонентів. Останні позиціонують себе як деякі «PLM-рішення» комплексного

характеру, побудовані з використанням *Continuous Acquisition and Lifecycle Support (CALs)* технології на базі єдиного інформаційного простору (ЄІП) ЖЦІО. Наприклад, у [2] ЖЦІО описано на прикладі авіаційної технології для досягнення мінімізації шкідливих викидів протягом усього життєвого циклу, описуючи при цьому кілька інструментів, які доповнюють один одного, але в той же час також показано дублюючий функціонал. У [3] демонструється різноманітність систем автоматизованого проєктування (САПР) у моделюванні, а також пропонується підхід дослідження функцій і геометрії, який дозволяє проєктувати на основі опису функціональності та геометрії, але, як зазначено в публікації, це дуже добре для прототипування (отримання великої кількості різних варіантів), проте в цілому для реалізації управління життєвим циклом на всіх етапах є недостатнім.

У [4] наведено класифікацію моделей підтримки життєвого циклу та їх аналіз, який показав, що існуючі системи є доповнюючими, дублюючими, а

в деяких випадках мають надлишковий функціонал. Ці моделі зосереджені на безперервній стратегії розвитку, де інформація, зібрана протягом циклів, може служити корисною вхідною інформацією для управління майбутніми проектами або навіть для розширення та вдосконалення поточного проекту, беручи до уваги можливі ризики.

Зокрема, практично всі системи розглянутого призначення підтримують елементи автоматизації проектування щодо різних інженерних об'єктів. Це пов'язано з тим, що елементи проектування мають місце при вирішенні практично всіх завдань підтримки життєвого циклу інженерного об'єкта (ЖЦІО). Прикладами таких систем є [5].

Мета дослідження

За допомогою запропонованих методів побудувати функціональний образ об'єкта проектування в САПР.

Основний матеріал

Основою для визначення властивих функцій будь-якої створюваної автоматизованої системи є аналіз об'єкта автоматизації. У даній роботі зроблена спроба визначити функції, властиві системі САПР для інженерного об'єкта.

Повний опис інженерного об'єкта пропонується подавати у вигляді трьох складових (рис. 1): функціонального, математичного та фізичного описів що відповідає поняттям опису складних об'єктів (систем), які містяться в [6].

Функціональний опис або *F*-образ створюваного об'єкта – це необхідний і достатній набір функцій, які виконує об'єкт у своєму функціонуванні як системи цілеспрямованої дії. Основою для виділення набору функцій є загальна (інтегральна) функція проектного об'єкта. Він піддається послідовному аналізу (деталізації, дробленню) в процесі проектування.

Математичний (алгоритмічний) опис або *M*-образ створеного об'єкта – це результат алгоритмізації реалізації компонентів *F*-образу. Залежно від конкретних алгоритмів, функції можуть автоматично реалізовуватися за допомогою апаратних або програмних засобів: в автоматизованому режимі, коли в їх реалізації необхідна участь людини, і в «ручному» режимі, коли виділена функція виконується безпосередньо людиною.

Фізичний (реальний) опис, або *N*-образ – це опис структурних елементів проектного об'єкта, призначений для натурної реалізації компонентів *F*-образу та функціонуючих відповідно до компонентів *M*-образу.



Рис. 1 – Структура повного опису проекту

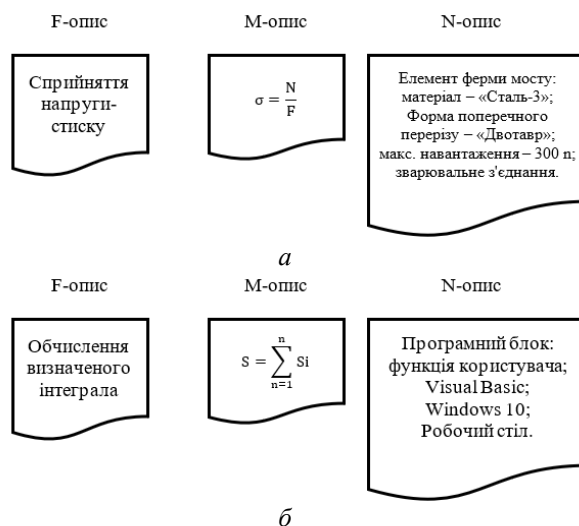


Рис. 2 – Приклади повного опису:
а – приклад 1; б – приклад 2

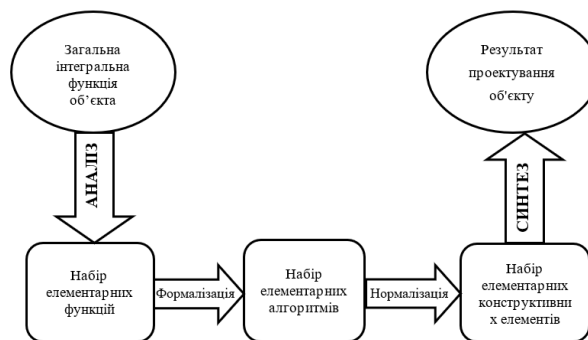


Рис. 3 – Проектування як єдність аналізу та синтезу

На рис. 2 показано простий приклад того, як описати об'єкт проектування. Приклад 1 – це елемент ферми мосту (рис. 2а), а приклад 2 – програма чисельного інтегрування (рис. 2б).

Процедура проектування як процес побудови *F*, *M*, *N*-образів інженерного об'єкта відповідає принципу єдності аналізу та синтезу в ході вирішення комплексної задачі (рис. 3).

Процедура проектування представлена як послідовність процедур для аналізу функціонального призначення об'єкта, формалізації отриманого набору функцій, натуралізації функцій як елементів дизайну об'єкта, а потім синтезу дизайну в цілому.

Розглянемо специфіку побудови провідної складової опису проектного об'єкта – *F*-образу.

Основою для ініціювання проектування є зведення вимог до об'єкта проектування, що створюється, та його загальної (інтегральної) функції, які є результатом попередніх процедур проектування.

Від правильного формулювання загальної функції залежить результат подальшого аналізу, який визначає повноту F -образу проектного об'єкта. Загальна функція формулюється на основі ретельного аналізу технічного завдання (ТЗ) до створюваного об'єкта.

Правильність формулювання загальної функції можна контролювати, маючи її формальний опис. Наприклад, у [7] пропонується використовувати поняття головної функції корисності системи P у вигляді:

$$P = (D, G, H), \quad (1)$$

$$\{I_{-1}, I_{-2}, I_{-3}, \dots, I_{-n}\} \rightarrow \{O_{-1}, O_{-2}, O_{-3}, \dots, O_{-m}\}. \quad (4)$$

Таке доопрацювання відкриває можливість формально контролювати правильність F -образу проектного об'єкта.

Процес аналізу загальної функції можна представити як її послідовне «розбиття» функції F на підфункції (рис. 4). У роботі [9] показано, скільки комбінацій різних рішень може виникнути в процесі проектування зразків складного обладнання.

Таким чином, аналіз розбиває загальну функцію F створеного об'єкта на ряд простих підфункцій:

$$F \rightarrow \{F_{ijk}\}, \quad (5)$$

де i – номер рівня деталізації;
 j – номер групи підфункцій в рівні;
 k – номер підфункцій в групі.

Результатом аналізу є набір елементарних підфункцій, які не підлягають подальшій деталізації.

Властивість елементарності може бути досягнута для різних підфункцій на різних рівнях деталізації.

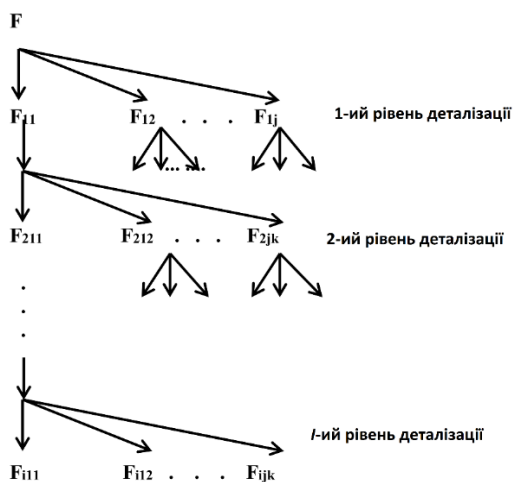


Рис. 4 – Дерево аналізу

де D – дія, що здійснюється при виконанні функції;

G – предмет, над яким виконується дія;

H – умова, за якої відбувається дія.

Запропонований опис можна розширити, вказавши характер перетворення даних, що виконується під час дії. Для цього, наприклад, у [8] введено поняття технічної функції системи F у вигляді:

$$F = (P, Q), \quad (2)$$

де

$$Q = I \rightarrow O. \quad (3)$$

У цьому випадку Q визначає характер перетворення деякого набору I , що складається з n вхідних операндів, у набір O , що складається з m вихідних операндів (4):

$$\{I_{-1}, I_{-2}, I_{-3}, \dots, I_{-n}\} \rightarrow \{O_{-1}, O_{-2}, O_{-3}, \dots, O_{-m}\}. \quad (4)$$

Через суб'єктивність процедури аналізу результат (набір елементарних підфункцій) сильно залежить від навичок і підготовки проектувальника, а його оптимальність викликає великі сумніви.

Узагальнення досвіду проектування різноманітних об'єктів дозволить виділити інваріантні рівні опису F -образів для подібних об'єктів. Це значно підвищить якість проектування, оскільки інваріантні рівні визначають дизайн на початковому етапі, де прорахунки найімовірніше призведуть до серйозних наслідків для проекту в цілому.

При проектуванні нового об'єкта розробник може зіткнутися з функціями, які в інженерній практиці реалізуються вперше. Для таких функцій може не бути відповідного фізичного принципу дії. Для вирішення таких завдань в САПР повинні бути спеціальні засоби перевірки наявності фізичного принципу дії і, за необхідності, синтезу нового фізичного принципу дії на основі відомих фізико-технічних ефектів (ФТЕ) [10]. За наявності функціонального опису форми (4), а також бібліотеки описів існуючих ФТЕ, задача може бути вирішена в автоматизованому режимі згідно зі схемою на рис. 5.

Згідно з блок-схемою на рис. 5, необхідний фізичний принцип дії (ФПД) синтезується як «ланцюжок» фізико-технічних ефектів, які описані в деякій бібліотеці. «Ланцюжки» формуються на основі відповідності O -операндів та I -операндів розглянутих ФТЕ. В результаті вирішення задачі можна отримати кілька конкуруючих «ланцюжків». Як критерій вибору найкращого варіанту рішення можна використовувати час, вартість впровадження нового ФТЕ, точність результату, отриманого при його використанні в процесі проектування.

Усі щойно синтезовані ФПД накопичуються в бібліотеці типів і можуть бути використані в майбутньому.

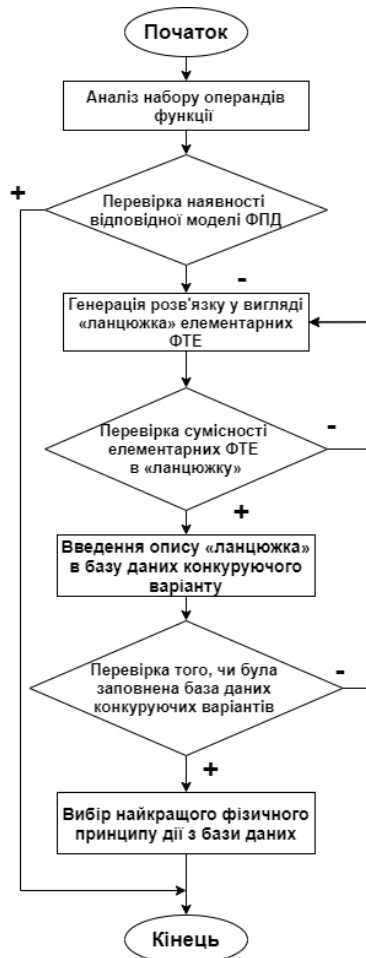


Рис. 5 – Схема синтезу

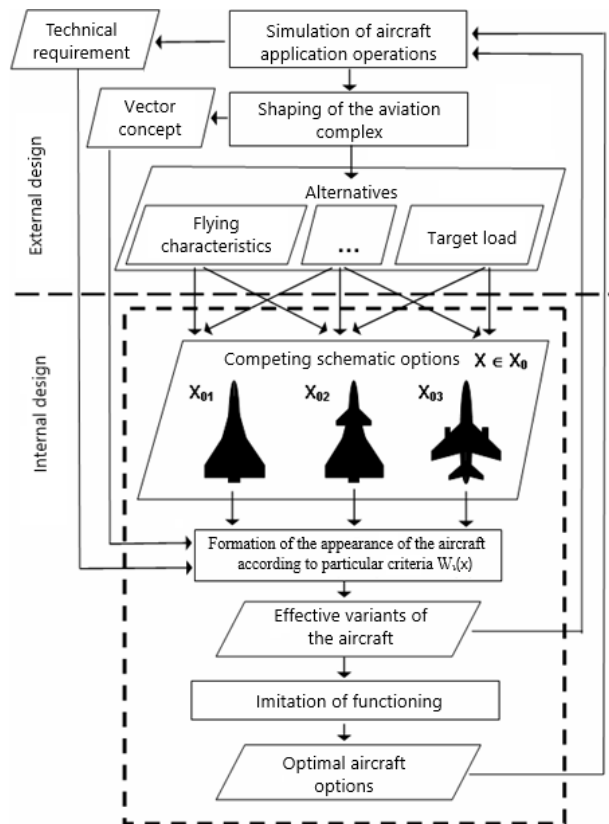


Рис. 6 – Модель взаємодії зовнішніх і внутрішніх проектних систем

Реалізація та отримання результатів

Одним із основних положень методології проектування літального апарату (ЛА) є виділення двох рівнів розробки проекту – зовнішнього та внутрішнього проектування [10]. Принципова відмінність між ними зумовлена відмінністю кінцевих цілей реалізованих тут процесів розробки продукту. Метою зовнішнього проектування є визначення доцільності створення продукту, а внутрішнього – отримання інформації, необхідної та достатньої для створення продукту в заданих умовах. Процес внутрішнього проектування починається із загальної концепції літака та формування його зовнішнього вигляду. Саме завдання формування зовнішнього вигляду виступає сполучною ланкою в організації взаємодії зовнішніх і внутрішніх проектних систем, як показано на рис. 6.

Формування літака: традиційна методика.

Принципові ознаки включають аеродинамічну схему («Звичайний», «Качка», «Безхвостий»), розташування крила (нижнє, середнє, верхнє), форму крила в плані, типи засобів механізації крила

по передній і задній кромці, схему оперення (приземлена, T -подібна), тип і розташування двигунів і т. п. Ця група ознак називається параметрами форми. Вони визначають «безрозмірний» прототип літака, розміри якого визначаються подальшими розрахунками. Ця група параметрів називається параметрами розмірності.

Досконалість обраної схеми характеризують такі функції геометрії планера, як коефіцієнт підйомної сили C_y , коефіцієнт лобового опору C_x , аеродинамічна якість K і ККД силового агрегату – функції газодинамічних характеристик двигуна, насамперед, питомої витрати палива C_p і відносної маси палива mt [11].

Разом ці параметри однозначно визначають льотно-технічні характеристики літака. Варіюючи їх, дизайнер досягає проектних цілей.

Таким чином, задача формування зовнішнього вигляду включає підзадачі структурного синтезу (визначення схемних рішень) і параметричного синтезу (визначення оптимальних значень параметрів розмірності).

Традиційним вирішенням проблеми вибору раціональних варіантів конструктивних рішень на етапі попереднього проектування є використання емпіричних або наближених аналітичних залежностей для визначення аеродинамічних і льотних характеристик [11]. Цей же шлях запропоновано в роботах останніх років [12], [13]. Подібний підхід до проблеми (пошук аналогів, перерахування комбінацій ознак схеми та розрахунок характеристик на основі спрощених залежностей) також переважає в роботах [12], [13].

Приватними критеріями для оцінки і порівняння варіантів на етапі попереднього проектування можуть виступати тільки льотні характеристики. Основним джерелом нормативних даних є «Норми льотної придатності для ПС різних категорій», наприклад [14], і практично єдина категорія властивостей ПС, яку можна перевірити на відповідність стандартам на цьому етапі, – це льотні характеристики, оскільки ці властивості мають найбільш повне кількісне представлення в них. Тому цілком природно прагнути отримати більш точну оцінку цих характеристик на якомога ранніх стадіях розвитку. Однак відомі спрощені залежності не можуть охопити весь широкий діапазон швидкостей, зазначених у нормах.

Доцільність такого рішення підтверджується провідними тенденціями розвитку аналізу програмної інженерії (CAE) останніх років, насамперед наступними:

1 Перехід до мультидисциплінарного (так званого мультифізичного) моделювання для вирішення суміжних задач, що вимагають одночасного аналізу процесів різної фізичної природи, наприклад, обтікання конструкції газом і її деформація під дією цього потоку.

2 Перехід від верифікації проекту до попереднього моделювання; досвід використання інструментарію *SimDesigner 2004* в середовищі *CATIA V5* показав, що перенесення аналізу проектних рішень на більш ранні стадії проектування значно підвищує ефективність САПР. Розвитком цього напрямку став проект *SIMULIA* компанії *Dassault Systemes*, який заклав основу нового класу засобів САПР – реалістичного моделювання, також званого швидким аналізом та перевіркою альтернатив проектування (англ. – *Rapid Analysis and Validation of Design Alternatives, RAVDA*); аналогічні розробки ведуться іншими компаніями.

3 Використання систем CAE не тільки для верифікації, а й для синтезу проектних рішень. Типовим прикладом є методи оптимізації форми об'єктів шляхом ітераційного виконання процедур аналізу напруженого стану та подальшого виключення з моделі найменш навантажених скінченних елементів, у результаті чого формується конструкція наближена до рівної міцності.

Для апробації запропонованої технології попереднього проектування було розроблено прототип програмного комплексу у складі САПР *SolidWorks*, фірмового додатку для автоматизованого синтезу геометричної моделі *Plane3D*, системи *Flow Vision CFD* та авіасимулятора *Flight Gear*. У комплексі також використовується програмне забезпечення (ПЗ) загального призначення – текстовий редактор *Notepad* для зберігання координат точок стандартних аеродинамічних профілів, табличний процесор *MS Excel* для зберігання характеристик аналогових літаків і результатів розрахунків, графічний редактор *Blender* для перетворення 3D моделі у формат, необхідний для симулятора польоту. Схема комплексу представлена на рис. 7.

Нижче наведено основні етапи роботи з аналізу льотно-технічних характеристик проектного літака.

Геометрична модель літака, яка була створена у програмі *Plane3D* спільно з *SolidWorks* (рис. 8), транслюється та передається в систему *Flow Vision CFD* у форматі *VRML*.

У системі *Flow Vision* генерується сітка кінцевих об'ємів (рис. 9), задаються умови адаптації сітки, граничні та початкові умови, а потім виконується віртуальна продувка моделі в режимі, який цікавить дослідника.

Отримані результати – значення або графіки зміни витрат, тисків, аеродинамічних сил та інших параметрів (рис. 10–11) – підлягають обробці для відповідного налаштування динамічного блоку тренажера.

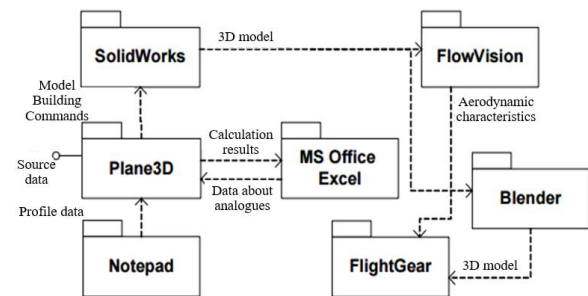


Рис. 7 – Структурна схема програмного комплексу

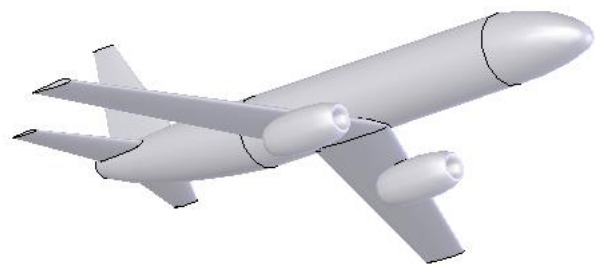


Рис. 8 – Геометрична модель літака

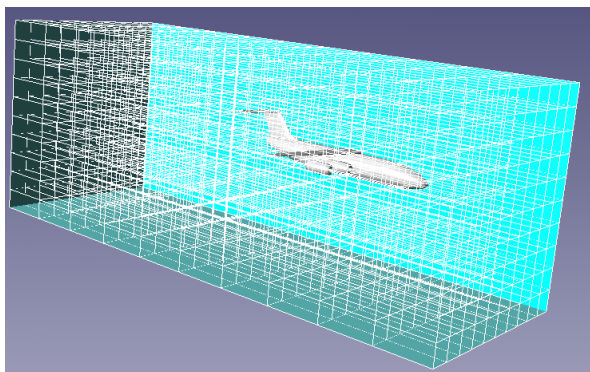


Рис. 9 – Кінцева об'ємна сітка в системі *Flow Vision*

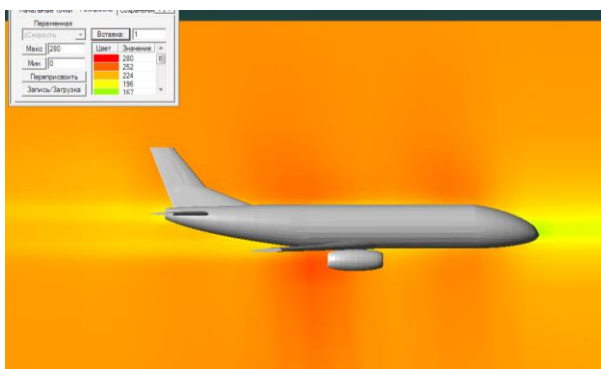


Рис. 10 – Розподіл швидкості в площині симетрії літака

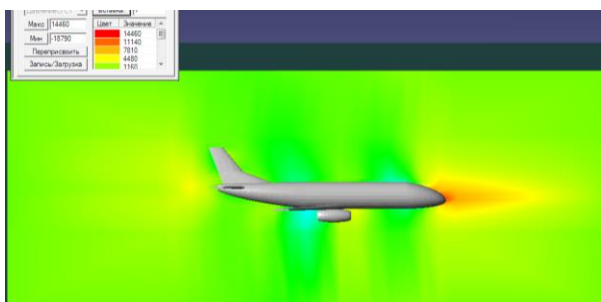


Рис. 11 – Розподіл тиску в площині симетрії літака

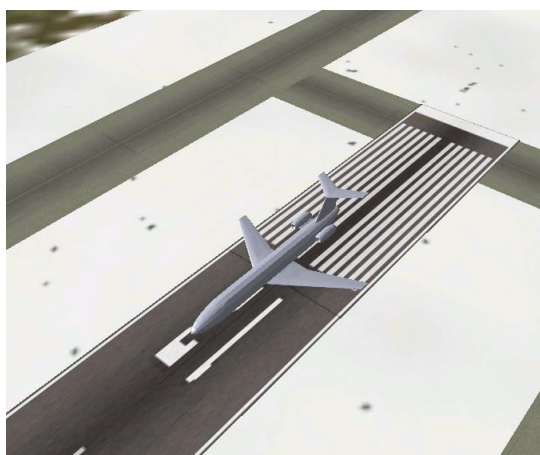


Рис. 12 – Модель літака, завантажена в симулятор

Після завершення налаштування симулятора модель перетворюється у формат *AC3D* і завантажується в симулятор для проведення віртуальних льотних випробувань (рис. 12).

Архітектура мультиагентної платформи для вирішення задач структурно-параметричного синтезу об'єктів

Проектування складних технічних об'єктів вимагає одночасного врахування великої кількості різного роду зв'язків (причинно-наслідкових, часових, просторових) між їх елементами та властивостями і процесами різної фізичної природи (механічними, електричними, гідравлічними та ін.). Побудова єдиної інформаційної або математичної моделі таких об'єктів практично неможлива, оскільки для опису різних типів відносин і зв'язків потрібен різний математичний апарат – різні методи континуальної і дискретної математики. Принцип декомпозиції призводить до формування замість єдиної моделі певного набору підмоделей (приватних моделей), кожна з яких відображає певний аспект розгляду, тобто певну точку зору на об'єкт проектування. Кількість і типи цих підмоделей можуть змінюватися під час переходу між ієрархічними рівнями (продукт, збірка, вузол, деталь) і етапами розробки. Для літального апарату найважливішими з цих підмоделей є геометричні, вагові, аеродинамічні моделі, моделі динаміки польоту, силової установки, компоновання та центрування, ефективності та економічні моделі [11]. Варто зауважити, що перелічені моделі стосуються лише функціонального аспекту, а в задачах ресурсного (міцного), конструктивного та технологічного проектування до загального переліку додаються відповідні підмоделі.

Однак розбиття опису складного об'єкта на окремі моделі та відповідні групи завдань, істотно спрощуючи процес моделювання в кожному аспекті, настільки ж істотно ускладнює процедури узгодження конкретних проектних рішень, отримуваних в цих рамках. Декомпозиція технічної системи зменшує явну складність, але збільшує так звану неявну складність, пов'язану з труднощами визначення очікуваних властивостей системи за характеристиками її елементів, що є проявом властивості емерджентності складних систем [11].

Усю сукупність задач, що вирішуються, можна класифікувати за такими ознаками, як ієрархічний рівень, аспект і вид задачі (рис. 13).

На рис. 13 зображена зона, яка приблизно відповідає завданням формування зовнішнього вигляду виробу. На рис. 14, як приклад наведено перелік проектних завдань для одного з агрегатів – крила.

По кожній осі «системного куба» (ієрархічних рівнів, типів завдань, аспектів) допускати

рух тільки в одному напрямку, але послідовність окремих кроків по різних осях не обмежена нічим, крім наявності необхідної початкової даних, і ніде не обумовлено, в якому напрямку робити перші кроки, за яких умов змінювати напрямок руху, і скільки часу взагалі допустимо рухатися в одному напрямку. Крім того, буде зустріч зі «зв'язаними» (зв'язаними) задачами, множини змінних яких перетинаються, як, наприклад, у задачах аеропружності.

Це означає, що стратегія проектування може бути не настільки жорстко регламентованою, як у випадку з послідовним «аспектним» проходом. Однак це вимагає іншої організації інформаційних і процедурних компонентів програмного забезпечення САПР. Зокрема, гнучке керування послідовністю проектних процедур, наближене до адаптивної стратегії проектування, може забезпечувати багатовимірну модель об'єкта проектування. Однією із сучасних тенденцій розвитку САПР є саме прагнення розробників до побудови систем взаємопов'язаних моделей, що характеризують різні аспекти опису об'єкта проектування. Прикладом такого підходу є робота [11], де поєднані модулі вагового проектування, аеродинамічного та міцнісного розрахунків. До цього напрямку належать також роботи ряду зарубіжних наукових груп, зокрема, Делфтського технічного університету (Нідерланди), де було створено орієнтовану на знання систему *Multi-Model Generator (MMG)*, схему якої показано на рис. 15. Система використовує засоби мови *GDL (General-purpose Declarative Language)*. Комбінована інформаційна модель об'єкта охоплює аеродинамічний, силовий і виробничо-економічний «шари».

На сьогоднішній день розроблено ряд теорій, пов'язаних з вирішенням проблеми багатовимірного моделювання, витoki яких можна побачити в

загальній теорії дизайну Йосікави-Томіями, а надалі простежити в численних модифікаціях теорії *FBS* (функція – режим операції – структура) [15]. Ці теорії мають на увазі взаємодію і походження одного аспекту з іншого, що є абсолютно правильним з точки зору послідовності фаз проектування. Але для кожного аспекту вводиться концепція власної моделі знань і, як наслідок, необхідні переходи від однієї моделі до іншої при кожному переході до наступної фази проектування.

З цієї причини більшість теорій вважаються недостатньо формалізованими, оскільки перелік моделей представлення знань є жорстко визначеним і не може бути доповнений чи змінений. Насправді ці теорії занадто формалізовані, оскільки формально описують кожну (але не всі) фазу та модель наперед, що не дозволяє абстрагуватися від конкретних проблем проектування. Моделі та вигоди не слід класифікувати як функціональні чи структурні.

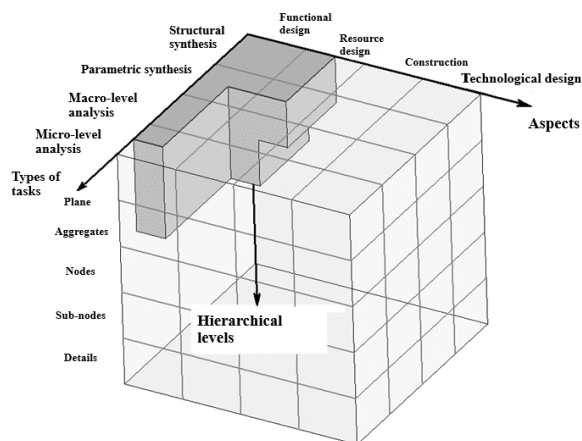


Рис. 13 – Класифікація проектних завдань

Аспект	Структурний синтез	Параметричний синтез	Аналіз на макрорівні	Аналіз на мікрорівні
Функціональний дизайн/ проектування	Визначення форми крила, типів і розміщення засобів механізації	Розрахунок геометрії крила та його частин (площа, розміри)	Розрахунок аеродинамічних характеристик (C_x , C_y та ін.)	Чисельне моделювання обтікання крила
Дизайн ресурсу	Визначення конструктивної схеми крила (тип та кількість несучих елементів)	Проектний розрахунок розмірів несучих елементів	Кінематичний та динамічний аналіз рухомих елементів	Чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів крила
Будівництво	Схема розміщення елементів конструкцій і обладнання (палива, приводів механізації, шасі та ін.)	Розподіл елементів компонування за перерізами	Розрахунок врівнювання	
Технологічний дизайн	Вибір схеми технологічної поділки та складання листового штампування (малюнок, покриття тощо), кількості переходів тощо.	Розрахунок монтажних розмірних ланцюгів	Конструкція для складання	Чисельне моделювання процесу формотворення та напружено-деформованого стану заготовки

Рис. 14 – Завдання з проектування літаків на рівні підрозділу «Крило»

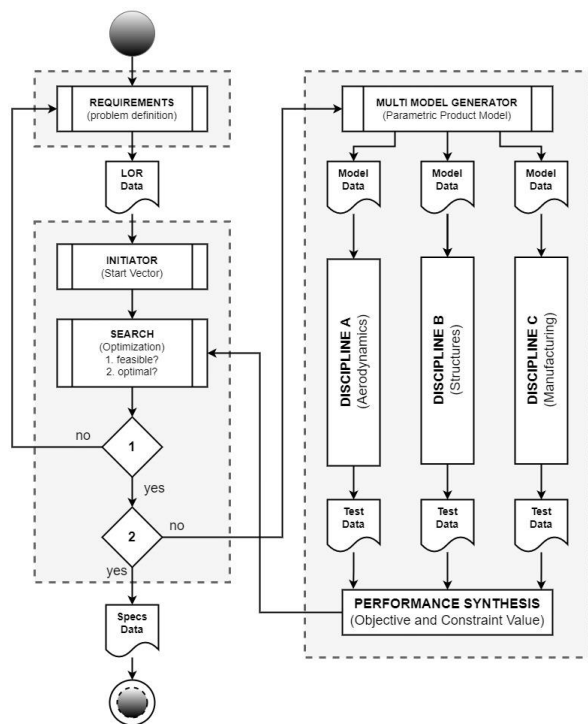


Рис. 15 – Системна діаграма орієнтованого на знання мультимодельного генератора

Якщо визначити певний формат опису вимог, який можна формалізувати не в рамках специфіки його опису, а універсально для всіх можливих варіантів подання та опису вимог, то поділ проектування на фази буде надзвичайно показовим, а робота системи буде здійснюватися поза етапами проектування.

Можна припустити, що основною причиною поділу процесу проектування на фази і стадії є, мабуть, захисна реакція людини на два основні фактори:

- 1) Недостатній обсяг людської пам'яті, що вимагає участі різних спеціалістів для роботи над одним досить складним проектом.
- 2) Необхідність узгодження приватних («одноаспектних») рішень, прийнятих різними розробниками без контактів один з одним.

Таким чином, під час переносу в область автоматизованого проектування всіх традицій організації неавтоматизованого проектування, людина нав'язує комп'ютеру свій недосконалий спосіб роботи, породжений обмеженнями не комп'ютера, а її можливостей.

У методах проектування більшості технічних об'єктів послідовність етапів встановлена досить жорстко, наприклад:

- для літака: аеродинаміка → динаміка польоту → структура та міцність → технологія ...;
- для електродвигуна: електромагнітний розрахунок → тепловий розрахунок → розрахунок вентиляції → розрахунок шуму та вібрації → ме-

ханічний розрахунок → розрахунок надійності та ін.

Для автоматизованої системи обидва вищезазначені чинники не є вирішальними (за умови формалізації процедур узгодження рішень), вона дійсно могла б працювати «поза фазами проектування», і їй не потрібно встановлювати послідовність визначення властивості різних груп настільки суворо/жорстко. Але для цього потрібні зовсім інші методи проектування, які не передбачають поділ властивостей за категоріями (функціональні, конструктивні, вартісні тощо), або за фізичною природою (механіка, електродинаміка, гідравліка тощо). Поки важко оцінити шкоду від непотрібних обмежень, але очевидно, що все, що обмежує свободу проектувальника, чи то в змісті дій, чи то в їх послідовності, не є дуже корисним.

Таким чином, можна розробити максимально гнучку систему, в якій робота з різного роду вимогами буде рівномірною [16]. Делегуючи розрахунки та перевіряючи відповідність вимогам до конкретних агентів, буде отримано «конструктор дизайну», яким може скористатися будь-який профільний фахівець, акумулюючи свої знання в базі знань.

Кожен елемент цієї бази знань є агентом, має свої методи розрахунку та перевірки відповідності вимогам. Тому під час редизайну робота дизайнера значно спрощується за рахунок повторного використання раніше спроектованих елементів. При цьому властивості елемента не поділяються на структурні та функціональні. Властивості – це просто параметри елемента, основна функція яких – визначення відповідності вимогам, і, лише в другу чергу, вони відповідають за візуалізацію результату – фізичної або функціональної моделі спроектованого продукту.

З цієї точки зору різні види проектування (конструктивне, функціональне, концептуальне) перестають бути вирішальними чинниками у виборі стратегії проектування, в тому числі й автоматизованого проектування. Багатомірність не може бути досягнута, доки кількість аспектів визначається програмістом, який розробляє програмне забезпечення для спеціалістів у галузі. Необхідно не розширювати кількість підходів (аспектів) до проектування (цю тенденцію можна побачити в ряді робіт: загальна теорія дизайну Йосікави-Томіями – проектування відповідно до вимог структури, потім розширення цієї теорії за функціональним аспектом Брача, парний дизайн [17]), а розробити один універсальний підхід, який визначатиме N аспектів, де N залежатиме безпосередньо від кінцевого користувача.

Проблема переходу від однієї стадії дизайну до іншої є ілюзією, яку вводить у сучасний дизайн потреба відтворити образ спроектованого продукту з усіх точок зору, формуючи нову модель для ко-

жної грані дизайнерського рішення. Технолог і конструктор, працюючи над одним завданням, бачать його по-різному, але суть завдання від цього не змінюється, і якщо об'єднати знання технолога і конструктора, то проектування двох моделей з подальшим зчепленням і всі виникаючі труднощі були б безглуздими.

Зауважимо, що з цієї точки зору узаконений багатьма стандартами етап забезпечення технологічності конструкції виробу (англ. – *Manufacturability of a Product DESIGN, MPD*) між конструкторською та технологічною підготовкою виробництва є одним із найбільш одіозних результатів штучного переходу до послідовного проектування: його основний зміст полягає саме в перегляді частини конструкторських рішень, прийнятих без урахування думки технологів (тобто в рамках одного аспекту). Тут можна побачити гучно засуджений усіма «редизайн», але зведений у всьому світі в ранг обов'язкової процедури.

Перевагою автоматизованої системи є те, що вона може містити необмежену кількість знань з різних предметних галузей, оперуючи однією моделлю. При цьому не обов'язково, як зазначено в роботах Браха, спочатку перевіряти відповідність структурним вимогам, а потім шукати перетини, що задовольнятимуть функціональні вимоги, – потрібно лише переконатися, що всі вимоги виконуються. Більше того, при вирішенні конкретної задачі все одно будуть потрібні додаткові аспекти.

Отже, система проектування повинна складатися з агентів з рядом властивостей, поділ яких на будь-які категорії є дуже умовним і вводиться виключно для зручності кінцевого користувача. Кожен агент має методи розрахунків і способи перевірки відповідності певній вимозі. Крім того, система має ряд вимог, кожен агент може відповідати або не відповідати будь-якій вимозі. Однак параметричні та структурні обмеження також є вимогами. У такій системі проектування зводиться до вибору набору агентів, які відповідають усім вимогам. Задача розрахунку параметрів і структури є вкладеною задачею вибору, оскільки при визначенні виконання або невиконання вимоги, обчислюються всі можливі реалізації агенту. Послідовність фаз проектування неявно враховується під час розрахунку моделі, оскільки раніше визначені властивості зазвичай використовуються для визначення значення властивості. Загалом спочатку визначаються властивості аспектів попередніх фаз проектування, наприклад, від функції до структури.

Згідно з поставленими вимогами, агент є високомобільною сутністю, яка може зупинити своє виконання, змінити внутрішню структуру та продовжити виконання. Збільшену фізичну структуру агента показано на рис. 16.

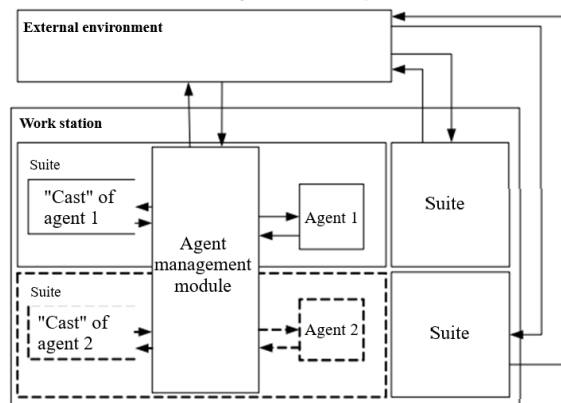


Рис. 16 – Розширена агентська структура

Визначення кожної сутності, зображеної на рис. 16:

1 Агент. Давайте визначимо агента як свого роду автономну сутність, яка здатна відчувати та діяти через рецептори та ефектори. У цьому випадку програмна реалізація, сприйняття і вплив будуть здійснюватися через передачу повідомлень. Визначаючи агента, багато людей орієнтуються на його інтелектуальність. Властивість інтелектуальності залежить від конкретної реалізації поведінки агента і безпосередньо не залежить від його архітектури. Архітектура в цьому випадку повинна бути хоча б такою, щоб дозволяти проявити інтелектуальність. У цьому випадку це можна зробити через канали введення/виведення (відчуття/вплив).

2 Зовнішнє середовище визначається як сукупність об'єктів, які не належать даному агенту і сприймаються ним як окрема сутність. Звідти надходять сигнали, які агент може ігнорувати, якщо він не знає типу сигналів, або на які він може відповісти якоюсь дією. Таким чином, якщо зовнішнє середовище визначити як набір агентів, то для агента без рецепторів і ефекторів цей набір буде порожнім. Чим більший набір, тим більше агент знає про навколишнє середовище.

3 Модуль керування агентом є статичною частиною агента і відповідає за реалізацію специфікації агента в пам'яті, передачу в неї вхідних повідомлень, подій, відправку повідомлень у зовнішнє середовище. Відразу варто обумовити, що на цьому рівні буде відбуватися синхронізація з іншими агентами, блокування доступу до агента, вирішення посилань агента, зупинка і запуск агента, збереження його стану.

4 «Cast/Полі» агента – таким чином ми позначимо всі мета- та динамічні дані про об'єкт: його специфікацію, останній збережений стан, асоційовані дані.

5 Агентський набір – це набір даних і робочих модулів, які відносяться до конкретного агента.

Необхідно з'ясувати суть зв'язку між модулем управління агентом і самим агентом. На рис. 16 показано випадок, коли один модуль управління може керувати кількома агентами. Тут можна провести аналогію з CORBA-сервером, який при отриманні нового запиту відправляє його адресату – конкретному екземпляру об'єкта. У цьому випадку ситуація дещо інша, але суть залишається незмінною: по суті, модуль управління агентом є його серверною частиною, яка відправляє призначені для нього повідомлення в домен агента. Створення нового агента може відбуватися як при клонуванні мобільної частини, наприклад, якщо необхідно перенести нового агента в інше середовище виконання, грубо кажучи, на інший комп'ютер, або без клонування мобільної частини, тоді одному модулю управління відповідатимуть кілька агентів. Однак, надалі будемо розглядати модуль керування та агента в цілому. Процес клонування модуля управління має бути прозорим для кінцевого творця агента. Приймаючи таку архітектуру, отримуємо мобільний агент, для існування якого не потрібні додаткові компоненти.

Очевидно, що навіть найдосвідченіший фахівець не впорається з поданням цілісності при створенні складних систем. Звідси бере початок міф про неминучість поділу процесу проектування на аспекти з різними моделями. Але автоматизована система може мати базу знань необмеженої складності, і вирішення проблеми вибору двигуна

для літака буде здійснюватися за тим же алгоритмом, що і вибір простого механізму.

Вибір типу двигуна можна здійснити на основі залежності ККД тяги від числа M прольоту (рис. 17).

Механізмом відповідного модуля бази знань є таблиця рішень (табл. 1). При цьому вибір агента не слід розуміти як вибір готового результату з уже наявного списку.

Розрахунок параметрів і визначення конструкції в проектуванні також є своєрідним вибором величин або елементів виробу, як, наприклад, розрахунок розмірів двигуна в табл. 2. У разі багатовимірної агентної мережі (бази знань), описаної вище, до цих параметрів вибору додається вибір методу розрахунку, тобто вибір рішення у вигляді того чи іншого агента.

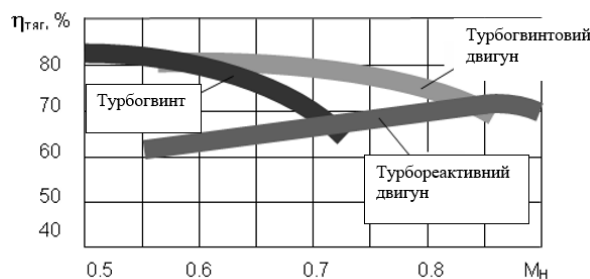


Рис. 17 – Залежність тягового ККД двигуна від числа

Таблиця 1 – Таблиця рішень для визначення типу та характеристик двигуна

Номер рейсу M	До 0,55	0,55 – 0,83	Понад 0,83
Тип двигуна	Турбогвинтовий	Турбогвинтовий двигун	Турбореактивний двигун
Діаметр двигуна (пропелера), м	$\left(\frac{N_0}{8,1}\right)^{0,25}$	–	$0,1G_B^{1,5} \varphi_1(R_0)\varphi_2(\pi_k^*)\varphi_3(T_3)$

Примітка: N_0 – потужність; G_B – витрата повітря за секунду; R_0 – стартова тяга; π_k^* – ступінь підвищення тиску в компресорі; T_3 – температура газу перед турбіною; φ_i – статистичні коефіцієнти.

Для автоматизованої системи традиційний поділ тактико-технічних вимог (ТТВ) на тактико-технічні є неактуальним: з тактичних (у загально-технічному плані) виділяються не тільки технічні вимоги, але й ряд конструктивних («структурних») особливостей отримуються з тактичних (у загально-технічному сенсі «функціональних») вимог за одну ітерацію, наприклад, використовуючи правила виробництва форми:

ЯКЩО ТТВ передбачають стандартні умови використання повітряного судна (наприклад, дозвуковий пасажирський або транспортний),

ПОТІМ До складу літака повинні входити: фюзеляж, крило, оперення, шасі.

ЯКЩО задана крейсерська швидкість значно перевищує посадкову швидкість (визначається класом аеродрому, зазначеним у ТТВ),

ПОТІМ конструкція крила повинна включати закриток разом із вузлами його кріплення.

Звідси впливає, що в умовах комп'ютерної підтримки прийняття проектних рішень завдання сучасних розробників – подолати бар'єр формалізації знань, представити їх як певну цілісність, що відповідає єдиному, гнучкому і масштабованому шаблону.

Розглянутий підхід був експериментально застосований при розробці малого літального апарату в Інституті проблем фізичного моделювання Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут». У табл. 2 наведені планові показники при підготовці проекту.

Виявлено, що під час реалізації проекту необхідно внести тимчасові зміни в організаційну структуру для скорочення часу на узгодження рішень, скорочення дозволів. На час виконання

Таблиця 2 – Планові показники проекту

Назва етапу	Тривалість етапу, місяців	Тривалість по відношенню до проекту в цілому, %
Маркетингове дослідження	1	3,33
Обґрунтування можливості створення	2	10,00
Проект Аван (ТЕО)	2	16,67
Подача заявки в державне авіаційне агентство	1	20,00
Ескізний проект	2	26,67
Створення макета	0,25	27,50
Створення технічного виробу	2	34,17
Створення робочої проектної документації	2	40,83
Підготовка до виробництва прототипу	1	44,17
Прототипне виробництво	6	64,17
Підготовка до тестування	1	67,50
Льотно-розвивальні випробування	6	87,50
Коригування проектної документації	0,25	88,33
Сертифікаційні випробування	2	95,00
Погодження документації	1	98,33

Таблиця 3 – Фактичні дані

Назва етапу	Тривалість етапу, місяців	Тривалість проекту по відношенню запланованих дат, %
Маркетингове дослідження	1,00	3,33
Обґрунтування можливості створення	2,00	10,00
Проект Аван (ТЕО)	2,00	16,67
Подача заявки в державне авіаційне агентство	1,00	20,00
Ескізний проект	5,50	38,33
Створення макета	0,25	39,17
Створення технічного виробу	1,00	42,50
Створення робочої проектної документації	1,00	45,83
Підготовка до виробництва прототипу	1,00	49,17
Прототипне виробництво	4,50	64,17
Підготовка до тестування	1,00	67,50
Льотно-розвивальні випробування	1,25	71,67
Коригування проектної документації	0,00	71,67
Сертифікаційні випробування	0,75	74,17
Погодження документації	1,00	77,50

проекту необхідно внести такі проектні зміни в організаційну структуру підприємства: надати в проектну групу посаду економіста для передачі сектору міцності, аеродинаміки, силової установки, технології в підпорядкування проектною групи; у підпорядкування головному конструктору передати відділ авіоніки, систем управління та дослідної бригади; а також створити умови для можливості використання дослідно-промислової продукції через головного конструктора. Це не означає, що необхідно розформувати існуючі підрозділи, але повинен бути створений внутрішній порядок, згідно з яким, на час дії проекту буде існувати така організаційна структура самого проекту. Фактичні дані, отримані в ході реалізації проекту, представлені в табл. 3.

Слід зазначити, що вироби складної техніки є, перш за все, унікальними, тому і проекти їх створення мають досить унікальний характер.

З отриманих даних можна побачити, що фактичні дані протягом усього життєвого циклу отримують значне прискорення на тих етапах, які

пов'язані зі сприйняттям вихідних даних і виконанням роботи без супутніх помилок, пов'язаних з нерозумінням вимог до продукту. Фахівці підбирають потрібний опис і ефективніше виконують поставлені перед ними завдання. Але такі добрі результати можна пов'язати і з досвідом реалізації подібних проектів серед фахівців кожного відділу. Для кожного конструкторського бюро відсоток економії часу буде різним і коливатиметься від 7 % до 21 %.

Висновки

Процедура проектування є інваріантною для широкого класу інженерних об'єктів і являє собою побудову повного опису спроектованого об'єкта, що складається з трьох компонентів: *F*-образу, *M*-образу і *N*-образу.

Провідним компонентом опису є *F*-образ об'єкта.

Процедура побудови функціонального опису формалізується і може виконуватися в автоматично.

зованому режимі. Її доцільно використовувати як стандартизовану процедуру при розробці програмного забезпечення для підтримки *LRC*. Під час випробувань дослідного зразка комплексу були отримані основні результати, які наведені нижче.

1 Встановлено можливість включення задач аеродинамічного аналізу та моделювання польоту в єдиний процес проектування літака на ранніх етапах розробки.

2 При використанні описаного підходу час розробки скорочується до 7 %, якщо розробка виконується ескізним проектом. У разі використання запропонованого підходу протягом усього життєвого циклу проекту досягається скорочення в термінах до 21 %.

3 Необхідність більш ретельної, ніж зазвичай прийнято в задачах формування зовнішнього вигляду, побудови геометричної моделі виявляється через чутливість систем *CFD* до гладкості поверхонь моделі.

4 Основні труднощі, що перешкоджають повній автоматизації завдання формування зовнішнього вигляду літака:

а) відсутність об'єктивної інформації про точність результатів моделювання в різних тренажерах – це може вимагати окремих досліджень для порівняння можливостей різних систем моделювання польоту;

б) відсутність (з об'єктивних причин) на ранніх етапах розробки ряду вихідних даних для тренажера (ці дані, в принципі, ще не можуть бути отримані); для цього може знадобитися пошук прототипу морфологічними методами, наприклад [16], і використання його характеристик як першого наближення;

в) трудомісткість обробки результатів аеродинамічного аналізу та підготовки даних для тренажера за результатами віртуальної продувки; для цього може знадобитися створення програм-перекладачів;

г) відсутність єдиного формату подання аеродинамічних і льотних характеристик літака.

Список літератури

- Ek, K. Life Cycle Sustainability Performance Assessment Method for Comparison of Civil Engineering Works Design Concepts: Case Study of a Bridge / K. Ek, A. Mathern, R. Rempling, P. Brinkhoff, M. Karlsson, M. Norin, // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – Vol. 17, Is. 21. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17217909>.
- Pinheiro Melo, S. Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies—Challenges, Methods and Tools / S. Pinheiro Melo, A. Barke, F. Cerdas, C. Thies, M. Mennenga, T. S. Spengler, C. Herrmann // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, Is. 14. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su12145663>.
- Müller, J. R. Design Space Exploration of a Jet Engine Component Using a Combined Object Model for Function and Geometry / J. R. Müller, M. Panarotto, O. Isaksson // Aerospace. – 2020. Vol. 7, Is. 12. – DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace7120173>.
- Bykov, A. Design and Statistical Analysis of the Cockpit for the Flight Simulator / A. Bykov, T. Plastun, O. Chubukina, M. Yermiyev, A. Kryshchtopa // Open Information and Computer Integrated Technologies. – 2021. – No. 94. – P. 122–130. – DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.94.10>.
- Kozma, D. System of Systems Lifecycle Management—A New Concept Based on Process Engineering Methodologies / D. Kozma, P. Varga, F. Larrinaga // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Is. 8. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app11083386>.
- Kawakami, K. A Functional Approach to Life Cycle Simulation for System of Systems / K. Kawakami, S. Fukushige, H. Kobayashi // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 61. – P. 110–115. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.255>.
- Kritskiy, D. N. Content Management Method of Complex Technical System Development Projects / D. N. Kritskiy, E. A. Druzhinin, A. V. Karatanov, O. S. Kritskaya ; Ed: N. Shakhovska, M. O. Medykovsky // Advances in Intelligent Systems and Computing IV. Selected papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2019, September 17–20, 2019, Lviv, Ukraine. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1080. – P. 293–303. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_21.
- Половинкин А. И. Основы инженерного творчества : учеб. пособ. / А. И. Половинкин. – 1988. – 368 с. – ISBN 5-217-00016-3.
- Hubka, V. Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design / V. Hubka, W. Ernst Eder. – 2d ed. – Berlin : Springer-Verlag, 1988. – Vol. XIV. – 278 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-52121-8>.
- Ylmén, P. Managing Choice Uncertainties in Life-Cycle Assessment as a Decision-Support Tool for Building Design: A Case Study on Building Framework / P. Ylmén, J. Berlin, K. Mjörnell, J. Arfvidsson // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, Is. 12. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su12125130>.
- Frederic B. An Aircraft Development Methodology Aligning Design and Strategy to Support Key Decision Making / B. Frederic, F. Christopher, D. N. Mavris // 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. January 2016, San Diego, California, USA. – AIAA 2016-1661. – DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1661>.
- Kritskiy, D. Unmanned Aerial Vehicle Mass Model Peculiarities / D. Kritskiy, S. Yashin, S. Koba ; Ed.: S. Shkarlet, A. Morozov, A. Palagin // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020). Selected Papers of 15th International Scientific-practical Conference, MODS, 2020 June 29– July 01, Chernihiv, Ukraine. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1265. – P. 299–308. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29.
- Gorbunov, A. A. The Method of Selecting Aircraft Conceptual Design Parameters at the Stage of Feasibility Study / A. A. Gorbunov, A. D. Pripadchev, V. V. Elagin, A. G. Magdin, E. M. Ezerskaya // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2021. – Vol. 69, No. 6. – P. 193–198. – DOI: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I6P228>.
- Raymer, D. P. Enhancing Aircraft Conceptual Design using Multidisciplinary Optimization : Doctoral Thesis. –Stockholm : Royal Institute of Technology, 2002. – 150 p. – ISBN 91-7283-259-2 (print).
- Saporito M. Framework development for robust design of novel aircraft concepts / M. Saporito, A. Da Ronch, P. Schmollgruber, N. Bartoli // 3AF Aerospace Europe Conference 2020, 25–28 February 2020, BORDEAUX, France. – P. 1–11. – URL: <https://hal.science/hal-02904365/document> (дата звернення: 25.10.2023).
- Rentema, D. 11. An AI Tool for Conceptual Design of Complex Products / D. Rentema, E. Jansen // Design Research in the Netherlands. – 2000. – P. 119–131. – URL:

<https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/3307075/582810.pdf>
(дата звернення: 25.10.2023).

17. Braha, D. Topological structures for modeling engineering design processes / D. Braha, Y. Reich // *Research in Engineering Design*. – 2003. – Vol. 14. – P. 185–199. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00163-003-0035-3>.

References (transliterated)

- Ek, K., Mathern, A., Rempling, R., Brinkhoff, P., Karlsson, M., Norin, M. (2020), "Life Cycle Sustainability Performance Assessment Method for Comparison of Civil Engineering Works Design Concepts: Case Study of a Bridge", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 7, is. 21, <https://doi.org/10.3390/ijerph17217909>.
- Pinheiro Melo, S., Barke, A., Cerdas, F., Thies, C., Mennenga, M., Spengler, T. S., Herrmann, C. (2020), "Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies—Challenges, Methods and Tools", *Sustainability*, vol. 12, is. 14, <https://doi.org/10.3390/su12145663>.
- Müller, J. R., Panarotto, M., Isaksson, O. (2020), "Design Space Exploration of a Jet Engine Component Using a Combined Object Model for Function and Geometry", *Aerospace*, vol. 7, is. 12, <https://doi.org/10.3390/aerospace7120173>.
- Bykov, A., Plastun, T., Chubukina, O., Yermiyev, M., & Kryshchtopa, A. (2021), "Design and Statistical Analysis of the Cockpit for the Flight Simulator", *Open Information and Computer Integrated Technologies*, no. 94, pp. 122–130, <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.94.10>.
- Kozma, D., Varga, P., Larrinaga, F. (2021), "System of Systems Lifecycle Management—A New Concept Based on Process Engineering Methodologies", *Applied Sciences*, vol. 11, is. 8, <https://doi.org/10.3390/app11083386>.
- Kawakami, K., Fukushige S., Kobayashi H. (2017), "A Functional Approach to Life Cycle Simulation for System of Systems", *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 110–115, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.255>.
- Kritskiy, D. N., Druzhinin E. A., Karatanov A. V., Kritskaya O. S. (2020), Content Management Method of Complex Technical System Development Projects", *Advances in Intelligent Systems and Computing IV. Selected papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2019, September 17–20, 2019, Lviv, Ukraine. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1080, pp. 293–303 https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_21.
- Polovinkin, A. I. (1988), *Osnovy inzhenernogo tvorchestva* [Fundamentals of Engineering Creativity], 368 p, ISBN 5-217-00016-3.
- Hubka, V., Ernst Eder W. (1988), *Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design*, vol. XIV, 278 p, Springer-Verlag, Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-52121-8>.
- Ylmén, P., Berlin, J., Mjörnell, K., Arfvidsson, J. (2020), "Managing Choice Uncertainties in Life-Cycle Assessment as a Decision-Support Tool for Building Design: A Case Study on Building Framework", *Sustainability*, vol. 12, is. 12, <https://doi.org/10.3390/su12125130>.
- Frederic B., Christopher F., Mavris D. N. (2016), "An Aircraft Development Methodology Aligning Design and Strategy to Support Key Decision Making", *57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. January 2016, San Diego, California, USA, AIAA 2016-1661*, <https://doi.org/10.2514/6.2016-1661>.
- Kritskiy, D., Yashin S., Koba S. (2021), "Unmanned Aerial Vehicle Mass Model Peculiarities", *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020). Selected Papers of 15th International Scientific-practical Conference, MODS, 2020 June 29–July 01, Chernihiv, Ukraine. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1265, pp. 299–308, https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29.
- Gorbunov, A. A., Pripadchev, A. D., Elagin, V. V., Magdin, A. G., Ezerskaya E. M. (2021), "The Method of Selecting Aircraft Conceptual Design Parameters at the Stage of Feasibility Study", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 69, no. 6, pp. 193–198, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I6P228>.
- Raymer, D. P. (2002), *Enhancing Aircraft Conceptual Design using Multidisciplinary Optimization: Doctoral Thesis*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 150 p, ISBN 91-7283-259-2 (print).
- Saporito M., A. Da Ronch, Schmollgruber P., Bartoli N. (2020), "Framework development for robust design of novel aircraft concepts", *3AF Aerospace Europe Conference 2020, 25–28 February 2020, BORDEAUX, France*, pp. 1–11, Access mode: <https://hal.science/hal-02904365/document> (accessed 12 October 2023).
- Rentema, D., Jansen E. (2000), "11. An AI Tool for Conceptual Design of Complex Products", *Design Research in the Netherlands*, pp. 119–131, Access mode: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/3307075/582810.pdf> (accessed 12 October 2023).
- Braha, D., Reich Y. (2003), "Topological structures for modeling engineering design processes", *Research in Engineering Design*, vol. 14, pp. 185–199, <http://dx.doi.org/10.1007/s00163-003-0035-3>.

Надійшла (received) 22.10.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Крицький Дмитро Миколайович (Krytskiy Dmytro) – кандидат технічних наук, доцент каф. інформаційних технологій проектування, декан факультету літакобудування, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел. (050) 166-49-51; e-mail: d.krickiy@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0194>, Scopus Author ID: 57195913632.

Попов Олексій Вікторович (Popov Alexey) – аспірант каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; e-mail: o.v.popov@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2526-9140>.

Буков Андрій Миколайович (Bykov Andriy) – асистент каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел.(068)740-23-09; e-mail: a.bykov@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7184-4994>.

Букова Тетяна Анатоліївна (Bykova Tetiana) – асистент каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел. (098)030-21-37; e-mail: plastun.t.a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4323-6075>.

Яшин Сергій Анатолійович (Yashin Sergiy) – старший науковий співробітник каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел. (067) 575-26-47; e-mail: sergey.yashin.xai@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1680-4156>, Scopus Author ID: 57219053677.