

О. А. БОГАЧ

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ БЕЗПЛАЗОВОГО МЕТОДУ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ЛЕГКИХ ЛІТАКІВ

*Предметом дослідження є процес оцінювання економічної ефективності впровадження безпласового методу технічної підготовки виробництва легких літаків. У даній роботі термін «безпласовий метод» відповідає англomовним термінам «jigless assembly» або «fixtureless assembly». Актуальність роботи обумовлена необхідністю зниження витрат і скорочення термінів підготовки виробництва при створенні нових типів літаків, що особливо важливо для малoserійного виробництва авіаційної техніки. Традиційні плазово-шаблонні методи технічної підготовки виробництва потребують значних витрат на проектування і виготовлення складального оснащення, що знижує економічну ефективність виробничих процесів. Використання цифрових моделей виробу та координатних методів базування створює передумови для переходу до безпласових технологій технічної підготовки виробництва. Метою роботи є розроблення методики оцінювання економічної ефективності впровадження безпласового методу технічної підготовки виробництва легких літаків. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: проаналізовано структуру витрат технічної підготовки виробництва, сформовано модель витрат впровадження безпласового методу, визначено основні джерела економічного ефекту та розроблено алгоритм розрахунку інтегральних показників економічної ефективності. У роботі використано методи економіко-математичного моделювання, аналізу виробничих процесів та інструменти дисконтованого економічного аналізу. Результати дослідження полягають у створенні формалізованої методики оцінювання економічної ефективності використання безпласового методу технічної підготовки виробництва, яка дозволяє кількісно оцінювати економічний ефект від зменшення витрат на виготовлення складального оснащення, скорочення трудомісткості підготовки виробництва та підвищення гнучкості виробничих систем. Висновки підтверджують, що використання безпласового методу технічної підготовки виробництва є економічно доцільним і забезпечує зниження витрат на підготовку виробництва та підвищення ефективності використання виробничих ресурсів при створенні легких літаків. Наукова новизна роботи полягає у розробленні формалізованої методики економічного оцінювання безпласового методу технічної підготовки виробництва легких літаків, яка враховує структуру витрат виготовлення складального оснащення, трудомісткість підготовки виробництва та вплив обсягів серійного виробництва на економічну доцільність використання безпласових технологій. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої методики для техніко-економічного обґрунтування впровадження безпласових технологій технічної підготовки виробництва на підприємствах авіаційної промисловості.*

**Ключові слова:** технічна підготовка виробництва; безпласовий метод; складальне оснащення; економічна ефективність; NPV; ROI; авіабудування.

### Вступ

#### 1.1. Мотивація

Сучасний розвиток авіаційної техніки супроводжується постійним підвищенням складності конструкцій легких літаків (ЛА), зростанням вимог до точності їх виготовлення та необхідністю скорочення термінів створення нових виробів. У цих умовах особливого значення набуває підвищення ефективності процесів технічної підготовки

виробництва, які визначають тривалість освоєння виробництва нових типів літаків та значною мірою впливають на загальну собівартість продукції.

Одним із ключових елементів технічної підготовки виробництва легких літаків є забезпечення геометричного ув'язування агрегатів планера та їх складових частин (СЧ). Традиційно у авіабудуванні для цього використовуються плазові методи ув'язування, які передбачають виготовлення плазів, шаблонів та іншого координатно-забезпечувального оснащення. Такі методи



дозволяють забезпечити необхідну точність взаємного розташування СЧ конструкції, однак потребують значних витрат часу та матеріальних ресурсів на проектування і виготовлення засобів технологічного оснащення (ЗТО).

Особливо відчутними ці витрати є при виробництві легких літаків, яке характеризується відносно невеликими обсягами серійного випуску. У таких умовах витрати на виготовлення плазово-шаблонного оснащення можуть становити значну частину загальних витрат технічної підготовки виробництва, що знижує економічну ефективність створення нових типів літальних апаратів.

Розвиток сучасних систем автоматизованого проектування, цифрових моделей виробу та координатно-вимірвальних технологій створює передумови для переходу до безплазових методів технічної підготовки виробництва. У таких методах геометричне ув'язування СЧ агрегатів здійснюється без використання традиційних плазів і шаблонів, а базується на використанні цифрової моделі виробу та координатних методів базування елементів конструкції.

Використання безплазових технологій дозволяє підвищити гнучкість виробничих систем, зменшити трудомісткість підготовки виробництва та скоротити витрати на виготовлення складального оснащення (Скл.Осн.). Разом із тим впровадження таких технологій потребує відповідних інвестицій у цифрову інфраструктуру виробництва, що зумовлює необхідність оцінювання економічної доцільності їх використання.

У зв'язку з цим актуальною науково-практичною задачею є розроблення методики оцінювання економічної ефективності впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва легких літаків.

## 1.2. Сучасний стан досліджень

У сучасному авіабудуванні значна увага приділяється підвищенню ефективності процесів технічної підготовки виробництва та впровадженню цифрових технологій у виробничі системи. Одним із ключових напрямів розвитку є застосування цифрових моделей виробничих процесів і концепції цифрових двійників, що дозволяє створювати віртуальні моделі виробничих систем і оптимізувати їх параметри на етапі проектування та експлуатації [1, 2].

Дослідження показують, що використання цифрових двійників у виробництві літальних апаратів дозволяє інтегрувати інформацію про конструкцію виробу, технологічні процеси та виробничі ресурси в єдине інформаційне

середовище. Це створює можливість моделювання виробничих процесів, прогнозування точності складання агрегатів і підвищення ефективності управління виробництвом [3, 4].

Окремим напрямом досліджень є розвиток нових типів складального оснащення та реконфігурованих складальних пристроїв. Такі рішення дозволяють підвищити гнучкість виробничих систем, зменшити масу складального оснащення та скоротити витрати на його виготовлення, що є особливо важливим для малосерійного виробництва авіаційної техніки [5, 6].

Значна кількість досліджень присвячена також розвитку безоснасткових або малооснасткових технологій складання. У відповідних роботах розглядаються методи роботизованого складання з використанням систем вимірювання у процесі виробництва, які дозволяють виконувати високоточне складання без застосування традиційних жорстких складальних пристроїв [7, 8].

Іншим важливим напрямом досліджень є оптимізація параметрів складання та технологічних допусків. У сучасних роботах розглядаються методи спільної оптимізації конструкційних параметрів, технологічних процесів і допусків з метою зменшення витрат виробництва та підвищення якості продукції [9, 10].

Разом із тим більшість наявних досліджень зосереджена переважно на технологічних аспектах цифрового виробництва, автоматизації складальних процесів та використанні цифрових моделей виробничих систем. Питання економічної ефективності впровадження безплазових технологій технічної підготовки виробництва в авіабудуванні розглядаються значно рідше [11, 12].

При цьому більшість наявних досліджень зосереджена переважно на технологічних аспектах цифрового виробництва та автоматизації складальних процесів, тоді як економічні аспекти впровадження безплазових технологій досліджені недостатньо.

Зокрема, у науковій літературі відсутні узагальнені методичні підходи до оцінювання економічної ефективності впровадження безплазових методів технічної підготовки виробництва в авіабудуванні.

Таким чином, попри значну кількість робіт, присвячених цифровізації виробничих процесів і удосконаленню технологій складання літальних апаратів, у сучасних дослідженнях відсутня узагальнена методика оцінювання економічної ефективності впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва легких літаків.

### 1.3. Мета, завдання та підхід до дослідження

Об'єктом дослідження є процес технічної підготовки виробництва легких літаків у сучасних умовах цифрового виробництва.

Предметом дослідження є методи оцінювання економічної ефективності впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва, що базується на використанні цифрових моделей виробу та координатних методів ув'язування агрегатів планера. У даній роботі термін «безплазовий метод» відповідає англійським термінам «jigless assembly» або «fixtureless assembly».

Метою статті є розроблення формалізованої методики оцінювання економічної ефективності впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва легких літаків з урахуванням структури витрат підготовки виробництва та економічних вигід від використання цифрових технологій складання.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- 1) виконати аналіз структури витрат технічної підготовки виробництва літаків;
- 2) визначити основні економічні фактори, що впливають на ефективність використання безплазового методу;
- 3) сформулювати економіко-математичну модель оцінювання економічної ефективності впровадження безплазових технологій;
- 4) розробити алгоритм розрахунку інтегральних показників ефективності впровадження безплазового методу;
- 5) продемонструвати застосування розробленої методики на прикладі техніко-економічного аналізу процесів технічної підготовки виробництва.

Підхід до дослідження базується на поєднанні аналізу виробничих процесів авіабудування, економіко-математичного моделювання та методів дисконтованого економічного аналізу. Такий підхід дозволяє розглядати впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва як інвестиційний проєкт та оцінювати його ефективність за допомогою інтегральних економічних показників.

Науковий внесок цієї роботи полягає у розробленні формалізованої методики оцінювання економічної ефективності впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва легких літаків, яка враховує структуру витрат виготовлення Скл.Осн., трудомісткість підготовки виробництва та вплив обсягів серійного виробництва на економічну доцільність

використання цифрових технологій складання.

Стаття структурована таким чином: у розділі 2 наведено матеріали та методи дослідження; у розділі 3 подано приклад розрахунку економічної ефективності; у розділі 4 виконано обговорення отриманих результатів; у розділі 5 сформульовано висновки.

## 2. Матеріали та методи дослідження

Методологічною основою дослідження є поєднання аналізу виробничих процесів авіабудування, методів економіко-математичного моделювання та інструментів дисконтованого економічного аналізу. Такий підхід дозволяє розглядати впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва як інвестиційний проєкт, ефективність якого визначається співвідношенням витрат на впровадження та очікуваних економічних вигід.

Основою дослідження є порівняння двох альтернативних сценаріїв організації технічної підготовки виробництва літаків:

**AS-IS** – використання традиційного ПШМ технічної підготовки виробництва;

**TO-BE** – використання безплазового методу технічної підготовки виробництва, що базується на цифрових моделях виробу та координатних методах ув'язування агрегатів планера.

Економічна ефективність впровадження безплазового методу визначається на основі аналізу структури витрат технічної підготовки виробництва.

### 2.1. Модель витрат технічної підготовки виробництва

Сукупні витрати технічної підготовки виробництва можуть бути представлені у вигляді

$$C_{TPV} = C_{tool} + C_{dig} + C_{meas} + C_{lab}, \quad (1)$$

де  $C_{tool}$  – витрати на проєктування та виготовлення Скл.Осн.;

$C_{dig}$  – витрати на цифрову підготовку виробництва (створення цифрових моделей виробу, технологічної документації та програмного забезпечення);

$C_{meas}$  – витрати на координатно-вимірювальне забезпечення виробництва;

$C_{lab}$  – витрати трудових ресурсів при виконанні робіт з технічної підготовки виробництва.

У традиційному ПШМ значну частину витрат становлять витрати на виготовлення плазів, шаблонів

і контрольних засобів. У безплатовому методі ці витрати суттєво зменшуються, проте зростає частка витрат на цифрову підготовку виробництва та координатно-вимірювальні технології.

## 2.2. Модель економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження безплатового методу визначається як різниця між витратами технічної підготовки виробництва у двох сценаріях:

$$E = C_{\text{trad}} + C_{\text{digital}}, \quad (2)$$

де  $C_{\text{trad}}$  – витрати технічної підготовки виробництва при використанні традиційного методу;  
 $C_{\text{digital}}$  – витрати технічної підготовки виробництва при використанні безплатового методу.

Основними джерелами економічного ефекту є:

- скорочення витрат на виготовлення Скл.Осн.;
- зменшення трудомісткості підготовки виробництва;
- скорочення тривалості підготовки виробництва;
- підвищення гнучкості виробничих систем.

## 2.3. Методика оцінювання економічної ефективності

Оцінювання економічної ефективності впровадження безплатового методу виконується з використанням показників інвестиційного аналізу.

Чистий грошовий потік у році  $t$  визначається як

$$CF_t = B_t - C_t, \quad (3)$$

де  $B_t$  – економічні вигоди у році  $t$ ;

$C_t$  – витрати у році  $t$ .

Чиста приведена вартість інвестиційного проекту визначається за формулою

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

де  $r$  – ставка дисконту;

$T$  – горизонт оцінювання.

Додатково для оцінювання ефективності використовується показник рентабельності інвестицій

$$ROI = \frac{\sum B_t - \sum C_t}{\sum C_t}. \quad (5)$$

Економічно доцільним вважається впровадження безплатового методу технічної підготовки виробництва, якщо

$$NPV > 0. \quad (6)$$

## 2.4. Алгоритм оцінювання економічної ефективності

Запропонована методика передбачає виконання таких етапів:

- 1) визначення структури витрат технічної підготовки виробництва при використанні традиційного методу;
- 2) оцінювання витрат впровадження безплатового методу;
- 3) визначення економічних вигід від використання безплатових технологій;
- 4) розрахунок грошових потоків інвестиційного проекту;
- 5) визначення інтегральних показників економічної ефективності.

Запропонований підхід дозволяє кількісно оцінювати економічну доцільність використання безплатового методу технічної підготовки виробництва легких літаків і може бути застосований для техніко-економічного обґрунтування впровадження цифрових технологій у виробничі системи авіабудування.

Запропонований алгоритм оцінювання економічної ефективності впровадження безплатового методу технічної підготовки виробництва наведено на рис. 1.

Алгоритм включає послідовність взаємопов'язаних етапів техніко-економічного аналізу.

На першому етапі виконується аналіз витрат технічної підготовки виробництва при використанні традиційного плазово-шаблонного методу. На цьому етапі визначаються витрати на проектування та виготовлення складального оснащення, трудомісткість виконання робіт та тривалість підготовки виробництва.

На другому етапі здійснюється оцінювання витрат впровадження безплатового методу технічної підготовки виробництва. До таких витрат належать витрати на створення цифрових моделей виробу, впровадження координатно-вимірювальних технологій, модернізацію програмного забезпечення та навчання персоналу.

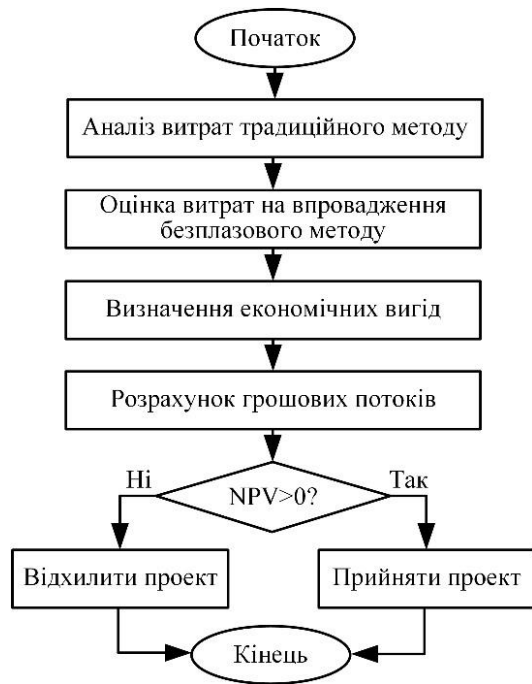


Рис. 1. Алгоритм оцінювання економічної ефективності безплазового методу

Наступним етапом є визначення економічних вигід від використання безплазових технологій. Основними джерелами економічного ефекту є скорочення витрат на виготовлення складального оснащення, зменшення трудомісткості підготовки виробництва та підвищення гнучкості виробничих систем.

Далі виконується розрахунок грошових потоків інвестиційного проекту та визначаються інтегральні показники економічної ефективності, зокрема чиста приведена вартість проекту.

На завершальному етапі приймається рішення щодо доцільності впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва. У випадку, якщо значення чистої приведеної вартості є додатним, впровадження безплазового методу вважається економічно доцільним.

### 3. Результати дослідження

#### 3.1. Аналіз структури витрат технічної підготовки виробництва

На першому етапі дослідження виконано аналіз структури витрат технічної підготовки виробництва при використанні традиційного ПШМ та безплазового методу, що базується на використанні цифрових моделей виробу.

Для порівняльного оцінювання економічної ефективності двох підходів сформовано узагальнену структуру витрат технічної підготовки виробництва, наведену у табл. 1.

Як видно з табл. 1, найбільшу частку витрат при використанні традиційного ПШМ становлять витрати на проектування та виготовлення Скл.Осн. У випадку використання безплазового методу ця частка істотно зменшується, тоді як зростає роль цифрової підготовки виробництва.

На рис. 2 представлено порівняльну структуру витрат технічної підготовки виробництва при використанні традиційного плазово-шаблонного методу (AS-IS) та безплазового методу (TO-BE).

Аналіз показує, що при використанні традиційного методу найбільшу частку витрат становлять витрати на проектування та виготовлення Скл.Осн., які можуть перевищувати третину загального бюджету технічної підготовки виробництва. У випадку застосування безплазового методу ця частка істотно зменшується, оскільки геометричне ув'язування агрегатів виконується на основі цифрових моделей виробу та координатних методів базування.

Разом із тим у структурі витрат безплазового методу зростає частка витрат на цифрову підготовку виробництва, що пов'язано зі створенням і підтримкою цифрових моделей виробу, використанням систем автоматизованого проектування та координатно-вимірювальних технологій.

Таблиця 1

Узагальнена структура витрат технічної підготовки виробництва

Стаття витрат	Частка витрат, %	
	Традиційний ПШМ	Безплазовий метод
Проектування та виготовлення Скл.Осн.	34	8
Цифрова підготовка виробництва	12	24
Координатно-вимірювальне забезпечення	18	15
Трудові витрати	21	17
Монтаж та налагодження оснащення	9	5
Інші витрати	6	6

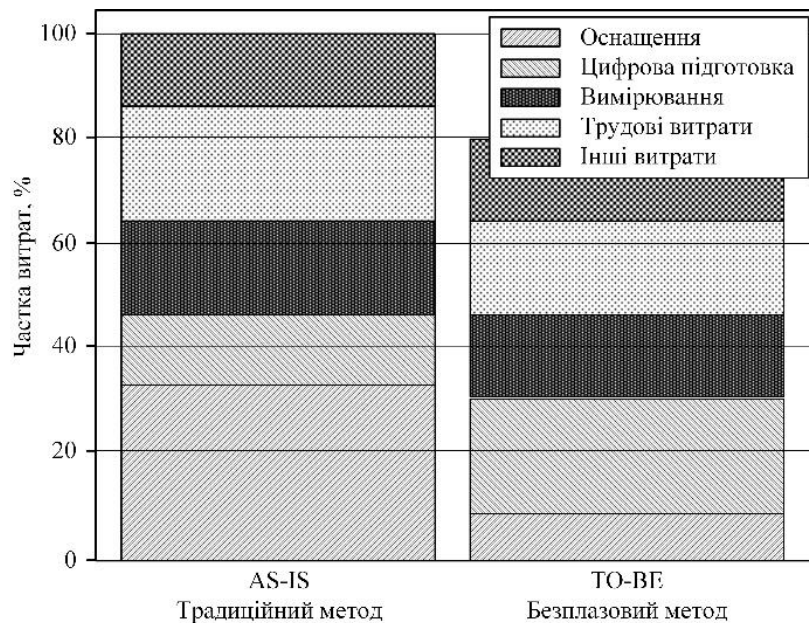


Рис. 2. Структура витрат технічної підготовки виробництва при традиційному (AS-IS) та безплазовому (ТО-ВГ) методах

Отримані результати свідчать, що основний економічний ефект від впровадження безплазових технологій формується за рахунок скорочення витрат на виготовлення Скл.Осн. та зменшення трудомісткості технічної підготовки виробництва.

### 3.2. Розрахунок економічної ефективності впровадження безплазового методу

На основі сформованої структури витрат виконано розрахунок економічної ефективності впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва. Розрахунок проведено на горизонті планування п'ять років із використанням показника чистої приведеної вартості (NPV).

Вихідні дані для розрахунку грошових потоків інвестиційного проекту наведено у табл. 2.

Результати розрахунку показують, що сумарне значення чистої приведеної вартості інвестиційного проекту становить  $NPV = 121.2$  тис. дол.

Оскільки значення NPV є додатним, впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва є економічно доцільним.

### 3.3. Аналіз окупності інвестиційного проекту

Для наочного представлення результатів економічного аналізу побудовано графік накопиченого дисконтованого грошового потоку, представлений на рис. 3.

На рисунку представлено зміну накопиченого дисконтованого грошового потоку інвестиційного проекту впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва протягом п'ятирічного горизонту планування. Початкові інвестиції у створення цифрової інфраструктури виробництва формують від'ємний грошовий потік у нульовому році. У подальші роки експлуатації економічний ефект від скорочення витрат на виготовлення складального оснащення та зменшення трудомісткості підготовки виробництва забезпечує поступове зростання накопиченого грошового потоку. Перетин нульового рівня відбувається між третім і четвертим роками, що відповідає терміну окупності інвестиційного проекту приблизно 3–4 роки.

Таблиця 2

Розрахунок грошових потоків інвестиційного проекту

Рік	Інвестиції, тис. дол.	Економічний ефект, тис. дол.	Чистий грошовий потік CF	Дисконтований CF
0	-250	0	-250	-250
1	0	80	80	72,8
2	0	90	90	74,7
3	0	100	100	75,1
4	0	110	110	75,1
5	0	120	120	74,5

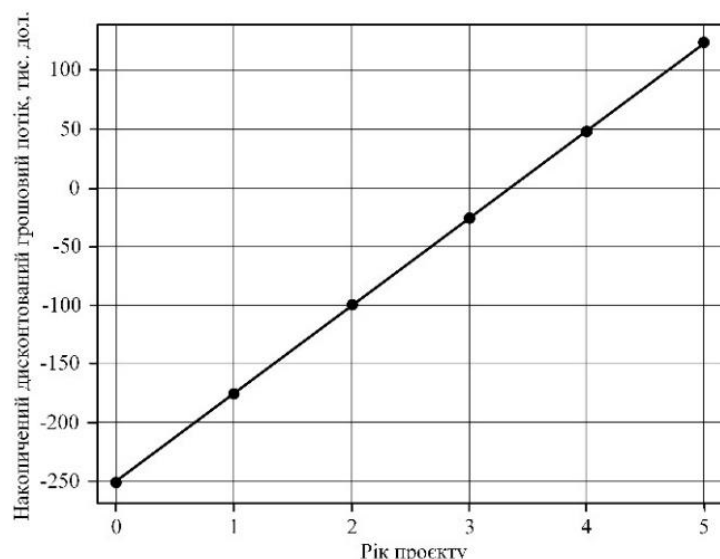


Рис. 3. Накопичений дисконтований грошовий потік інвестиційного проекту впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва

### 3.4. Вплив обсягу виробництва на економічну ефективність

Важливим фактором, що визначає економічну ефективність впровадження безплазових технологій технічної підготовки виробництва, є обсяг серійного виробництва літаків.

Зі збільшенням обсягу виробництва витрати на створення цифрової інфраструктури виробництва та технологічної підготовки розподіляються на більшу кількість виробів, що призводить до зростання економічного ефекту від використання безплазових технологій.

Результати аналізу залежності чистої приведеної вартості інвестиційного проекту від обсягу виробництва наведено на рис. 4.

Отримані результати показують, що економічна ефективність впровадження безплазового методу суттєво зростає зі збільшенням обсягу серійного виробництва.

### 3.5. Аналіз чутливості економічної моделі

Для оцінювання стійкості отриманих результатів виконано аналіз чутливості показника чистої приведеної вартості до зміни основних параметрів економічної моделі.

Такий аналіз дозволяє визначити фактори, які найбільше впливають на економічну ефективність впровадження безплазового методу технічної підготовки виробництва.

Результати аналізу чутливості показника NPV наведено на рис. 5.

Аналіз показує, що найбільший вплив на економічну ефективність має зміна витрат на виготовлення Скл.Осн. та обсягу виробництва літаків. Менший вплив мають зміни трудових витрат та ставки дисконту.

### 3.6. Вплив типу виробництва на економічний ефект

Для оцінювання впливу масштабу виробництва на економічну ефективність впровадження безплазових технологій виконано порівняльний аналіз економічного ефекту для різних типів виробництва літаків.

Результати цього аналізу наведено на рис. 6.

Отримані результати показують, що економічний ефект від впровадження безплазових технологій зростає при переході від одиничного до дрібносерійного та серійного виробництва. Це пояснюється тим, що витрати на створення цифрової інфраструктури виробництва розподіляються на більшу кількість виробів, що підвищує економічну ефективність використання безплазових методів технічної підготовки виробництва.

## 4. Обговорення результатів

Отримані результати дослідження свідчать про доцільність використання безплазового методу технічної підготовки виробництва легких літаків з економічної точки зору. Проведений аналіз показав, що перехід від традиційних плазово-шаблонних технологій до цифрових методів ув'язування агрегатів планера дозволяє суттєво змінити структуру витрат технічної підготовки виробництва.

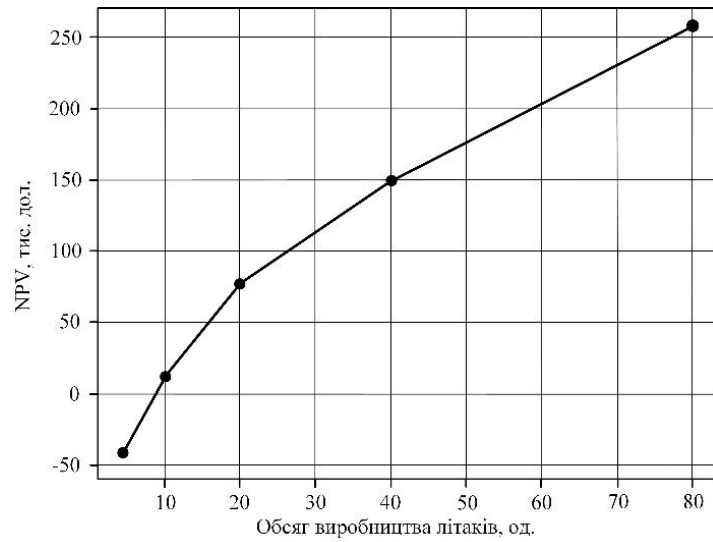


Рис. 4. Залежність чистої приведеної вартості (NPV) від обсягу виробництва літаків

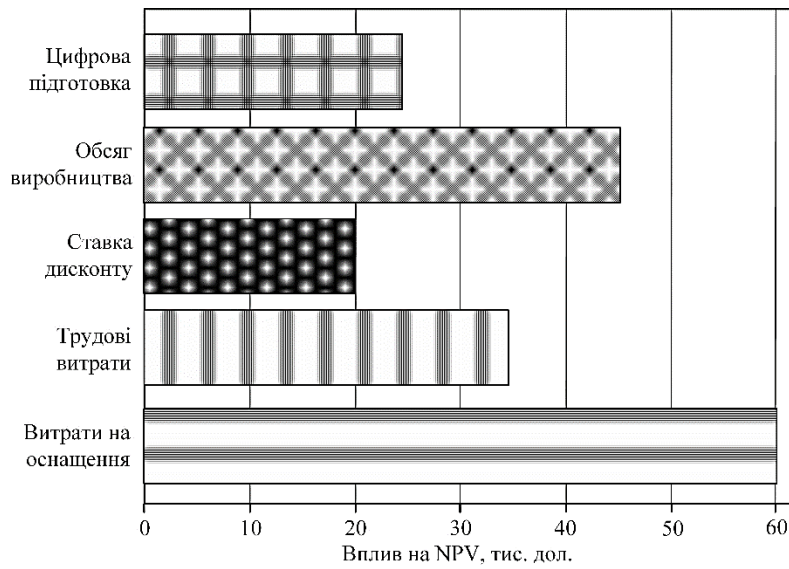


Рис. 5. Аналіз чутливості показника NPV до зміни основних параметрів економічної моделі



Рис. 6. Залежність економічного ефекту від типу виробництва

Як показано у табл. 1 та на рис. 2, у традиційному методі найбільшу частку витрат становлять витрати на проєктування та виготовлення складального оснащення. У безпласовому методі ця складова значно зменшується, оскільки геометричне ув'язування агрегатів виконується без використання плазів і шаблонів, на основі цифрової моделі виробу та координатних методів базування. У результаті структура витрат технічної підготовки виробництва стає більш збалансованою, а частка витрат на цифрову підготовку виробництва зростає.

Отримані результати підтверджують, що основним джерелом економічного ефекту при використанні безпласових технологій є скорочення витрат на виготовлення складального оснащення. Додатковий ефект формується за рахунок зменшення трудомісткості підготовки виробництва та підвищення гнучкості виробничих систем. Це особливо важливо для виробництва легких літаків, яке, як правило, характеризується відносно невеликими обсягами серійного випуску.

Проведений розрахунок економічної ефективності показав, що інвестиційний проєкт впровадження безпласового методу має додатне значення чистої приведеної вартості. Результати розрахунку грошових потоків (табл. 2) свідчать, що значення NPV становить понад 120 тис. дол., що підтверджує економічну доцільність впровадження безпласових технологій технічної підготовки виробництва. При цьому термін окупності інвестиційного проєкту становить приблизно 3–4 роки, що є прийнятним для інвестицій у модернізацію виробничих систем авіабудування.

Аналіз накопиченого дисконтованого грошового потоку (рис. 3) показує стабільне зростання економічного ефекту протягом усього періоду експлуатації технології. Це пояснюється тим, що основні інвестиції у впровадження безпласового методу мають одноразовий характер, тоді як економічні вигоди від скорочення витрат на виготовлення складального оснащення та зменшення трудомісткості підготовки виробництва проявляються протягом тривалого часу.

Важливим фактором, що впливає на економічну ефективність використання безпласових технологій, є обсяг виробництва літаків. Як показано на рис. 4, зі збільшенням обсягу серійного виробництва значення показника NPV зростає. Це пояснюється тим, що витрати на створення цифрової інфраструктури виробництва розподіляються на більшу кількість виробів, що підвищує економічну ефективність впровадження безпласових технологій. Аналогічні закономірності економічної ефективності цифрових виробничих систем відзначаються у роботах [13, 14].

Разом із тим результати аналізу чутливості

економічної моделі (рис. 5) показують, що найбільший вплив на економічну ефективність мають витрати на виготовлення складального оснащення та обсяг виробництва літаків. Зміна цих параметрів може суттєво впливати на кінцеве значення чистої приведеної вартості інвестиційного проєкту. Менший вплив мають зміни трудових витрат та ставки дисконту. Подібні результати щодо впливу параметрів виробничої системи на економічну ефективність цифрових технологій виробництва отримано і в інших дослідженнях [15, 16].

Додатковий аналіз показав, що економічний ефект від використання безпласових технологій значною мірою залежить від типу виробництва. Як показано на рис. 6, найбільший економічний ефект досягається у випадку малосерійного та серійного виробництва літаків. У таких умовах використання цифрових методів ув'язування агрегатів дозволяє суттєво скоротити витрати на виготовлення складального оснащення та підвищити гнучкість виробничих систем.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що впровадження безпласового методу технічної підготовки виробництва є ефективним напрямом підвищення економічної ефективності виробничих процесів у авіабудуванні. Запропонована методика дозволяє виконувати техніко-економічне обґрунтування впровадження безпласових технологій на підприємствах авіаційної промисловості та може бути використана при плануванні модернізації виробничих систем.

Разом з тим слід зазначити, що точність кількісної оцінки економічної ефективності значною мірою залежить від коректності вихідних даних щодо структури витрат технічної підготовки виробництва, обсягів серійного випуску літаків та параметрів економічної моделі. У зв'язку з цим доцільним є проведення подальших досліджень, спрямованих на уточнення параметрів економічних моделей та розширення області застосування запропонованої методики.

## 5. Висновки

У статті розроблено методику оцінювання економічної ефективності впровадження безпласового методу технічної підготовки виробництва легких літаків та виконано її апробацію на основі економіко-математичного моделювання виробничих процесів. Отримані результати дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Проведено аналіз структури витрат технічної підготовки виробництва літаків при використанні традиційного ПШМ та безпласового методу, що

базується на використанні цифрових моделей виробу та координатних методів базування. Показано, що у традиційному методі найбільшу частку витрат становлять витрати на проектування та виготовлення Скл.Осн., тоді як при використанні безплатового методу ця складова суттєво зменшується.

2. Розроблено економіко-математичну модель оцінювання економічної ефективності впровадження безплатового методу технічної підготовки виробництва, яка базується на аналізі структури витрат технічної підготовки виробництва та використанні інтегральних показників інвестиційного аналізу, зокрема чистої приведеної вартості інвестиційного проекту.

3. Виконано розрахунок економічної ефективності впровадження безплатового методу технічної підготовки виробництва. Отримані результати показали, що інвестиційний проект має додатне значення чистої приведеної вартості ( $NPV \approx 121$  тис. дол.), а термін окупності інвестицій становить приблизно 3–4 роки, що свідчить про економічну доцільність використання безплатових технологій у виробництві легких літаків.

4. Проведений аналіз впливу обсягу виробництва та параметрів економічної моделі на економічну ефективність впровадження безплатового методу показав, що найбільший вплив на значення показника NPV мають витрати на виготовлення складального оснащення та обсяг серійного виробництва літаків.

5. Отримані результати дослідження підтверджують, що використання безплатового методу технічної підготовки виробництва дозволяє підвищити економічну ефективність виробничих процесів у авіабудуванні за рахунок скорочення витрат на виготовлення складального оснащення, зменшення трудомісткості підготовки виробництва та підвищення гнучкості виробничих систем.

Запропонована методика може бути використана для техніко-економічного обґрунтування впровадження безплатових технологій технічної підготовки виробництва на підприємствах авіаційної промисловості при створенні нових типів легких літаків.

### Конфлікт інтересів

Автор заявляє, 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

Автор підтверджує, що використовував технології штучного інтелекту для пошуку сучасних джерел інформації.

### Подяка

Автор висловлює подяку науковому керівнику, проф. каф. технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» Воробйову Юрію Анатолійовичу.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

### Література

1. *Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities [Text]* / K. Moenck, J.-E. Rath, J. Koch, A. Wendt, F. Kalscheuer, T. Schüppstuhl, & D. Schoepflin // *CEAS Aeronautical Journal*. – 2024. – Vol. 15, No. 2. – P. 1051–1067. – DOI: 10.1007/s13272-024-00740-y.

2. *Modern trends and industrial use cases of digital twin technology with 3D behavioral representation [Text]* / Z. Machacek, R. Hercik, A. Vaclavik, J. Zemanek, I. A. Hameed, & J. Koziorek // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – 34 p. DOI: 10.1007/s10845-025-02709-y.

3. *Sajadieh, S. M. M. A Review of Digital Twin Integration in Circular Manufacturing for Sustainable Industry Transition [Text]* / S. M. M. Sajadieh, & S. D. Noh // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, No. 16. – Article No. 7316. DOI: 10.3390/su17167316.

4. *Faqeer, H. A. Digital Twin and Computer Vision Combination for Manufacturing and Operations: A Systematic Literature Review [Text]* / H. A. Faqeer, & H. S. Khajavi // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 18. – Article No. 10157. DOI: 10.3390/app151810157.

5. *Digital twin-driven assembly accuracy prediction method for high performance precision assembly of complex products [Text]* / Y. Yi, A. Zhang, X. Liu, D. Jiang, Y. Lu, & B. Wu // *Advanced Engineering Informatics*. – 2024. – Vol. 61. – Article No. 102495. – DOI: 10.1016/j.aei.2024.102495.

6. *A Digital Twin system of reconfigurable tooling for monitoring and evaluating in aerospace assembly [Text]* / Jie Jin, Junshan Hu, Chengyu Li, Zhanghu Shi, Pei Lei, & Wei Tian // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2023. – Vol. 68. – P. 56-71. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.03.004.

7. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues [Text] / Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, & X. Xu // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2020. – Vol. 61. – Article No. 101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.

8. Воробійов, Ю. А. Безплатовий метод конструкторської підготовки виробництва літаків [Текст] / Ю. А. Воробійов, А. М. Гуменний, & О. А. Богач // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2024. – № 5 (199). – С. 53–63. DOI: 10.32620/aktt.2024.5.06.

9. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification [Text] / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, & W. Sihn // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, No. 11. – P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

10. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review [Text] / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, & B. Hicks // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2020. – Vol. 29, Part A. – P. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

11. Digital twin in industry: State-of-the-art [Text] / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, & A. Y. C. Nee // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15. – No. 4. – P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

12. Sustainable Manufacturing: A Review and Framework Derivation [Text] / V. M. Scharmer, S. Vernim, J. Horsthofer-Rauch, P. Jordan, M. Maier, M. Paul, D. Schneider, M. Woerle, J. Schulz, & M. F. Zaeh // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16. – No. 1. – Article No. 119. DOI: 10.3390/su16010119.

13. AI based decision-making system for tooling design of aircraft product assembly with developed knowledge retrieval algorithm [Text] / M. H. Miah, & et al. // *Scientific Reports*. – 2026. – Vol. 16. – Article No. 5393. DOI: 10.1038/s41598-025-32936-5.

14. Aircraft assembly process planning based on knowledge graph constructed by integrating LLMs and SLMs [Text] / Y. Ma, S. Zheng, Z. Yang, P. Zheng, J. Leng, & J. Hong // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2026. – Vol. 84. – P. 1–19. DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.11.016.

15. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [Text] / F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, & F. Sui // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 94. – P. 3563–3576. DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.

16. Human factors and emerging needs in aerospace manufacturing planning and scheduling [Text] / S. Morandini, F. Fraboni, M. Hall, & et al. // *Cognition, Technology & Work*. – 2025. – Vol. 27. – P. 59–77. DOI: 10.1007/s10111-024-00785-3.

## References

1. Moenck, K., Rath, J.-E., Koch, J., Wendt, A., Kalscheuer, F., Schüppstuhl, T., & Schoepflin, D. Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities. *CEAS Aeronautical Journal*, 2024, vol. 15, iss. 2, pp. 1051–1067. DOI: 10.1007/s13272-024-00740-y.

2. Machacek, Z., Hercik, R., Vaclavik, A., Zemanek, J., Hameed, I. A., & Koziorek, J. Modern trends and industrial use cases of digital twin technology with 3D behavioral representation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2025. 34 p. DOI: 10.1007/s10845-025-02709-y.

3. Sajadieh, S. M. M., & Noh, S. D. A Review of Digital Twin Integration in Circular Manufacturing for Sustainable Industry Transition Sustainability, 2025., vol. 17, iss. 16, article no. 7316. DOI: 10.3390/su17167316.

4. Faqeer, H. A., & Khajavi, H. S. Digital Twin and Computer Vision Combination for Manufacturing and Operations: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, iss. 18, article no. 10157. DOI: 10.3390/app151810157.

5. Yi, Y., Zhang, A., Liu, X., Jiang, D., Lu, Y., & Wu, B. Digital twin-driven assembly accuracy prediction method for complex products. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, vol. 61, art. no. 102495. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102495.

6. Jin, J., Hu, J., Li, C., Shi, Z., Lei, P., & Tian, W. A Digital Twin system of reconfigurable tooling for monitoring and evaluating in aerospace assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, vol. 68, pp. 56–71. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.03.004.

7. Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., & Xu, X. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 61, article no. 101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.

8. Vorobiov, I. A., Humennyi, A. M., Bohach, O. A. Bezplazovyy metod konstruktors'koyi pidhotovky vyrobnytstva litakiv aviatsiyi zahal'noho pryznachennya [Plazless method of design preparation for the production of general aviation aircraft]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2024, no. 5(199), pp. 53–63. DOI: 10.32620/aktt.2024.5.06. (In Ukrainian)

9. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

10. Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing*

*Science and Technology*, 2020, vol. 29, part A, pp. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

11. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

12. Scharmer, V. M., Vernim, S., Horsthofer-Rauch, J., Jordan, P., Maier, M., Paul, M., Schneider, D., Woerle, M., Schulz, J., & Zaeh, M. F. Sustainable Manufacturing: A Review and Framework Derivation. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 1, article no. 119. DOI: 10.3390/su16010119.

13. Miah, M. H., & Gupta, S. K., & Yali, L., & et al. AI based decision-making system for tooling design of aircraft product assembly with developed knowledge retrieval algorithm. *Scientific Reports*, 2026, vol. 16, article no. 5393. DOI: 10.1038/s41598-025-32936-5.

14. Ma, Y., Zheng, S., Yang, Z., Zheng, P., Leng, J., & Hong, J. Aircraft assembly process planning based on knowledge graph constructed by integrating LLMs and SLMs. *Journal of Manufacturing Systems*, 2026, vol. 84, pp. 1-19. DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.11.016.

15. Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 94, pp. 3563–3576. DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.

16. Morandini, S., Fraboni, F., Hall, M., & et al. Human factors and emerging needs in aerospace manufacturing planning and scheduling. *Cognition, Technology & Work*, 2025, vol. 27, pp. 59-77. DOI: 10.1007/s10111-024-00785-3.

Отримано 10.01.2026, отримано у доопрацьованому вигляді 15.02.2026

Дата ухвалення 15.04.2026, дата публікації 22.04.2026

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF IMPLEMENTING A JIGLESS MANUFACTURING PREPARATION METHOD FOR LIGHT AIRCRAFT

*Oleksiy Bogach*

The research focuses on assessing the economic efficiency of implementing a jigless manufacturing preparation method in light aircraft production. The relevance of the research is determined by the need to reduce costs and lead times for manufacturing preparation when developing new aircraft types, which is especially important for small-batch aircraft production. Traditional template-based manufacturing preparation methods require significant expenditures for the design and production of assembly tooling, which reduces the economic efficiency of production processes. The use of digital product models and coordinate-based alignment technologies creates prerequisites for the transition to jigless manufacturing preparation methods. The aim of the study is to develop a methodology for assessing the economic efficiency of implementing a jigless manufacturing preparation method for light aircraft production. To achieve this aim, the following tasks were addressed: analyzing of the cost structure of manufacturing preparation; development of a cost model for implementing the jigless manufacturing preparation method; identification of the main sources of economic benefits; and development of an algorithm for calculating integrated indicators of economic efficiency. The research methodology is based on econometric modeling, analysis of aircraft manufacturing processes, and the application of discounted cash flow methods for investment evaluation. The results of the study provide a formalized methodology for assessing the economic efficiency of implementing jigless manufacturing preparation technologies. The proposed methodology makes it possible to quantitatively evaluate the economic effects obtained through the reduction of assembly tooling manufacturing costs, the decrease in labor intensity of manufacturing preparation processes, and the improvement of flexibility in manufacturing systems. The conclusions confirm that the implementation of a jigless manufacturing preparation method is economically feasible and contributes to reducing manufacturing preparation costs and improving the efficiency of resource utilization in light aircraft production. The scientific novelty of the study lies in the development of a formalized methodology for the economic evaluation of jigless manufacturing preparation technologies, which considers the structure of assembly tooling manufacturing costs, the labor intensity of manufacturing preparation processes, and the influence of production volume on the economic feasibility of implementing jigless technologies. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed methodology for the techno-economic justification of implementing jigless manufacturing preparation technologies at aircraft manufacturing enterprises.

**Keywords:** manufacturing preparation; jigless manufacturing preparation method; assembly tooling; economic efficiency; NPV; ROI; aircraft manufacturing.

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

**Oleksiy Bogach** – PhD Student of the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.a.bohach@khai.edu, ORCID: 0009-0001-6951-0821.