

Ю. А. ВОРОБІЙОВ, А. М. ГУМЕННИЙ, О. А. БОГАЧ

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна***БЕЗПЛАЗОВИЙ МЕТОД КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ПІДГОТОВКИ
ВИРОБНИЦТВА ЛІТАКІВ АВІАЦІЇ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Предметом вивчення в статті є конструкторська підготовка виробництва легкого літака авіації загального призначення. Метою статті є розроблення конструктивних рішень для проектування легкого літака дешевого у виробництві з низькою ціною технічного обслуговування та льотної години, обґрунтування можливості та необхідності використання сучасних САД-систем і нових безплатових методів забезпечення взаємозамінності складових частин легких літаків для зниження витрат часу та коштів при їх проектуванні та виробництві. Завдання: виконати аналіз світових потреб у легких літаках, обґрунтувати доцільність впровадження незалежних (безплатових) методів ув'язування технологічного оснащення та складових частин конструкції літака, розробити перелік проектних робіт та очікуваних результатів, розробити цифрові моделі (електронні креслення) літака в цілому та його складових частин, довести на прикладах ефективність таких підходів. Використовуваними методами дослідження є аналіз науково-технічної документації, чисельне моделювання аеродинамічного обтікання літака, напружено-деформованого стану агрегатів, проектування літака та його складових частин з урахуванням результатів чисельного моделювання. Отримані такі результати: комплект цифрових моделей (електронних креслень) літака в цілому, фюзеляжу, крила, горизонтального та вертикального оперення, шасі, цифрові моделі (електронні креслення) деталей літака. Наукова й практична новизна отриманих результатів полягає в наступному: розроблений на основі аналізу статистичних даних і чисельного моделювання комплект проектних конструкторських документів на літак дозволить виготовити, провести випробування літака та одержати сертифікат льотної придатності, що, в свою чергу, дасть можливість в подальшому приступити до серійного виробництва літака та створення на його основі повноцінних класів первинної льотної підготовки призначених для вдосконалення заходів льотної підготовки курсантів вищих військових учбових закладів і створення можливостей для підготовки цивільних пілотів.

Ключові слова: авіація загального призначення, легкий літак, конструкторська підготовка виробництва, безплатовий метод, цифрова модель.

Вступ

У своїх стандартах Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO, International Civil Aviation Organization) розуміє під «авіацією загального призначення» (далі – АЗП) всю цивільну діяльність авіації, що здійснюється за допомогою літальних апаратів (далі – ЛА) (на відміну від діяльності аеропортів, служб повітряного руху, аеронавігації тощо) за винятком комерційних перевезень та авіаційних робіт. До АЗП відносяться навчання, авіаційно-хімічні (сільськогосподарські) роботи, аерофотознімання, патрулювання, ведення пошуку та порятунку тощо [1].

На відміну від свого визначення ICAO у рекомендаціях експлуатантам авіатехніки (далі – АТ) щодо підготовки статистичних звітів пропонує включати в діяльність авіації загального призначення та авіаційні роботи [2].

Федеральна авіаційна адміністрація США (FAA) дає своє визначення, яке ближче до другого підходу ICAO: «авіація загального призначення – частина авіаційної індустрії, що включає все, крім регулярних перевезень (commercial air carriers) і військових застосувань» [3].

Під легкими літаками і FAA, і ЕАА (авіаційна адміністрація Євросоюзу), і Державна авіаційна служба України розуміє літаки з максимальною злітною масою не більше 5700 кг і числом пасажирів (без урахування екіпажу) не більше 9 осіб [4]. Зазвичай екіпаж включає 1–2 пілоти, таким чином загальна місткість літака не перевищує 11 осіб. В українських нормативних документах це визначення зафіксовано у розділі 23 Авіаційних правил [5].

Формально літаки, які піднімають лише двох осіб (разом із пілотом), також належать до АЗП. Реально вони частіше застосовуються для навчання, а не для нерегулярних перевезень. Значна частина двомісних літаків використовується над цивільної



авіації, а ВПС різних країн для початкового навчання. Тому предметом розгляду є цивільні літаки із загальною кількістю людей на борту 3...11 осіб та максимальною злітною масою до 5700 кг.

АЗП, як один із найважливіших розділів авіації, є значною частиною економічної системи. Наприклад, у Сполучених Штатах Америки АЗП лише за 2018 рік принесла інвестицій в економіку у розмірі 128 млрд. доларів та забезпечила 1,279 млн. робочих місць [6]. У США, де закони найбільше сприяють експлуатації АЗП, у приватному володінні перебувають понад 500 тисяч повітряних суден, понад 600 тисяч осіб мають свідоцтва пілота-аматора або комерційного пілота. Річний дохід бюджету США від діяльності легкої авіації становить понад 42 мільярди доларів. Звісно, США становлення законодавчої бази для АЗП йшло протягом десятиліть паралельно її розвитку. І цілком закономірно, що в Україні, де ще років п'ятнадцять тому особистий літак був чимось із галузі наукової фантастики, виникають проблеми з його експлуатацією. Однак, вітчизняна галузь, на жаль, розвивається вкрай повільними темпами, і приріст у парку вітчизняних судів за різними оцінками становить лише 5...7 % [7].

Але, незважаючи на ситуацію, що склалася в цій галузі, деякі українські авіабудівні підприємства («Аеропракт» (Київ), «Аерос» (Київ), «Ліліенталь» (Харків), Flight Design (Херсон) та ін.) мають портфель замовлень на найближчі кілька років і нарощують власне виробництво, у тому числі в умовах військового стану – безпілотних літаків для збройних сил України. Але навіть ті підприємства, у яких сформовано стабільну виробничу програму, стикаються з конкуренцією на міжнародному ринку. Обсяги ринкової пропозиції українських виробників АЗП становлять 200-300 одиниць на рік [7]. Наприклад, фірма «Аерос» виробляє близько 100 конструкторських наборів надлегкого літака «Стрейнджер» (98 % продукції експортується за кордон). Харківська фірма «Ліліенталь» виробляє близько 100 двох-, тримісних літаків на рік, середня ціна яких 22 тисяч доларів [3]. За межі України вирушає 70 % продукції. «Аеропракт» у 2008 році випустив 70 літаків, у 2009 – вже 75. Фірма Flight Design у Херсоні у 2010-2015 роках виробляла до 250 літаків щороку.

Обсяг ринку літаків АЗП у 2023 році оцінювався у 12,6 мільярда доларів США, а до кінця 2030 року за прогнозом Exactitude Consultancy [8, 9] очікується, що він досягне 18,4 мільярда доларів США.

Виробництво легких літаків зростає щорічно, що свідчить про великий потенціал українського ринку АЗП, подальший розвиток та становлення якого можливий лише за всесвітньої підтримки з

боку відповідних організацій та в першу чергу з сторони держави.

Розвиток сучасного авіабудування характеризується посиленням конкуренції на світових ринках, що змушує підприємства вирішувати завдання забезпечення найвищої якості продукції та економію ресурсів (матеріальних, інтелектуальних, часових), що залучаються для реалізації конкретних проєктів чи програм на всіх стадіях життєвого циклу виробу (далі – ЖЦВ). В економічній ситуації, що склалася в Україні, розраховувати на капіталомісткі способи підйому конкурентоспроможності підприємств не доводиться. Тому треба забезпечувати економію ресурсів на стадії технічної підготовки виробництва та у самому виробництві за рахунок широкого використання сучасних CAD/CAM/CAE-систем.

Ситуація на світовому ринку наукомісткої продукції, до якої безумовно відноситься створення авіаційної техніки розвивається вбік повного переходу на безпаперову електронну технологію проєктування, виготовлення, обслуговування та збуту наукомісткої продукції. Після 2005 року неможливо було продати на зовнішньому ринку машинно-технічну продукцію без відповідної міжнародним стандартам безпаперової електронної документації.

Метою роботи є розроблення конструктивних рішень для проєктування легкого літака дешевого у виробництві з низькою ціною технічного обслуговування та льотної години, обґрунтування можливості та необхідності використання сучасних CAD-систем і нових безплазових методів забезпечення взаємозамінності складових частин легких літаків для зниження витрат часу та коштів при їх проєктуванні та виробництві.

Для досягнення мети треба вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз світових потреб у легких літаках;
- обґрунтувати доцільність впровадження незалежних (безплазових) методів ув'язування технологічного оснащення та складових частин конструкції літака;
- розробити перелік проєктних робіт та очікуваних результатів;
- розробити цифрові моделі (електронні креслення) літака в цілому та його складових частин;
- довести на прикладах ефективність таких підходів.

1. Матеріали та методи дослідження

Методом розв'язання задачі є аналіз науково-технічної документації та синтез тактико-технічних вимог до літака.

Чисельне моделювання аеродинамічного обтікання літака виконано на основі рішення системи опосередкованих за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, що включають рівняння нерозривності, рівняння руху, а також рівняння енергії.

Проектування літака та його складових частин з виконано у сучасній CAD-системі CATIA V5R18 з урахуванням результатів чисельного моделювання напружено-деформованого стану складових частин літака.

2. Результати та їх обговорення

2.1. Склад технічної підготовки виробництва літака

Роботи, що передують серійному виготовленню легких літаків, тобто технічна підготовка виробництва поділяється на конструкторську (далі – КПВ), технологічну (далі – ТПВ) та організаційну (далі – ОПВ) підготовку виробництва [10].

На рис. 1 надано схему інформаційних потоків у системі виробництва літака.

Нині найбільш великі, принципові питання проектування технологічних процесів (далі – ТП) і засобів технологічного оснащення (далі – ЗТО) зважуються у ході проектування виробу в досвідному конструкторському бюро (далі – ДКБ) (I) на етапі розробки директивних технологічних матеріалів (далі – ДТМ) (II). Це допомагає суттєво скоротити терміни підготовки виробництва, але при традиційних методах проектування важко вирішувати завдання оптимізації виробництва, оскільки точність розрахунків не може бути досить високою без детального опрацювання питань, розв'язуваних на етапах III (проектування ТП), IV (проектування ЗТО), V (виготовлення ЗТО).

Аналогічні труднощі виникають і в плануванні робіт ТПВ (VI), оскільки склад і трудомісткість робіт підготовки виробництва можуть бути визначені з досить високою точністю тільки при виконанні робіт III (проектування ТП), IV (проектування ЗТО) і V (виготовлення ЗТО). Для робіт I (проектування виробу), що проводяться в ДКБ зі створення нового виробу, особливо важливі рекомендації з підвищення ефективності виробництва (8), поліпшення технологічності (9) і підвищення ефективності виробу (10).

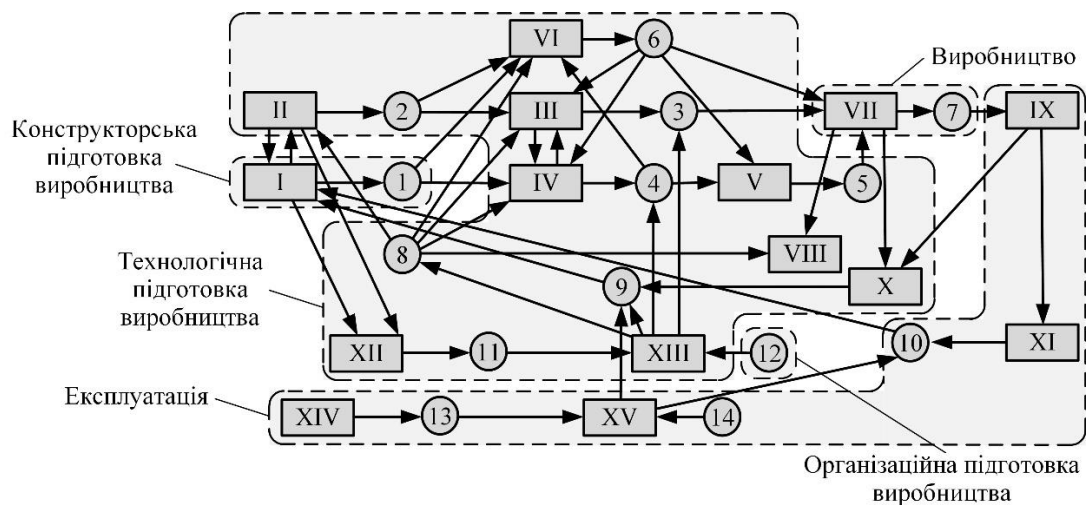


Рис. 1. Схема інформаційних потоків у системі виробництва літака: основні види проектних робіт: I – проектування виробу; II – розробка директивної технологічної документації; III – проектування ТП; IV – проектування ЗТО; V – виготовлення ЗТО; VI – планування ТПВ; VII – виготовлення виробу; VIII – оцінка ефективності виробництва; IX – експлуатація виробу; X – оцінка технологічності виробу; XI – оцінка ефективності виробу; XII – розробка математичної моделі конструктивно-технологічних властивостей виробу; XIII – розв'язання завдань ТПВ на ЕОМ; XIV – розробка математичної моделі експлуатаційних властивостей виробу; XV – моделювання експлуатації виробу на ЕОМ; результати проектних робіт: 1 – конструкторська інформація про виріб; 2 – директивна технологічна документація; 3 – карти ТП; 4 – креслення ЗТО; 5 – технологічне оснащення; 6 – документація планування ТПВ; 7 – готовий виріб; 8 – рекомендації з підвищення ефективності виробництва; 9 – рекомендації з поліпшення технологічності виробу; 10 – рекомендації з підвищення ефективності виробу; 11 – математична модель конструктивно-технологічних властивостей виробу; 12 – математична модель виробничої системи; 13 – математична модель експлуатаційних властивостей виробу; 14 – математична модель експлуатаційної системи

Однак природний цикл проектування, виробництва й експлуатації виробу настільки довгий, що практично виключається можливість використання даних від етапів VII (виготовлення виробу), IX (експлуатація виробу) для удосконалювання виробу в процесі його проектування (I). Тому сьогодні велику увагу приділяють створенню систем автоматизованого проектування (далі – САПР), що забезпечують комплексне вирішення всіх завдань ТПВ складних виробів. У САПР процеси виробництва й експлуатації моделюються на ЕОМ для створення в найкоротший термін найбільш ефективних і технологічних конструкцій виробу. Застосування САПР допомагає підвищити якість і скоротити в кілька разів терміни і вартість проектування складних виробів. Сьогодні технологія – це сукупність управлінських, науково-дослідних, дослідно-конструкторських та інжинірингових процесів, що включає також людський потенціал, що є фундаментом продуктивної діяльності суспільства [11].

Технологія підготовки виробництва включає різноманітні за характером, складністю та трудомісткістю роботи. Найбільш трудомісткими з цих робіт є створення нового спеціального обладнання, плазово-шаблонного, контрольньо-еталонного та технологічного оснащення.

У той же час для проведення ТПВ, незважаючи на складність, велику трудомісткість і відповідальність, встановлюються дуже стислі терміни. Конструкція літаків дуже швидко морально застаріває, тому затримка часу між закінченням проектування та випуском першого серійного виробу дуже небажана. Однак цей час і займає ТПВ.

ТПВ (далі – безперервна інформаційна підтримка життєвого циклу виробу) технологія – це новий, інтегрований підхід до розробки виробів. В основі технології лежить ідея поєднаного проектування виробу, а також його виготовлення та супроводження, що координується за допомогою спеціально створеного для цього розподіленого інформаційного середовища. Подібна технологія дозволяє використовувати проектні дані, починаючи з ранніх стадій проектування, одночасно різними групами фахівців.

3. Конструкторська підготовка виробництва легкого літака авіації загального призначення

Основним завданням КПВ є створення комплексу креслярської (електронної) документації для виготовлення й випробування макетів, дослідних

зразків (дослідної партії), установлювальної серії і документації для сталого серійного виробництва нових виробів.

Зміст і порядок виконання робіт на цій стадії системи створення й освоєння нової техніки (далі – СОИТ) регламентуються державним стандартом далі – ДСТ) про єдину систему конструкторської документації (далі – ЄСКД). ДСТ визначає такі стадії КПВ, як технічне завдання (далі – ТЗ), технічна пропозиція (технічна пропозиція розробляється в тому разі, якщо ТЗ розробнику нового виробу видано замовником), ескізний, технічний та робочий проекти.

ТЗ є вихідним документом, на основі якого здійснюється вся робота з проектування нового виробу. Розробка ТЗ базується на основі виконаних науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, результатів вивчення патентної інформації, маркетингових досліджень, аналізу наявних аналогічних моделей і умов їхньої експлуатації.

В якості об'єкту дослідження обрано легкий літак, призначений для початкового навчання курсантів аероклубів, льотних училищ військової та цивільної авіації, виконання польотів приватними особами в спеціальних зонах, по місцевим повітряним лініям з можливістю експлуатації, як на штучних, так і на ґрунтових злітно-посадкових смугах (далі – ЗПС).

3.1. Автоматизоване формування обліку літака

Згідно до результатів збору та аналізу льотно-технічних характеристик літаків-аналогів було сформульовано тактико-технічні вимоги до літака: основні характеристики проектуемого літака (табл. 1), очікувані умови експлуатації, експлуатаційні фактори, гранично допустимі центрування й особливості застосування.

Очікувані умови експлуатації:

Температура повітря біля землі: $-25 \dots +50$ °С.

Максимальні складові швидкості вітру біля землі при зльоті та посадці:

- зустрічна складова – 10 м/с;
- попутна складова – 5 м/с;
- бічна складова (ІВП, $\mu \geq 0,6$) – 6 м/с;
- бічний порив вітру – 7,5 м/с.

Експлуатаційний мінімуми погоди:

– мінімум для зльоту – дальність видимості на ЗПС щонайменше 200 м;

– мінімум для посадки – дальність видимості на ЗПС щонайменше 2000 м, висота хмарності щонайменше – 200 м.

Таблиця 1

Основні характеристики літака

Довжина літака, м	6,36
Висота літака, м	2,66
Розмах крила літака, м	9,5
Максимальна злітна вага, кг	600
Маса корисного навантаження, кг	3
Діапазон швидкостей горизонтального польоту, км/год	130...500
Діапазон висот польоту, м	50...6000
Практична дальність польоту, км	300
Максимальна тривалість польоту, хв.	60

Експлуатаційні фактори:

- максимальна висота аеродрому над рівнем моря – 800 м;
- типи ЗПС: ЗПС зі штучним та ґрунтовим покриттям; міцність ґрунту ЗПС не нижче 0,4 МПа;
- мінімальні розміри ЗПС 15×250 м.

Гранично допустимі центрування:

- передня – 24 % середньої аеродинамічної хорди крила (далі – САХ);
- задня – 28 % САХ;
- допуск на центрування $\pm 7^\circ$.

Особливості застосування літака: дозволяється виконання польотів вдень, за правилами візуального польоту, над рівнинною та гірською місцевістю місцевих повітряних ліній.

Було розроблено технічний проєкт для легкого літака, який складається із сукупності

конструкторських документів, які містять остаточні технічні рішення, що дають повне уявлення про конструкцію виробу і вихідні дані для розроблення робочої документації.

Виходячи з тактико-технічних вимог до літака і аналізу статистичних даних, обрано схема вільнонесучого моноплана з низькорозташованим, прямим крилом (рис. 2).

Аеродинамічна схема літака класична, тобто, горизонтальне оперення знаходиться позаду крила. Перевагою даної схеми є те, що крило працює в чистому незбуреному потоці, який плавно обтікає його. До недоліків можна віднести роботу горизонтального оперення у скошеному потоці, внаслідок чого знижується його ефективність [12].

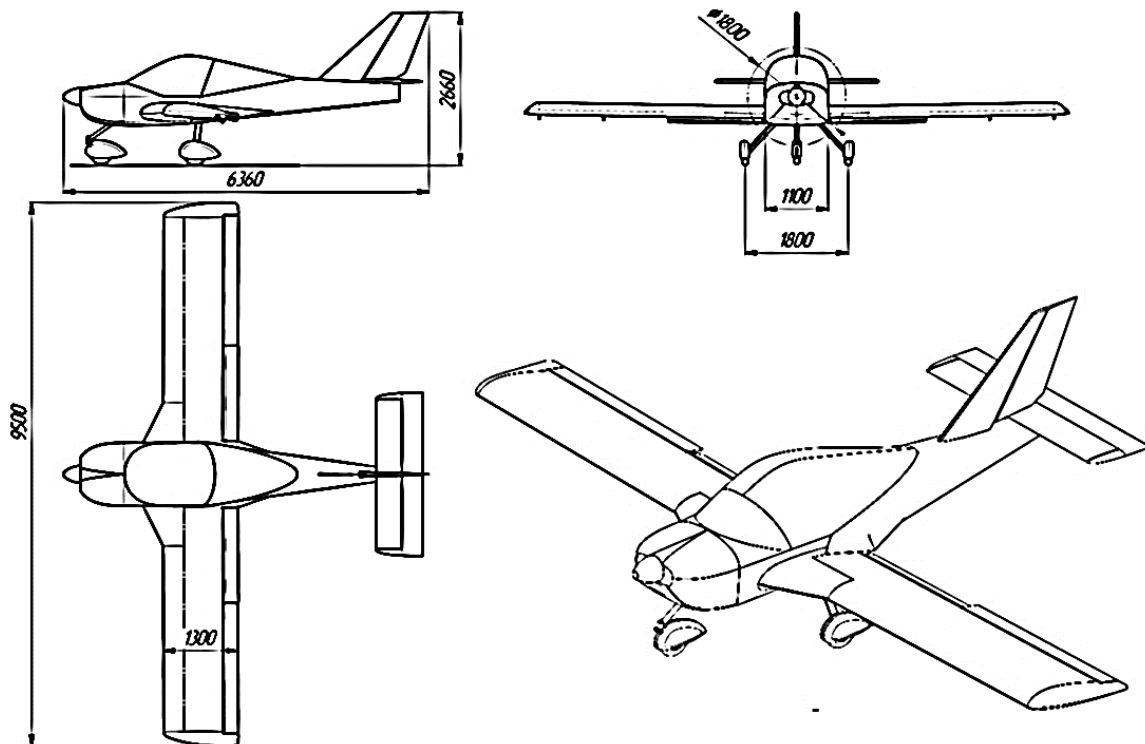


Рис. 2. Зовнішній вигляд легкого літака

Двигун поршневий, що дозволяє отримати найменші питомі витрати палива та найбільшу тягу в заданому діапазоні швидкостей та висот польоту, менші рівні шуму та вібрацій. Кількість двигунів на літаку – один, розташований він у носовій частині фюзеляжу.

Горизонтальне оперення розташоване на фюзеляжі. Це призводить до погіршення бічної стійкості літака за великих кутів атаки, оскільки оперення потраплятиме в супутній струмінь від крила. У зв'язку з цим площу вертикального оперення було збільшено.

Уздовж задньої кромки крила встановлена механізація (закрилки).

Схема шасі – триопорна з носовою опорою, що забезпечує більш ефективне гальмування при пробігу, суттєво зменшується можливість «козління» та повністю виключається явище капотування літака, покращує огляд при зльоті-посадці для пілотів. Крім цього схема шасі з носовою опорою має кращу стійкість при русі по аеродрому. Але з'являється можливість виникнення коливальних, що самозбуджуються, «шимі». Однак шасі, виконане за такою схемою, має більшу масу.

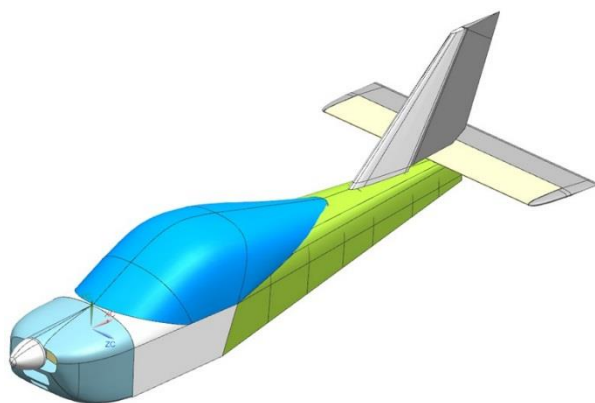
Було розраховано із використанням статистичних даних та відповідних методик [13, 14] маса літака у нульовому наближенні (табл. 2).

У наступних наближеннях після уточнення маси агрегатів літака, екіпажу, силової установки, палива, обладнання та цільового корисного навантаження значення злітної маси прийнято $m_0 = 625$ кг.

Таблиця 2

Маса конструкції літака у нульовому наближенні, кг

m_0	$m_{\text{кон}}$	$m_{\text{кр}}$	$m_{\text{ф}}$	$m_{\text{оп}}$	$m_{\text{ш}}$	$m_{\text{С.У}}$	$m_{\text{об}}$
645	194	76	69	13	35	71	38



а

Було обрано конструктивно-силові схеми агрегатів літака: фюзеляжу, крила, горизонтального та вертикального оперення, шасі.

Після уточнення потрібної потужності силової установки було обрано двигун Rotax 912IS2 за найближчою більшою потужністю, а також за використанням у деяких літаках-аналогах.

3.2. Проектування агрегатів літака

Після визначення геометричних параметрів крила, фюзеляжу, горизонтального і вертикального оперення, шасі було розроблено конструктивно-силове компонування і центрування літака.

Майстер-геометрія основних агрегатів літака (фюзеляжу, крила) (рис. 3), компонування кабіни (рис. 4, а), моторного відсіку літака (рис. 4, б) було розроблено у системі CATIA V5R18, визначені навантаження, уточнені конструктивно-силові схеми агрегатів, обрано матеріали для елементів конструкції, виконано розрахунки на міцність складових частин агрегатів і систем літака.

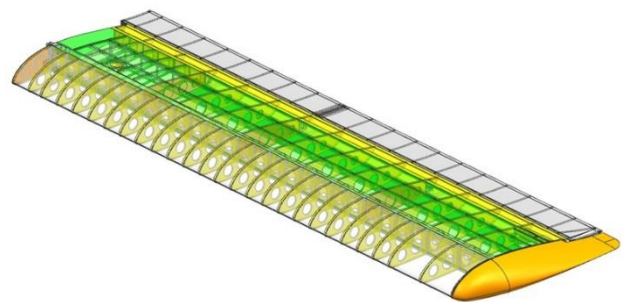
3.3. Розрахунок аеродинамічних характеристик літака

Після отримання майстер-геометрії літака було виконано чисельне моделювання його обтікання з метою удосконалення аеродинамічних характеристик літака на основі рішення системи опосередкованих за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, що включають рівняння нерозривності (1), рівняння руху (2), а також рівняння енергії (3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3,$$



б

Рис. 3. Майстер-геометрія: а – фюзеляжу; б – крила

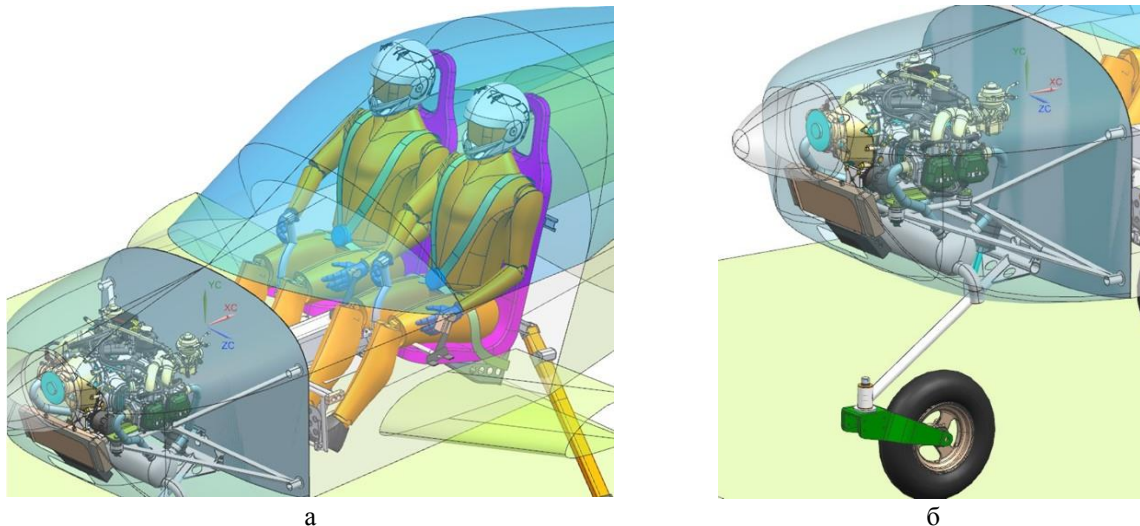


Рис. 4. Компонування: а – кабіни пілотів; б – моторного відсіку літака

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (3)$$

$$H = h + \frac{\rho u^2}{2},$$

де t – час; u – швидкість газу; ρ – густина газу; P – тиск газу; S_i – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу газу; h – ентальпія; τ_{ik} – тензор в'язких зсувних напружень; H – повна енергія.

Ця система рівнянь повинна замикатися рівняннями для відповідної моделі турбулентності в рамках підходу RANS. Для розрахунків була обрана модель турбулентності SST яка є найбільш ефективною для інженерних розрахунків серед існуючих RANS моделей. Рівняння моделі можуть бути представленні в наступному вигляді:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i k) = \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i \omega) = \frac{\gamma}{v_T} \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Усі емпіричні константи Φ_1 стандартної $k-\omega$ моделі, Φ_2 модифікованої $k-\varepsilon$ моделі і Φ об'єднаної моделі пов'язані залежністю:

$$\Phi = \Phi_1 F_1 + (1 - F_1) \Phi_2. \quad (5)$$

Із умови стійкості обчислень було запропоновано обрати функцію F_1 у вигляді:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), \quad (6)$$

де $\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}; \frac{500v}{y^2\omega} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right];$
 y – відстань до стінки;

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right). \quad (7)$$

В якості початкових умов, характеристики атмосфери були обрані виходячи із стандартних значень: атмосферний тиск на рівні моря – 101,3 КПа; середня температура повітря (на тому ж рівні) – 15 °С; вертикальний градієнт температури – 6,5 °С на 1 км до рівня 11 км.

Для розрахункової області були використані наступні граничні умови: вхідна границя – швидкість 180 км/год, вихідна границя – значення атмосферного тиску, решта – стінки з умовою вільного ковзання потоку.

Дискретизація розрахункової області була виконана з використанням поліедральних елементів сітки (рис. 5).

Для отримання коректних результатів сітка повинна відповідати певним критеріям якості, в залежності від моделі турбулентності.

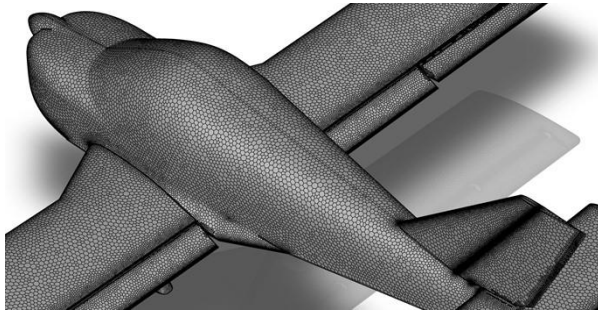


Рис. 5. Поверхнева сітка моделі

Перш за все це стосується пристінкового шару, в нашому випадку для моделі SST необхідно забезпечити значення безрозмірного параметра Y^+ в діапазоні від 30 до 300, для обраної моделі турбулентності передбачається повністю турбулентна течія без перехідних зон. Однією з переваг моделі є можливість використання пристінкових функцій, що дозволяє суттєво зменшити розмірність сіткової моделі в пристінковому шарі без втрати інформації щодо профілю швидкості.

З використанням пристінкових функцій була побудована об'ємна сітка з використанням п'яти шарів елементів навколо геометрії літака (рис. 6).

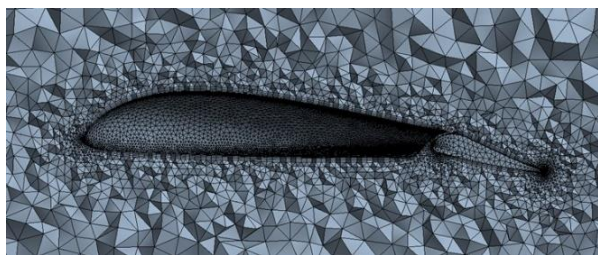


Рис. 6. Переріз об'ємної сітки моделі поперек крила в центральній секції

Було проаналізовано аеродинамічні характеристики для декількох варіантів геометрії літака: характеристики для різних варіантів скління кабіни пілота (рис. 7) та виконання напливу на крилі в зоні сполучення з фюзеляжем (рис. 8).

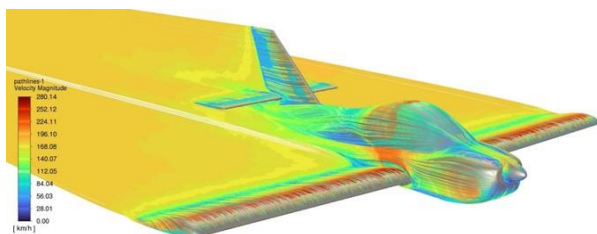


Рис. 7. Лінії обтікання літака, варіант скління 1

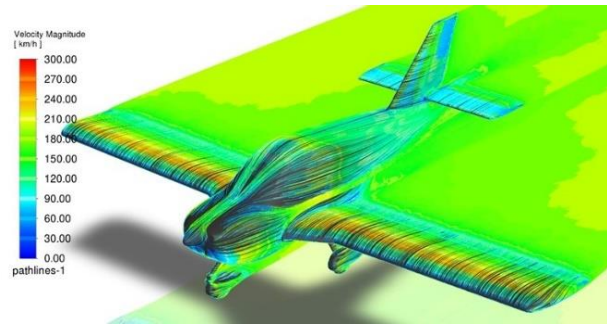


Рис. 8. Лінії обтікання літака з напливом на крилі в зоні сполучення з фюзеляжем

За результатами чисельного моделювання обтікання літака було запропоновано модифікація конструкції його планера.

3.4. Розрахунок трудомісткості розроблення конструкторської документації

Розрахунки трудомісткості робіт з розроблення конструкторської документації було виконано за нормативними галузевими документами [15].

При розрахунках прийнято наступне:

- тип виробництва – одиничне;
- група виробу за складністю – 4 (Складальні одиниці, що містять складні кінематичні передачі та елементи автоматики механічного, гідравлічного, електричного та іншого типів, що вимагають проведення розрахунків великої кількості розмірів, які сполучаються в межах допусків 9-го і 10-го квалітетів, мають литі і зварні елементи складної криволінійної конфігурації);
- група виробу за новизною – Г (Проектування виробів із новими параметрами, яке потребує проведення експериментальної перевірки окремих складових частин чи характеристик. Проектування ведеться з патентно-інформаційними дослідженнями, що забезпечує виявлення нових технологічних рішень на елементи конструкції з можливим поданням заявки на винахід або корисну модель).

За розрахунками трудомісткості робіт з конструкторської підготовки виробництва проектуемого легкого літака склала 14 169,7 люд.×год.

Висновки

В статті наведено результати аналізу світових потреб у легких літаках, встановлено, що обсяг ринку літаків АЗП у 2023 році оцінювався у 12,6 мільярда доларів США, а до кінця 2030 року очікується, що він досягне 18,4 мільярда доларів США. Обсяги ринкової пропозиції українських виробників АЗП становлять 200-300 одиниць на рік.

Розроблено схему інформаційних потоків у системі виробництва літака, яка включає роботи з технічної (конструкторської, технологічної та організаційної) підготовки виробництва, виробництво й експлуатацію легких літаків, що дозволяє планувати проєктні роботи та очікувані результати найбільш ефективно за строком і витратами.

На підставі виконаного модулювання методом кінцевих елементів обтікання літака запропоновано модифікація конструкції його планера.

Розроблено цифрові моделі (електронні креслення) літака в цілому та його агрегатів, систем та інших складових частин.

Розраховано трудомісткість робіт з розроблення конструкторської документації на легкий літак, яка склала 14 169,7 люд.×год.

Майбутні дослідження будуть направлено на виконання робіт з технологічної та організаційної підготовки виробництва легкого літака та його виробництва в умовах студентського конструкторського бюро університету.

Внесок авторів: формулювання мети та постановка задач досліджень – **Ю. А. Воробйов**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. А. Богач**; розроблення цифрових моделей літака в цілому та його складових частин – **А. М. Гуменний**; розроблення математичних моделей та аналіз результатів досліджень – **А. М. Гуменний**, **Ю. А. Воробйов**, **О. А. Богач**; аналіз результатів, формулювання висновків – **Ю. А. Воробйов**, **А. М. Гуменний**.

Конфлікт інтересів: Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування: Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Доступність даних: Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту: Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *International standards and recommended practices. 9th edition. Annex 6 – Operation of Aircraft. Part 1. International Commercial Air Transport – Aeroplanes Order Number: AN 6-1.* [Electronic resource]. – ICAO. 2018. – P. 3, 5. – Available at: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-6-Operation-of-Aircraft-Part-I-International-commercial-air-transport.pdf> (accessed 6 August 2024).

2. *Review of the classification and definitions used for civil aviation activities. Tenth session of the statistics division. Montréal, 23 to 27 November 2009. Agenda Item 1: Civil aviation statistics – ICAO classification and definition. STA/10-WP/7* [Electronic resource]. – ICAO. Montreal, 2009. – Scheme on P. 4. – Available at: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/4416.pdf> (accessed 6 August 2024).

3. *El-Sayed, A. F. Classifications of Aircrafts and Propulsion Systems* [Electronic resource] / A. F. El-Sayed // *Fundamentals of Aircraft and Rocket Propulsion.* – Springer, London, 2016. – P. 1-89. DOI: 10.1007/978-1-4471-6796-9_1.

4. *Code of Federal Regulations 14 (14CFR). Part 23. (FAR-23) Airworthiness standards: normal, utility, acrobatic and commuter airplanes* [Electronic resource]. – Available at: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/designapprovals/small_airplanes/small_airplanes_regs (accessed 6 August 2024).

5. *Part 23 – Airworthiness standards: Normal category airplanes* [Electronic resource]. – Available at: <https://aviation-regulations.com/part/23> (accessed 12 August 2024).

6. *Манівчук, В. В. Раціональне використання ділової авіації* [Текст] / В. В. Манівчук, & Ю. О. Романенков // *Реформування міжнародних економічних відносин і світового господарства в сучасних умовах : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., [Львів-Торунь], 24–25 берез. 2023 р. – Львів-Торунь, 2023. – С. 165–171. DOI: 10.36059/978-966-397-295-4-42.*

7. *Tereshchenko, E. Yu. and Shkolenko, O. B. (2019), Air transport development directions in Ukraine* [Text] / E. Yu. Tereshchenko, & O. B. Shkolenko // *Економічні горизонти.* – 2019. – № 4(11). – С. 13–22, DOI: 10.31499/2616-5236.4(11).2019.200801.

8. *Ultralight and Light Aircraft Market by Type (Ultralight Aircraft, Light Aircraft) end use (Civil and Commercial, Military) and by Region (North America, Europe, Asia Pacific, South America, Middle East and Africa) Global Trends and Forecast from 2022 to 2029* [Electronic resource]. – Available at: <https://exactitudeconsultancy.com/reports/5476/ultralight-and-light-aircraft-market/> (accessed 20 August 2024).

9. *Global Ultralight Aircraft Market by Type (Rotary, Fixed Wing), by Application (Commercial,*

Personal), by Geographical Coverage and Forecast [Electronic resource]. – Available at: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/ultra-light-aircraft-market/> (accessed 20 August 2024).

10. Технологія виробництва літальних апаратів: Підручник: у 2 кн. – Кн. 2. Технологія складання літальних апаратів [Текст] / Ю. М. Терещенко, Л. Г. Волянська, К. А. Животовська та ін. ; За ред. Ю. М. Терещенка. – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2006. – 492 с.

11. Розробка алгоритмів процесів формоутворення для виготовлення авіаційної техніки при технологічній підготовці виробництва [Текст] / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, Ю. А. Воробйов, М. М. Бойко, & О. Л. Комісаров // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 2 (178). – С. 64–73. DOI: 10.32620/akt.2022.2.08.

12. McCormick, B. W. *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics [Text]* / B. W. McCormick. – New York : Scitus Academics, 2015. – 266 p.

13. Gudmundsson, S. *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures [Text]* / S. Gudmundsson. – Oxford : Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2014. – 1035 p.

14. Kundu, A. K. *Conceptual Aircraft Design: An Industrial Approach [Text]* / A. K. Kundu, M. A. Price, & D. Riordan. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2019. – 984 p.

15. Міжгалузеві норми часу на розроблення конструкторської документації [Текст] / М-во праці та соц. політики України, Центр продуктивності ; [розробл. Єременком В. О. та ін.]. – Краматорськ : [б. в.], 2007. – 115 с.

References

1. *International standards and recommended practices. 9th edition. Annex 6 – Operation of Aircraft. Part I. International Commercial Air Transport – Aeroplanes Order Number: AN 6-1.*, ICAO, 2018, pp. 3, 5. Available at: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-6-Operation-of-Aircraft-Part-I-International-commercial-air-transport.pdf> (accessed August 6, 2024).

2. *Review of the classification and definitions used for civil aviation activities. Tenth session of the statistics division. Montréal, 23 to 27 November 2009. Agenda Item I: Civil aviation statistics – ICAO classification and definition. STA/10-WP/7*, ICAO, Montreal, 2009, Scheme on pp. 4. Available at: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/4416.pdf> (accessed August 6, 2024).

3. El-Sayed, A. F. Classifications of Aircrafts and Propulsion Systems. *Fundamentals of Aircraft and*

Rocket Propulsion, Springer, London, 2016, pp. 1–89. DOI: 10.1007/978-1-4471-6796-9_1.

4. *Code of Federal Regulations 14 (14CFR). Part 23. (FAR-23) Airworthiness standards: normal, utility, acrobatic and commuter airplanes.* Available at: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/small_airplanes/small_airplanes_regs (accessed August 12, 2024).

5. *Part 23 – Airworthiness standards: Normal category airplanes.* Available at: <https://aviation-regulations.com/part/23> (accessed 12 August 2024).

6. Manivchuk, V. V., & Romanenkov, Yu. O. *Ratsional'ne vykorystannya dilovoyi aviatsiyi [Rational use of business aviation]. Reformuvannya mizhnarodnykh ekonomichnykh vidnosyn i svitovoho hospodarstva v suchasnykh umovakh [Materialy Mizhnar. nauk.-prakt. konf.]. L'viv-Torun'*, 2023. – pp. 165–171. DOI: 10.36059/978-966-397-295-4-42. (In Ukrainian).

7. Tereshchenko, E. Yu., & Shkolenko, O. B. Air transport development directions in Ukraine. *Ekonomichni horyzonty – Economies' Horizons*, 2019, no. 4(11), pp. 13–22. DOI: 10.31499/2616-5236.4(11).2019.200801.

8. *Ultralight and Light Aircraft Market by Type (Ultralight Aircraft, Light Aircraft) end use (Civil and Commercial, Military) and by Region (North America, Europe, Asia Pacific, South America, Middle East and Africa) Global Trends and Forecast from 2022 to 2029.* Available at: <https://exactitudeconsultancy.com/reports/5476/ultralight-and-light-aircraft-market/> (accessed August 20, 2024).

9. *Global Ultralight Aircraft Market by Type (Rotary, Fixed Wing), by Application (Commercial, Personal), by Geographical Coverage and Forecast.* Available at: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/ultra-light-aircraft-market/> (accessed August 20, 2024).

10. Tereshchenko, Yu. M., Volyans'ka, L. H., Zhyvotovs'ka, K. A., Korol', V. M., Kulyk, M. S., Kudrin, A. P., Mamlyuk, O. V., Panin, V. V. *Tekhnolohiya vyrobnytstva lital'nykh aparativ: Pidruchnyk: u 2 kn. – Kn. 2. Tekhnolohiya skladannya lital'nykh aparativ [Aircraft production technology: Textbook: in 2 books. – Book 2. Aircraft assembly technology]*; Za red. Tereshchenka Yu. M. Kiev, Knyzhkove vyd-vo NAU Publ., 2006. 492 p.

11. Sikul's'kyi, V. T., Mayorova, K. V., Vorobyov Yu. A., Boyko M. M., & Komisarov O. L. *Rozrobka alhorytmiv protsesiv formoutvorennia dlya vyhotovlennia aviatsiynoyi tekhniki pry tekhnolohichniy pidhotovtsi vyrobnytstva [Improvement of the repair method of aviation object components from polymer composite materials with operational damage]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace*

technic and technology, 2022, no. 2 (178), pp. 64-73.
DOI: 10.32620/akt.2022.2.08 (In Ukrainian).

12. McCormick, B. W. *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics*. New York, Scictus Academics Publ., 2015. 266 p.

13. Gudmundsson, S. *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures*. Oxford, Butterwohrth-Heinemann is an imprint of Elsevier Publ., 2014. 1035 p.

14. Kundu, A. K., Price, M. A., & Riordan, D. *Conceptual Aircraft Design: An Industrial Approach*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons Publ., 2019. 984 p.

15. Yeremenko, V. O., & et al. *Mizhhaluzevi normy chasu na rozroblennya konstruktors'koyi dokumentatsiyi* [Cross-industry standards of time for the development of design documentation]. M-vo pratsi ta sots. polityky Ukrayiny, Tsentr produktyvnosti. Kramators'k, 2007. 115 p. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 17.09.2024, розглянута на редколегії 15.10.2024

PLAZLESS METHOD OF DESIGN PREPARATION FOR THE PRODUCTION OF GENERAL AVIATION AIRCRAFT

Iurii Vorobiov, Andriy Humennyi, Oleksiy Bogach

The article's subject is the design preparation for producing light general aviation aircraft. This article aims to develop design solutions for a light cheap aircraft with low flight and ground costs, to substantiate the possibility and necessity of using modern CAD systems and new plazless methods to ensure the interchangeability of light aircraft components to reduce design and production costs. Objective: to analyze the global demand for light aircraft, to substantiate the possibility and feasibility of introducing independent (plazless) methods for linking technological equipment and aircraft design components, to develop a list of design work and expected results, to develop digital models (electronic drawings) of the aircraft as a whole and its components, to prove the effectiveness of such approaches. The research methods used are the analysis of scientific and technical documentation, numerical modeling of the aerodynamic flow around the aircraft, the stress-strain state of the units, and the design of the aircraft and its components considering the results of numerical modeling. The following results were obtained: a set of digital models (electronic drawings) of the whole aircraft, a fuselage, a wing, a horizontal and vertical tail, a chassis, digital models (electronic drawings) of the aircraft parts. The scientific and practical novelty of the obtained results is as follows: a set of aircraft design engineering documents developed based on statistical data analysis and numerical modeling will allow manufacturing, testing the aircraft, and obtaining a certificate of airworthiness, which, in turn, will make it possible to subsequently begin serial production of the aircraft and create full-fledged primary flight training classes designed to improve flight training activities for cadets of higher military educational institutions and create opportunities for training civilian pilots.

Keywords: general aviation; light aircraft; production design preparation; plazless method; digital model.

Воробйов Юрій Анатолійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Гуменний Андрій Михайлович – канд. техн. наук, доц., проректор з НПП, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Богач Олексій Анатолійович – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Iurii Vorobiov – Doctor of Technical Science, Professor, Professor at the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.vorobiov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-6401-7790, Scopus Author ID: 57205383504.

Andriy Humennyi – Candidate of Technical of Sciences, Associate Professor, Vice-Rector, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.gumennyi@khai.edu, ORCID: 0000-0003-1020-6304, Scopus Author ID: 57219051542.

Oleksiy Bogach – PhD Student of the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.a.bohach@khai.edu.