Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання, озброєння та застосування

УДК 623.7

DOI: 10.30748/zhups.2021.67.06

М.В. Науменко

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕМПУ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА БАГАТОЦІЛЬОВИХ ЛІТАКІВ ТАКТИЧНОЇ АВІАЦІЇ

Представлено математичну модель темпу серійного виробництва багатоцільових літаків тактичної авіації, як формалізованої залежності названого темпу від значень узагальнених показників бойових властивостей літака – коефіцієнтів бойового потенціалу у виконанні завдань по знищенню засобів повітряного нападу противника і завдань по ураженню наземних цілей. Проведено аналіз особливостей світового ринку озброєння, тенденцій його розвитку, які значною мірою обумовлені можливостями оборонної промисловості країн-експортерів бойової авіаційної техніки. Показано безпосередній вплив темпів серійного виробництва літаків тактичної авіації на терміни укладання міждержавних контрактів щодо виробництва та постачання бойової авіаційної техніки у військові частини, що обумовлюватиме терміни освоєння нових літаків льотним та інженерно-технічним складом. Наявність такої математичної моделі дозволить проводити кількісне оцінювання термінів набуття необхідних спроможностей тактичною авіацією у виконанні завдань за всіма визначеними сценаріями застосування Повітряних Сил Збройних Сил України. Розроблена математична модель темпу серійного виробництва багатоцільових літаків тактичної авіації також дозволить проводити кількісне оцінювання можливих змін у кількісно-якісному складі повітряної компоненти збройних сил потенційного противника за часом, оскільки такі зміни обумовлені темпами оновлення його авіаційного парку, які напрямку залежать від темпів серійного виробництва нових бойових літаків. За результатами оцінювання адекватності та точності розробленої математичної моделі темпу серійного виробництва багатоцільових літаків тактичної авіації можна зробити висновок про доцільність її практичного використання в ході проведення обґрунтування пропозицій щодо синтезу раціональних програм і планів розвитку тактичної авіації Повітряних Сил Збройних Сил України з урахуванням прогностичних оцінок зміни оперативного середовища у часі.

Ключові слова: планування на основі спроможностей, критерії раціональності, науково-методичний апарат, оптимізація, раціональна програма розвитку, система озброєння тактичної авіації Повітряних Сил Збройних Сил України.

Вступ

Постановка проблеми. У відповідності до основних положень представленої у 2020 році Візії Повітряних Сил 2035, пріоритетом розвитку авіації Повітряних Сил (ПС) Збройних Сил (ЗС) України визначено переоснащення тактичної авіації на багатоцільові винищувачі [1]. Для своєчасної реалізації цієї мети ряд питань вимагають найскорішого вирішення. У першу чергу потребує вирішення основне питання – який саме багатоцільовий винищувач стане основою парку бойової авіаційної техніки тактичної авіації ПС ЗС України. Відповідь на це питання стане одним із відправних елементів формування програми розвитку системи озброєння ПС ЗС Укра-

їни, а пошук відповіді на це питання – вимагає проведення багатогранних досліджень. По-перше, необхідно здійснити оцінювання бойових властивостей різних типів багатоцільових винищувачів задля визначення ступеню відповідності вимогам щодо набуття визначеного необхідного рівня спроможностей тактичною авіацією ПС ЗС України за рахунок переоснащення парку її бойової авіаційної техніки. По-друге, здійснити оцінювання обсягу необхідного фінансового ресурсу для закупівлі та експлуатації придбаних багатоцільових тактичних літаків, забезпечення частин тактичної авіації авіаційним озброєнням та створення відповідної системи наземного забезпечення, з урахуванням розподілу даного ре-

сурсу по періодах реалізації програмних заходів розвитку. По-третє, оцінити потрібний час, який знадобиться для здійснення закупівель того або іншого типу багатоцільових літаків, з оглядом на те, що наявність на світовому ринку озброєння у визначеній кількості певного типу бойових літаків обмежується сукупністю факторів, які притаманні світовому ринку озброєння.

Як відомо, світовий ринок озброєння являє собою самостійний сектор світового ринку, який з одного боку є достатньо автономним, а з іншого – вирізняється суттєвими особливостями.

Першою особливістю є те, що ініціювання розробки нових зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), як правило, належить замовнику (покупцю), який визначає вимоги до військової техніки, тільки після чого виробник починає розробку і виробництво замовленого озброєння. Іншою мовою, на світовому ринку озброєння, як правило, здійснюється не закупівля готового товару у необхідній кількості, а розміщується замовлення на виготовлення виробником заданої кількості виробів ОВТ, що відповідає заданим вимогам за деякий час, що обумовлений можливостями виробника (за аналогією із замовленням в ательє).

Другою особливістю є те, що попит на ОВТ обумовлюється характером наявних викликів та загроз, а також інтересами держави (блоку держав) на міжнародній арені.

Третя особливість – крупні за обсягом проекти по виробництву військових товарів забезпечують виробникам фінансування наукових досліджень і розробок новітніх зразків ОВТ на протязі тривалого періоду часу, включаючи модернізацію, що обумовлює необхідність для виробників ОВТ планувати розвиток виробництва на десятки років наперед. Для розвинутих країн світу розвиток та підтримка національного оборонно-промислового комплексу (ОПК) входить до пріоритетних напрямів національних стратегій розвитку країн, оскільки для багатьох країн продукція ОПК є, окрім значної частки експортного потенціалу, суттєвим сектором розвитку національних високотехнологічних галузей науки і виробництва.

Наступна суттєва особливість полягає в тому, що має місце значна тривалість за часом виконання укладених угод щодо постачання ОВТ замовнику, оскільки країни-імпортери виявляються зацікавленими в сервісному обслуговуванні, постачанні запасних частин і боєприпасів, модернізації придбаних раніше зразків ОВТ і т.д. [2–5].

Також на світовому ринку, особливо для бойової авіаційної техніки, кількість виробників і покупців військової техніки однієї номенклатури в межах однієї держави є обмеженою, що обумовлює, у масштабах світової економіки, функціонування від-

носно невеликої кількості крупних фірм виробників кінцевої військової продукції. Водночас має місце суттєва обмеженість доступу до військово-економічної інформації світового ринку озброєння, що обумовлено закритістю деталей міжнародних угод, або наявна інформація вкрай недостатня та не завжди валідна. Цілком очевидно, що наслідком цього є недостовірність, а інколи і суперечливість оцінок стану світового ринку озброєння та можливих тенденцій його розвитку.

Тим не менш, не вдаючись до детальних фінансових аспектів розвитку сучасного світового ринку озброєння можна виділити основні безсуперечні тенденції цього процесу, що мають обумовлювати прийняття стратегічних рішень щодо оборонних закупівель на рівні держав.

Так, сталою світовою тенденцією є швидкий розвиток високотехнологічного, інтелектуального, високовартісного ОВТ (особливо зразків бойової авіаційної техніки, засобів протиповітряної оборони та систем управління авіацією та протиповітряної оборони). До речі, лідируючі позиції на світовому ринку озброєння займає саме бойова авіаційна техніка з обсягом до 45-50%, при чому, така тенденція спостерігається на протязі останніх декількох десятиріч, що обумовлено високою вартістю одного такого зразка ОВТ та укладання контрактів щодо закупівлі бойової авіаційної техніки партіями. Крім того, збільшення попиту на світовому ринку бойової авіаційної техніки безпосередньо впливає і на підвищення попиту у суміжних сегментах світового ринку ОВТ – засобах протиповітряної оборони, авіаційного озброєння, наземного аеродромного обладнання та ін. [6].

В силу обмежених можливостей покупців внаслідок високої вартості нових високотехнологічних зразків ОВТ спостерігається збільшення на світовому ринку пропозицій по продажу модернізованих та бувших в експлуатації зразків ОВТ. Багато країн Східної Європи, які мають фінансові обмеження щодо закупівлі новітньої авіаційної техніки, обирають саме такий шлях розвитку системи озброєння власної тактичної авіації. З одного боку – це непогана альтернатива для країн-імпортерів щодо оновлення авіаційних парків власних збройних сил за рахунок військово-технічної допомоги провідних країн світу. З іншого боку – можливість для країн-експортерів уникнення зайвих витрат на зберігання та утилізацію зразків ОВТ, які застарівають, з одночасною можливістю оновлення парку бойової авіаційної техніки власних збройних сил новітнім ОВТ.

На сьогодні, маючи досить специфічні особливості, світовий ринок озброєння залишається ринком покупця, на якому пропозиція перевищує попит [7], але разом з цим, світовий ринок озброєння є досить обмеженим з урахуванням фактору часу. Ре-

алізувати закупівлю озброєння, тим паче, високотехнологічного та ресурсомісткого, яким безумовно є бойова авіаційна техніка, “терміново зараз” можливо лише у виняткових випадках, навіть не враховуючи обмежувальний фінансовий фактор.

Глибокий і детальний аналіз сегменту ринку озброєння, зокрема багатоцільових літаків тактичної авіації, бажання та можливостей окремих країн здійснити термінові закупівлі бойової авіаційної техніки, свідчить про “теоретичну” можливість лише термінового укладання відповідних контрактів на постачання, але не про постачання самого нового ОВТ [4; 8–13].

Як свідчить світовий досвід [14–26] терміни від початку проведення тендерних процедур, узгодження умов контракту на постачання бойових тактичних літаків до, власне, початку надходження літаків у бойові частини, можуть складати не менш ніж 6–10 років, а в деяких випадках, навіть й більше. Перш за все, обсяги можливих закупівель, вочевидь, обмежуватимуться наявністю раніше укладених угод щодо постачання певної кількості виробів іншим замовникам, а головне, обмеженими виробничими можливостями країн-виробників, навіть за умови відсутності у замовника обмежень фінансового ресурсу.

У світовій практиці реалізації закупівель багатоцільових літаків тактичної авіації укладання контрактів щодо постачання визначеного обсягу серійної продукції здійснюється ще на етапі розробки літальних апаратів, тобто коли їх виробництво ще не розпочато взагалі, або у кращому випадку, які вже знаходяться у малосерійному, а не у масовому виробництві. Тому темп виробництва бойових літаків, їх технологічний рівень, з одного боку, безпосередньо обумовлюють насиченість та тенденції розвитку цього сегменту світового ринку озброєння, а з іншого боку це може бути підґрунтям для оцінювання зміни оперативного середовища навколо України, що безумовно актуалізує проведення досліджень у цьому напрямку

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З огляду на те, що головним носієм спроможностей Повітряних Сил ЗС України із забезпечення і підтримки дій інших складових сил оборони є і залишатиметься тактична авіація [1], розвиток спроможностей тактичної авіації ПС ЗС України, набуття яких визначено у відповідності до можливих сценаріїв застосування Повітряних Сил, та закріплено у Єдиному каталозі спроможностей [27], можливий за умови забезпечення Повітряних Сил Збройних Сил України сучасною бойовою авіаційною технікою. Це питання вимагає найскорішого вирішення, що обумовлено спливанням термінів експлуатації літаків тактичної авіації, які зараз перебувають на озброєнні ПС ЗС України. У Візії Повітряних Сил

2035 анонсовано досить амбітна мета щодо проведення тендеру та підписання контракту на закупівлю багатоцільового винищувача, обмежені постачання якого (загальна кількість до 6–12 літаків) мають розпочатися у 2023 – 2025 роках для початку дослідної експлуатації. Але як свідчить світовий досвід здійснення термінових закупівель бойової авіаційної техніки, реалізація таких планів може зайняти більше часу, ніж планується у Візії. Проведений аналіз методичного забезпечення супроводження планування заходів із оборонного планування щодо оновлення, зокрема, бойової авіаційної техніки, виявив недостатню системність та повноту аналізу факторного простору чинників, які безпосередньо впливають як на темпи проведення тендерних процедур, так і на можливі строки та обсяги закупівель та постачання бойової авіаційної техніки. У сучасному науковому просторі недостатньо висвітлене питання аналізу темпу серійного виробництва сучасної бойової авіаційної техніки, який безпосередньо обумовлюється впливом рівня її бойових можливостей, технічної досконалості та технологічності на можливі терміни виробництва та постачання літаків тактичної авіації, і, як наслідок, набуття авіаційними частинами спроможностей у виконанні бойових завдань [28–37].

Відповідно до цього, **метою статті** є розробка математичної моделі темпу серійного виробництва багатоцільових літаків тактичної авіації конкретного типу в залежності від значень узагальнених показників їх бойових властивостей – коефіцієнтів бойового потенціалу у виконанні завдань по знищенню повітряних цілей та завдань з вогневого ураження наземних цілей.

Виклад основного матеріалу

При формуванні системи формалізованих критеріїв раціональності програми розвитку системи озброєння тактичної авіації ПС ЗС України на довгостроковій перспективі було обґрунтовано необхідність введення додаткового обмеження щодо максимальної кількості літаків конкретного типу, яку можна закупити для нарощування спроможностей тактичної авіації у виконанні завдань за призначенням за всіма визначеними сценаріями застосування Повітряних Сил Збройних Сил України [38–40]. Таке обмеження має наступний формалізований вигляд:

$$\Delta N_{j\tau}^{\max} = \min \left\{ N_{j\tau}^{\text{наявн max}} + \dot{N}_{j\tau}^{\max} \cdot \Delta t_{\tau}; \left[\frac{S_{\tau}^{\text{зад}}}{C_{1j}} \right] \right\}, \quad (1)$$

де $\Delta N_{j\tau}^{\max}$ – максимально можлива кількість літаків j -го типу, які доступні для закупівлі на світовому ринку озброєння на інтервалі часу τ ;

τ – поточний інтервал часу Δt ;

$N_{j\tau}^{\text{наєвн max}}$ – максимальна кількість літаків j -го

типу, що вже виготовлені (наявні на ринку озброєння) та можуть бути закупленими (в тому числі, із застосуванням процедур лізингу) та поставленими у війська на τ -му інтервалі часу;

$\dot{N}_{j\tau}^{\text{max}}$ – максимально можливий темп серійного виробництва літаків j -го типу на τ -му інтервалі часу;

$\left[S_{\tau}^{\text{зад}} / C_{1j} \right]$ – визначена з округленням до найменшої цілої величини максимальна кількість літаків j -го типу, що може бути закупленою на τ -му інтервалі часу за фінансових обмежень $S_{\tau}^{\text{зад}}$;

C_{1j} – вартість закупівлі одного літака j -го типу.

Вираз (1) наведено з врахуванням того, що при формуванні програми розвитку озброєння тактичної авіації здійснюється розбиття періоду планування $[t_0, T_{\text{зад}}]$ на кінцеву кількість T рівномірних відрізків – інтервалів, тривалістю Δt кожен, тобто $T = \frac{T_{\text{зад}} - t_0}{\Delta t}$. При цьому, вважається, що постачання нових літаків у війська на кожному інтервалі часу буде відбуватися у середні кожного інтервалу та нові літаки відразу після постачання у військові частини починають використовуватися за призначенням [39].

Для включення до розгляду в якості альтернативних літаків для оновлення бойового авіаційного парку тактичної авіації ПС ЗС України на довгостроковій перспективі доцільно розглядати лише тільки ті типи літаків, які, з одного боку, мають забезпечити набуття необхідного рівня спроможностей у виконанні визначених завдань у відповідності до можливих сценаріїв застосування тактичної авіації, а з другого боку – для закупівлі яких є можли-

вість укладання контрактів з огляду на фінансові обмеження та обмеження за часом, на протязі якого можуть здійснюватися поставки бойових літаків до військових частин. Максимальна кількість літаків j -го типу, що вже виготовлені (наявні на ринку озброєння) та можуть бути закупленими та поставленими у війська на τ -му інтервалі часу обумовлюється або їх реальною наявністю, або максимально можливим темпом серійного виробництва літаків j -го типу на $(\tau - 1)$ -му інтервалі часу.

Максимально можливий темп виробництва бойових тактичних літаків може бути оціненим за допомогою відповідної математичної моделі.

Така модель може ґрунтуватися на оцінюванні залежності темпу серійного виробництва літаків тактичної авіації від їх узагальнених показників якості, що визначаються на підставі кваліметричних моделей винищувальних та ударних властивостей багатоцільових тактичних літаків, в основу яких покладено функціональний зв'язок між значеннями коефіцієнтів бойового потенціалу багатоцільового тактичного винищувача у вирішенні завдань за призначенням (знищення повітряних та наземних цілей) та визначаючих відповідні спроможності літака тактико-технічними характеристиками [41–43].

За наявності відповідних кваліметричних моделей бойових потенціалів багатоцільових тактичних літаків у виконанні ними винищувальних ($K_{\text{бп пов}}$) та ударних задач ($K_{\text{бп наз}}$) можливо провести оцінювання бойових потенціалів відомих літаків тактичної авіації та зробити попередню оцінку термінів їх серійного виробництва. Для побудови математичної моделі темпу серійного виробництва були зібрані відомості щодо серійного виробництва відомих у світовій практиці літакобудування типів багатоцільових літаків (з оглядом на потужність однієї виробничої лінії), що містяться в наявних джерелах науково-технічної та економічної інформації [44–48], та які зведені у табл. 1.

Таблиця 1

Відомості щодо темпів серійного виробництва різних типів багатоцільових літаків тактичної авіації та їх коефіцієнтів бойового потенціалу

Тип літака	$K_{\text{бп пов}}$ (еталон F-16E)	$K_{\text{бп наз}}$ (еталон F-16E)	Темп серійного виробництва
1	2	3	4
Миг-21бис	0,374	0,152	144
Миг-23М	0,532	0,230	94
F-5E	0,232	0,143	61
F-15C	1,000	0,738	49
F-16A	0,695	0,162	40
F-16C/D	0,695	0,738	40
F-22A	1,246	1,858	14
JAS-39A	1,084	0,809	11

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
F-15E	1,217	1,324	20
F-16E	1,000	1,000	20
Dassault Mirage 2000	0,955	1,417	14
Миг-29	0,985	0,467	42
Су-27С	1,236	0,500	37
Су-30 МК	1,061	0,973	13
Су-35	1,412	1,112	10
МиГ-31БМ	1,134	1,051	17
F-35 А	1,246	1,619	16
Rafale	1,067	1,087	12
EF-2000	1,182	1,044	12
JAS-39C/D	0,842	0,829	17
JAS-39E/F	1,040	0,933	12

На початку розробки математичної моделі наявний статистичний матеріал був згрупований у базову вибірку. Загальний обсяг отриманої вибірки є достатнім для побудови математичної моделі, тобто кількість літаків, що розглядається, є не менш ніж на одиницю більшою, ніж кількість факторів у складі моделі.

Для перевірки ступеню узгодженості побудованого варіанту математичної моделі з відомими статистичними даними та оцінки її якості було сформовано контрольну вибірку, в яку внаслідок обмеженості наявного матеріалу, було включено як типи літаків, що не містяться у базовій вибірці, так і обмежену кількість новітніх літаків, що були присутні в останній. Так, відомо, що у випадку, коли загальна чисельність відомих реалізацій незначна та її не ви-

стачає для складання приблизно рівних за обсягом базової та контрольної вибірки, можливо включення одних й тих же реалізацій у обидві вибірки водночас, але при цьому до контрольної вибірки обов'язково мають бути включені реалізації літаків, що не увійшли до складу базової вибірки [42]. Після формування вибірок, для попереднього аналізу можливого впливу коефіцієнтів бойового потенціалу багатоцільових тактичних літаків $K_{бп\ пов}$ та $K_{бп\ наз}$

на темп серійного виробництва літаків для визначення варіантів вигляду форм математичних моделей, які будуть розглядатися в якості претендентів на остаточний вид залежності, були побудовані проекції точок, що відповідають наявним реалізаціям на площини системи координат факторного простору (рис. 1–2).

Рис. 1. Проекція залежності темпу серійного виробництва літаків від $K_{бп\ пов}$

Джерело: розроблено автором.

По цих проекціях були побудовані графіки проекцій різних функцій темпу серійного виробництва $F_j^{вироб\ max} = f(K_{бн\ j\ нов}, K_{бн\ j\ наз})$ на відповідні площини, які могли би претендувати на апроксимуючу базову вибірку.

Було встановлено, що в якості можливих альтернативних видів функціональних залежностей, які відшукуються, доцільно розглядати логарифмічну, експоненціальну та степеневу функції.

Рис. 2. Проекція залежності темпу серійного виробництва літаків від $K_{бн\ наз}$
Джерело: розроблено автором.

Таким чином, первинний формалізований вигляд альтернативних апроксимуючих функцій було обрано наступним:

$$F_j^{вироб\ max} = a_0 + a_1 \cdot \ln(K_{бн\ j\ нов}) + a_2 \cdot \ln(K_{бн\ j\ наз}); \quad (2)$$

$$F_j^{вироб\ max} = a_0 + a_1 \cdot e^{K_{бн\ j\ нов}} + a_2 \cdot e^{K_{бн\ j\ наз}}; \quad (3)$$

$$F_j^{вироб\ max} = a_0 + \frac{a_1}{K_{бн\ j\ нов}} + \frac{a_2}{K_{бн\ j\ наз}}; \quad (4)$$

$$F_j^{вироб\ max} = a_0 + (K_{бн\ j\ нов})^{a_1} + (K_{бн\ j\ наз})^{a_2}. \quad (5)$$

Для кожної з визначених альтернативних форм залежності показника темпу серійного виробництва літаків тактичної авіації складалася система нормальних рівнянь, що за процедурою апроксимації за методом найменших квадратів описує умову мінімізації середньоквадратичного відхилення реальних значень темпу серійного виробництва багаточислових літаків від тих, що мають бути розрахованими за математичною моделлю, яка буде розроблена. Це дозволило визначити значення невідомих коефіцієнтів при відповідних факторах. Для кожної альтернативної форми здійснювалася перевірка якості оцінювання залежності показника темпу серійного виробництва літаків тактичної авіації від їх коефіцієнтів бойового потенціалу.

В якості системи зовнішніх критеріїв для визначення придатності альтернативних варіантів математичної моделі темпу серійного виробництва

літаків тактичної авіації, її адекватності та точності було обрано [42; 49–54]:

– середньоквадратичну помилку на інтервалі інтерполяції, при використанні в якості $F_j^{вироб\ реал}$ значень темпу серійного виробництва літаків зі складу контрольної вибірки статистичного матеріалу ємністю L , а в якості $F_j^{вироб\ розр}$ – розраховане значення по моделі:

$$\sigma_e^2 = D = \sum_{j=1}^L \frac{(F_j^{вироб\ реал} - F_j^{вироб\ розр})^2}{L(L-1)} \quad (6)$$

– абсолютне середнє відхилення в області інтерполяції (7):

$$E = (D)^{0,5}; \quad (7)$$

– середню вірогідну похибку в області інтерполяції (8):

$$r_A = \pm 0,6745E; \quad (8)$$

– максимальну відносну помилку розрахунків в області інтерполяції:

$$\delta_{max} = \max_{j=1..L} \left| \frac{F_j^{вироб\ реал} - F_j^{вироб\ розр}}{Rate_j^{реал}} \right| \quad (9)$$

– середню помилку апроксимації:

$$\bar{A} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \left| \frac{F_j^{вироб\ реал} - F_j^{вироб\ розр}}{F_j^{вироб\ реал}} \right| \cdot 100\% \quad (10)$$

– середнє відносне відхилення:

$$\bar{\delta} = \sum_{j=1}^L \frac{F_j^{вироб\ реал} - F_j^{вироб\ розр}}{L} \quad (12)$$

Значення зазначених показників визначалися на базі змішаної контрольної вибірки, що було обумовлено пасивним характером спостережень за реалізаціями літаків на світовому рівні, а також суттєвою обмеженістю обсягу наявних реалізацій. Саме пасивний характер спостережень не дозволяє застосовувати відомі комплексні критерії для перевірки узгодженості моделей. Результати порівняльного оцінювання якості отриманих альтернативних форм математичної моделі наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати порівняльного оцінювання альтернативних математичних моделей на контрольній вибірці

Альтернативні варіанти моделі	D	E	r_A	δ_{max}	$\bar{\delta}$	$\bar{A}$
$F_j^{вироб\ max} = 12 - 11,07 \cdot \ln(K_{\delta n j\ нов}) - 18,78 \cdot \ln(K_{\delta n j\ наз})$	9,97	3,16	2,13	1,07	41,6	43,6
$F_j^{вироб\ max} = 119,2 - 27,31 \cdot e^{K_{\delta n j\ нов}} - 4,38 \cdot e^{K_{\delta n j\ наз}}$	96,81	9,84	6,64	4,2	20,4	148,3
$F_j^{вироб\ max} = 1,07 - \frac{0,75}{K_{\delta n j\ нов}} + \frac{12,76}{K_{\delta n j\ наз}}$	1,69	1,3	0,88	0,48	10	14,35
$F_j^{вироб\ max} = 12 + (K_{\delta n j\ нов})^{-0,81} + (K_{\delta n j\ наз})^{-2,21}$	0,52	0,72	0,49	0,18	0,02	13,38

Із сукупності альтернативних варіантів моделі, що були побудовані, доцільно визначити ті, які мають найкращі значення показників якості моделі за обраними критеріями. Насамперед, показовим є значення відносної помилки апроксимації (10), для якої

допустимою границею є показник не більше 15% [50–53]. Такими моделями виявились адитивні форми степеневих залежностей (гіперболічний вигляд – як частковий випадок степеневі залежності) від коефіцієнтів бойового потенціалу тактичного літака:

$$F_j^{вироб\ max} = 0,95 - \frac{0,75}{K_{\delta n j\ нов}} + \frac{12,76}{K_{\delta n j\ наз}} \pm 0,89; \quad (13)$$

$$F_j^{вироб\ max} = 12 + (K_{\delta n j\ нов})^{-0,81} + (K_{\delta n j\ наз})^{-2,21} \pm 0,49. \quad (14)$$

Крім того, важливим критерієм при виборі моделі є вірність описання нею відомих тенденцій зміни темпу серійного виробництва літаків тактичної авіації при зміні значень кожного фактору зі складу моделі. Така тенденція може оцінюватися знаком часткової похідної залежності часткового показника по даному фактору. Наприклад, якщо відомо, що показник даної властивості має спадати із зростанням значення фактору, то відповідна часткова похідна повинна бути від'ємною в області інтерполяції. В даному випадку, відомою тенденцією є ускладнення виробництва зразка внаслідок закладання в нього більших бойових властивостей, особливо – багатофункціональних. Тобто чим більші значення узагальнених показників властивостей, тим меншим слід очікувати темп серійного виробництва (рис. 1–2).

Вибір остаточного вигляду математичної моделі темпу серійного виробництва літаків тактичної авіації зроблено на користь моделі (14), оскільки часткові похідні степеневі згортки по всіх факторах є від'ємними в межах фізичних значень незалежних змінних зі складу моделі. Тобто знаки значень всіх часткових похідних вірно відображують відому з практики тенденцію зміни показника темпу серійного виробництва літаків при зміні кожного фактору з врахованих у моделі – при збільшенні значень часткових показників бойових потенціалів літака спостерігається зменшення темпів їх серійного виробництва. При аналізі часткових похідних моделі (13), була виявлена невідповідність знаків часткових похідних, що свідчить про некоректне відображення тенденції зміни темпу серійного виробництва літаків при зміні відповідних факторів моделі.

В табл. 3 наведено відомості для коефіцієнтів бойового потенціалу сучасних літаків тактичної авіації із контрольної вибірки та показники розрахова-

них за обраною моделлю (14) оцінок темпів їх серійного виробництва.

Таблиця 3

Контрольна вибірка літаків тактичної авіації та відомості щодо коефіцієнтів бойового потенціалу багатоцільових літаків тактичної авіації $K_{бппов}$, $K_{бпназ}$ та прогнозних темпів їх серійного виробництва

Тип літака	$K_{бппов}$ (еталон F-16E)	$K_{бпназ}$ (еталон F-16E)	Прогнозований темп серійного виробництва	Розрахований темп серійного виробництва	Відносна похибка
Су-35	1,412	1,112	12	13,55	-0,13
МиГ-35	1,260	1,070	15	13,69	0,09
Су-57	1,667	1,479	14	13,08	0,07
F-35 A	1,246	1,619	16	13,18	0,18
Rafale	1,067	1,087	12	13,78	-0,15
EF-2000	1,182	1,044	12	13,78	-0,15
JAS-39C/D	0,842	0,829	17	14,66	0,14
JAS-39E/F	1,040	0,933	12	14,13	-0,18

Максимальна відносна похибка дорівнює 18% – як у бік завищення розрахункових даних, так і у бік заниження. Середня квадратична похибка на контрольній вибірці складає 0,52, а вірогідна похибка $\pm 0,49$. Результати перевірки свідчать про задовільну точність описання апроксимуючою залежністю (14) даних контрольної вибірки та вірну поведінку зміни показника темпу серійного виробництва літаків від обраних факторів, а побудована математична модель може бути рекомендованою для практичного використання в ході проведення обґрунтування програм і планів розвитку тактичної авіації ПС ЗС України для прогнозних оцінок зміни оперативного середовища та аналізу альтернативних варіантів закупівлі нових багатоцільових літаків для переозброєння авіаційних частин з урахуванням впливу тенденцій зміни світового ринку озброєння у сегменті бойової авіаційної техніки.

Висновки

Побудовано математичну модель темпу серійного виробництва багатоцільових літаків тактичної авіації.

Результати перевірки працездатності розробленої математичної моделі та отримані характеристики точності описання залежності темпу серійного виробництва від показників бойових властивостей тактичного літака свідчать про її придатність до практичного застосування в ході обґрунтування напрямів розвитку системи озброєння авіації Повітряних Сил Збройних Сил України на довгостроковій перспективі.

Подальші дослідження планується спрямувати на розробку математичних моделей термінів розробки та вартості сучасних і перспективних багатоцільових літаків тактичної авіації.

Список літератури

1. Візія Повітряних Сил 2035. – Вінниця: Командування Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – 42 с.
2. Офіційний сайт RIA.RU. РІА Новости. – Режим доступу: <https://ria.ru/20181031/1531825257.html>.
3. Офіційний сайт MOD.GOV. Крупнейший в истории проект модернизации вооруженных сил становится реальностью, министр обороны подписал контракты на закупку самолетов F-16. – Режим доступу: <https://www.mod.gov.sk/43306-sk/najvacsi-modernizacny-projekt-ozbrojenych-sil-v-historii-sa-stava-realitou-minister-obrany-podpisal-zmluvy-k-obstaraniu-lietadiel-f-16/>.
4. Офіційний сайт BMPD.LIVEJOURNAL. Румыния получает дополнительные истребители F-1. – Режим доступу: <https://bmpd.livejournal.com/4114659.html>.
5. Офіційний сайт LOCKHEEDMARTIN.COM. Lockheed Martin Awarded Contract To Build F-16 Block 70 Aircraft For Bahrain. – Режим доступу: https://news.lockheedmartin.com/2018-06-25-Lockheed-Martin-Awarded-Contract-to-Build-F-16-Block-70-Aircraft-for-hrain?_ga=2.14981810.509777428.1609405198-1479502474.1609405198.
5. Офіційний сайт BREAKINGDEFENSE.COM. Gulf Countries, US Must Boost 4th & 5th Fifth Gen Fighter Data Sharing. – Режим доступу: <https://breakingdefense.com/2020/12/gulf-countries-us-must-boost-4th-5th-fifth-gen-fighter-data-sharing/>.
6. Поляков В.В. Мировая экономика и международный бизнес / В.В. Поляков, Р.К. Щенин. – М.: КноРус, 2012. – 688 с.
7. Леонович А.Н. Факторы и тенденции развития мирового рынка вооружения и военной техники / А.Н. Леонович / Белорусский экономический журнал. – 2018. – № 2. – С. 30-49.

8. Офіційний сайт DSCA.MIL. United Arab Emirates – Equipment In Support Of A Direct Commercial Sale Of F-16 Block 61 Aircraft. – Режим доступу: <https://www.dsca.mil/press-media/major-arms-sales/united-arab-emirates-equipment-support-direct-commercial-sale-f-16>.
9. Офіційний сайт BMPD.LIVEJOURNAL. Планируемая продажа Марокко американских истребителей F-16V. – Режим доступу: <https://bmpd.livejournal.com/3585072.html>.
10. Офіційний сайт DSCA.MIL. Morocco – F-16 Block 72 New Purchase. – Режим доступу: <https://www.dsca.mil/press-media/major-arms-sales/morocco-f-16-block-72-new-purchase>.
11. Офіційний сайт DSCA.MIL. Morocco – F-16 Block 52+ upgrade to F-16v configuration. – Режим доступу: <https://www.dsca.mil/press-media/major-arms-sales/morocco-f-16-block-52-upgrade-f-16v-configuration>.
12. Офіційний сайт VPK.NAME. Болгария оценивает возможность закупки дополнительных истребителей F-16 Блок 70 и трехкоординатных РЛС. – Режим доступу: https://vpk.name/news/455167_bolgariya_ocenivaet_vozmozhnost_zakupki_dopolnitelnyh_istrebitelei_f-16_blok70_i_trehkoordinatnyh_rls.html.
13. Офіційний сайт DEFENSE.GOV. Contracts For April 2, 2020 Lockheed Martin Aeronautics, Ft. Worth, Texas, has been awarded a \$512,004,418 firm-fixed-price contract for F-16 Block 70 production for the Republic of Bulgaria. – Режим доступу: <https://www.defense.gov/Newsroom/Contracts/Contract/Article/2135175#LOCKHEED040220>.
14. Офіційний сайт WARSPOT.RU. Словакия получит F-16. – Режим доступу: <https://warspot.ru/15233-slovakiya-poluchit-f-16>.
15. Офіційний сайт RG.RU. Южная Корея закупит еще 40 истребителей F-35. – Режим доступу: <https://rg.ru/2020/08/26/iuzhnaia-koreia-zakupit-eshche-40-istrebitelej-f-35.html>.
16. Офіційний сайт EUROINTEGRATION.COM. Бельгия выберет американский F-35, а не европейский истребитель для замены своих самолетов. – Режим доступу: <https://www.eurointegration.com.ua/rus/news/2018/10/22/7088477/>.
17. Офіційний сайт I-KOROT-CHENKO.LIVEJOURNAL. В Норвегию прибыла шестая партия истребителей F-35A. – Режим доступу: <https://i-korot-chenko.livejournal.com/1525758.html>.
18. Офіційний сайт ARMYINFORM.COM. Як різні країни оновлюють свої бойові авіапарки. – Режим доступу: <https://armyinform.com.ua/2020/11/yak-rizni-krayiny-onovlyuyut-svoyi-bojovi-aviaparky/>.
19. Офіційний сайт AVIA PORT.RU. Сделка на \$4,6 млрд: зачем Польше американские истребители пятого поколения. – Режим доступу: <https://www.avia-port.ru/digest/2020/01/31/624959.html>.
20. Офіційний сайт AIRFORCEMAG.COM. Greece Wants F-35s So Quickly It's Willing to Accept Used Aircraft – Режим доступу: <https://www.airforcemag.com/greece-wants-f-35s-so-quickly-its-willing-to-accept-used-aircraft/>.
21. Офіційний сайт BMPD.LIVEJOURNAL. Программа закупки Румынией истребителей F-16: состояние и перспективы. – Режим доступу: <https://bmpd.livejournal.com/2385586.html>.
22. Офіційний сайт BMPD.LIVEJOURNAL. Первый истребитель JAS-39E Gripen для Бразилии. – Режим доступу: <https://bmpd.livejournal.com/3751170.html>.
23. Офіційний сайт TAKE-OFF.RU. Gripen E пошел в серию. – Режим доступу: <http://www.take-off.ru/item/4247-gripen-e-poshel-v-seriyu>.
24. Офіційний сайт UKRMILITARY.COM. Греция подписала контракт на придбання 18 літаків Rafale. – Режим доступу: <https://www.ukrmilitary.com/2021/01/18-rafale.html>.
25. Офіційний сайт DASSAULT-AVIATION.COM. Greece equips itself with the RAFALE in the continuity of a partnership with DASSAULT AVIATION of more than 45 years. – Режим доступу: <https://www.dassault-aviation.com/en/group/press/press-kits/greece-equips-itself-with-the-rafale-in-the-continuity-of-a-partnership-with-dassault-aviation-of-more-than-45-years/>.
26. Шамко В.Є. Розвиток форм і способів застосування Повітряних Сил Збройних Сил України в сучасних умовах ведення збройної боротьби / В.Є. Шамко, О.М. Жарик, В.В. Коваль // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 2(31). – С. 9-15. <https://doi.org/10.30748/ntps.2018.31.01>.
27. Єдиний перелік (каталог) спроможностей Міністерства оборони України, Збройних Сил України та інших складових сил оборони № 7983/в/36 від 09.12.2019 р. – К.: Міністерство оборони України, 2019. – 618 с.
28. Жданов С.В. Проблема заміни парку бойових літаків в Україні / С.В. Жданов // Озброєння та військова техніка. – 2016. – № 4(2). – С. 9-16.
29. Теорія озброєння. Науково-технічні проблеми та завдання. Т. 5. Воєнно-технічна політика України: формування, стан та шляхи удосконалення: монографія / І.Б. Чепков, В.В. Зубарєв, В.О. Смірнов та ін. – К.: ВД Дмитра Бурого, 2017. – 448 с.
30. Методичний підхід до формування оптимального варіанту програмних заходів з оснащення авіації збройних сил літальними апаратами / О.Є. Мавренков, В.В. Логінов, В.В. Войтенко, С.В. Кирнажицький // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України – 2016. – № 1(22). – С. 46-49.
31. Мавренков О.Є. До питання оцінювання заданого рівня бойового потенціалу авіації Збройних Сил України / О.Є. Мавренков, С.І. Леженін // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. – 2011. – № 14. – С. 16-22.
32. Чепков І.Б. Основні аспекти методології формування та супроводження реалізації середньострокових програм озброєння в умовах особливого періоду / І.Б. Чепков М.І. Луханін, І.В. Борохвостов // Озброєння та військова техніка. – 2016. – № 4(2). – С. 3-8.
33. Оборонна реформа: системний підхід до оборонного менеджменту: монографія / А. Павліковський, В. Фролов, Ф. Саганюк та ін.; за заг. ред. А. Сиротенка. – К.: НУОУ, 2020. – 274 с.
34. Оборонний огляд: український вимір 2014-2018: монографія / Ф. Саганюк, А. Павліковський, П. Щипанський та ін.; за заг. ред. І. Руснака. – К.: МО та ГШ ЗС України, НУОУ, 2019. – 196 с.
35. Борохвостов І.В. Визначення критеріїв та методів оцінювання шляхів забезпечення військових формувань озброєнням та військовою технікою / І.В. Борохвостов, М.О. Білокур // Озброєння та військова техніка. – 2018. – № 3(19). – С. 3-8.

36. Бадрак В.В. Переозброєння Збройних Сил України: раціоналізація підходів, пошук альтернативних шляхів / В.В. Бадрак // Озброєння та військова техніка. – 2016. – № 1(9). – С. 3-8.
37. Чепков І.Б. Основні аспекти методології формування та супроводження реалізації середньострокових програм озброєння в умовах особливого періоду / І.Б. Чепков М.І. Луханін, І.В. Борохостов // Озброєння та військова техніка. — 2016. – № 4(2). – С. 3-8.
38. Дроздов С.С. Формалізовані критерії раціональності програми розвитку системи озброєння тактичної авіації Повітряних Сил Збройних Сил України на довгостроковій перспективі // С.С. Дроздов, О.Б. Леонтьєв, М.В. Науменко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2020. – № 3. – С. 13-24. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.65.02>.
39. Дроздов С.С. Методичний підхід до розв'язування математичної задачі синтезу раціональної програми розвитку системи озброєння тактичної авіації на основі критерію мінімізації фінансових витрат за умови досягнення необхідних бойових спроможностей / С.С. Дроздов, О.Б. Леонтьєв, М.В. Науменко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 4(41). – С. 54-63.
40. Леонтьєв О.Б. Напрями удосконалення науково-методичного апарату обґрунтування основних напрямів розвитку системи озброєння авіації Повітряних Сил Збройних Сил України / О.Б. Леонтьєв, М.В. Науменко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 3(40). – С. 69-78. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.40.08>.
41. Удосконалена методика оцінювання узагальнених показників якості перспективних ударних авіаційних комплексів та тих, що модернізуються / О.Б. Котов, О.Б. Леонтьєв, О.М. Компанієць, А.Г. Дмитрієв // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2011. – № 3(29). – С. 52-56.
42. Сучасний метод бойових потенціалів в прикладних задачах планування розвитку та застосування тактичної авіації: монографія / Б.Й. Семон, О.Б. Леонтьєв та ін. – К.: НАОУ, 2009. – 336 с.
43. Леонтьєв О.Б. Методика оцінки бойового потенціалу ударних авіаційних комплексів при вирішенні ними вогневих задач / О.Б. Леонтьєв, О.М. Компанієць, В.В. Шмаков // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2008. – № 2(17). – С. 23-26.
44. Сучасне озброєння озброєння і військова техніка Збройних сил Російської Федерації. Довідник учасника ООС / С.П. Корнійчук, О.В. Турінський, Г.В. Певцов, та ін.; за заг. ред. С.П. Корнійчука. – Х.: ДІСА ПЛЮС, 2020. – 1220 с.
45. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Д.А. Антонов и др. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.
46. Офіційний сайт AIRWAR.RU. Военная авиация. Послевоенный период. – Режим доступу: <http://www.airwar.ru/aircraft.html>.
47. Федосов Е.А. Бортовые экспертные системы тактических самолетов 5-го поколения аналитический обзор по материалам зарубежной информации / Е.А. Федосов. – М.: Изд. НИЦ ГосНИИАС, 2000. – 567 с.
48. Тактическая авиация НАТО на Европейских ТВД // Информационно-аналитический сборник ГРУ ГШ ВС СССР. – М.: ГШ ВС СССР, 1989. – 425 с.
49. Демидов Б.А. Теория и методы военно-научных исследований вооружения и военной техники / Б.А. Демидов. – Х.: ВИРТА. – 1990. – 558 с.
50. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А.Г. Ивахненко. – К.: Наук. думка, 1981. – 296 с.
51. Хетагуров Я.А. О построении аппроксимирующих функций характеристик малого числа систем / Я.А. Хетагуров. – Режим доступу: https://www.ispras.ru/proceedings/docs/2012/22/isp_22_2012_475.pdf.
52. Елисеева И.И. Эконометрика / И.И. Елисеева. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 344 с.
53. Каморников С.Ф. Эконометрика / С.Ф. Каморников, С.С. Каморников. – М.: Интеграция, 2012. – 262 с.
54. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.

Надійшла до редколегії 25.11.2020

Схвалена до друку 05.01.2021

Науменко Марина Володимирівна

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
докторант
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1216-9263>

Maryna Naumenko

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Doctoral Student
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1216-9263>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПА СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА МНОГОЦЕЛЕВЫХ САМОЛЕТОВ ТАКТИЧЕСКОЙ АВИАЦИИ

М.В. Науменко

Представлена математическая модель темпа серийного производства многоцелевых самолетов тактической авиации, как формализованной зависимости названного темпа от значений обобщенных показателей боевых свойств самолета – коэффициентов боевого потенциала в выполнении задач по уничтожению средств воздушного нападения противника и задач по поражению наземных целей. Проведен анализ особенностей мирового рынка вооружения, тенденций его развития, которые во многом обусловлены возможностями оборонной промышленности стран-экспортеров боевой авиационной техники. Показано непосредственное влияние темпов серийного производства самолетов тактической авиации на сроки заключения межгосударственных контрактов по производству и поставке боевой авиационной техники в воинские части, что будет обуславливать сроки освоения новых самолетов летным и ин-

женерно-техническим составом. Наличие такой математической модели позволит проводить количественную оценку сроков приобретения необходимых возможностей тактической авиации в выполнении заданий по всем определенным сценариям применения Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины. Разработанная математическая модель темпа серийного производства многоцелевых самолетов тактической авиации также позволит проводить количественную оценку возможных изменений в количественно-качественном составе воздушной компоненты вооруженных сил потенциального противника во времени, поскольку такие изменения обусловлены темпами обновления его авиационного парка, которые напрямую зависят от темпов серийного производства новых боевых самолетов. По результатам оценки адекватности и точности разработанной математической модели темпа серийного производства многоцелевых самолетов тактической авиации, можно сделать вывод о целесообразности ее практического использования в ходе проведения обоснования предложений по синтезу рациональных программ и планов развития тактической авиации Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины с учетом прогнозных оценок изменения оперативной обстановки во времени.

Ключевые слова: планирование на основе возможностей, критерии рациональности, научно-методический аппарат, оптимизация, рациональная программа развития, система вооружения авиации Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины.

MATHEMATICAL MODEL OF RATE OF SERIES PRODUCTION OF MULTIPURPOSE AIRCRAFT OF TACTICAL AVIATION

M. Naumenko

A mathematical model of the rate of serial production of multipurpose tactical aircraft is presented, as a formalized dependence of the above rate on the values of the generalized indicators of the combat properties of the aircraft - the coefficients of the combat potential in the implementation of tasks to destroy enemy air attack weapons and tasks to defeat ground targets. Analysis of features of the world weapons market, trends of its development, which are due to the opportunities of the defense industry of the countries-exporters of combat aviation equipment, is made. Shown is the direct influence of the rate of serial production of tactical aircraft on the terms of concluding interstate contracts for the production and supply of military aircraft to military units, which will determine the timing of the development of new aircraft by the flight and engineering personnel. The presence of such a mathematical model will allow for a quantitative assessment of the timing of acquiring the necessary capabilities of tactical aviation in the performance of tasks for all specific scenarios of the use of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. The developed mathematical model of the rate of serial production of multipurpose tactical aircraft will also make it possible to quantitatively assess possible changes in the quantitative and qualitative composition of the air component of a potential enemy's armed forces over time, since such changes are due to the rate of renewal of his aircraft fleet, which directly depend on the rate of serial production of new combat aircraft. Based on the results of assessing the adequacy and accuracy of the developed mathematical model of the rate of serial production of multipurpose tactical aviation aircraft, it can be concluded that it is advisable to use it in practice in the course of substantiating proposals for the synthesis of rational programs and plans for the development of tactical aviation of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, taking into account the forecast estimates of changes in the operational situation in time.

Keywords: capability-based planning, rationality criteria, scientific and methodological apparatus, optimization, rational development program, System of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine.