

В.М. Гришин, О.І. Скляр

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

ВИБІР КЛАСУ МОДЕЛІ І МЕТОДУ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті проведено аналіз методів і класів математичного моделювання процесу технічної експлуатації літальних апаратів військового призначення, які б дозволили найбільш повно та адекватно урахувати особливості технічної експлуатації авіаційної техніки в сучасних умовах.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що найбільш прийнятним методом моделювання, з погляду відповідності моделі запропонованим до неї вимогам, є метод імітаційного моделювання, а найбільш прийнятним класом для створення стохастичної моделі процесу технічної експлуатації літальних апаратів військового призначення є клас напівмарковських моделей.

Вибрані метод і клас моделювання дозволять адекватно описати процес технічної експлуатації літальних апаратів військового призначення, а результати, отримані в процесі моделювання, можуть бути використані в якості визначальних аргументів під час вибору оптимальних заходів з відновлення справності парку літальних апаратів в сучасних умовах.

Ключові слова: процес технічної експлуатації, математична модель, напівмарківський процес, стохастична модель.

Вступ

Постановка проблеми. Літальні апарати (ЛА) авіації Повітряних Сил Збройних Сил України (ПС ЗС України) належать до авіаційної техніки (АТ) 3-го та 4-го покоління і були виготовлені переважно в кінці 80-х – на початку 90-х років, а сьогодинішній їх технічний стан здебільшого характеризується застарілим обладнанням і поступовим вичерпанням призначених ресурсних і календарних показників.

Для вирішення питання забезпечення подальшої експлуатації таких ЛА Командуванням ПС ЗС України та Державним науково-дослідним інститутом авіації у співпраці з іншими науковими організаціями та підприємствами промисловості України були розроблені та впроваджені відповідні заходи.

Оснoву цих заходів становлять:

модернізація ЛА [1], яка здійснюється під час виконання капітального ремонту ЛА з встановленням міжремонтних та продовженням призначених показників;

переведення ЛА на експлуатацію за технічним станом [2];

виконання досліджень та робіт з продовження призначених показників ЛА [3].

Запровадження даного комплексу заходів дало можливість забезпечити належний рівень справності

та боєготовності ЛА авіаційних підрозділів ПС ЗС України на тривалий період.

З початком повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України, авіація ПС ЗС України в повній мірі задіяна у захисті держави та відбитті збройної агресії. Під час ведення бойових дій авіація ПС ЗС України зазнає уражень, бойових пошкоджень та втрат. Все це призводить до необхідності пошуку оптимальних заходів щодо відновлення належного рівня справності та боєготовності парку ЛА.

Особливої актуальності ці питання набувають в умовах руйнування інфраструктури військових частин, організації бойових вильотів з дублюючих аеродромів, обмеження функціонування ремонтної мережі тощо. Також мають місце обмежені можливості наявних людських, матеріальних і фінансових ресурсів.

Оцінити ефективність запроваджених заходів можна шляхом дослідження процесу технічної експлуатації (ТЕ) ЛА. Для дослідження процесу ТЕ ЛА військового призначення повинно бути в першу чергу побудовано його математичну модель, застосування якої дозволить отримати характеристики реального (або близького до нього) процесу ТЕ і виявити найкращий (оптимальний) спосіб дії при вирішенні того чи іншого завдання в

умовах, коли мають місце обмеження техніко-економічного або іншого характеру.

Під найкращими (оптимальними) способами дії можуть розглядатися як варіанти модернізації ЛА, так і програми технічного обслуговування ЛА, які переведено на експлуатацію за технічним станом, та ЛА, які експлуатуються з продовженими призначеними показниками.

У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку таких моделей і методів моделювання процесу ТЕ ЛА військового призначення, які б дозволили найбільш повно урахувати особливості експлуатації АТ в сучасних умовах та адекватно описати процес її ТЕ.

Аналіз досліджень і публікацій. Вирішенню питання опису процесу ТЕ складних технічних систем, до якої можна віднести і ЛА, присвячено ряд наукових праць [4...7].

У роботі [4, с. 5...7, 29...70, 156...165] запропоновано математичну модель процесу зміни технічного стану функціональних систем ЛА при різних методах їх ТЕ. Розроблено математичну модель, яку представлено у вигляді керованого марковського ланцюга з ергодичним простором станів, на основі якої створено методику формування раціонального управління процесом ТЕ ЛА.

У [5, с. 25...47, 49...70] запропоновано нескладні аналітичні моделі різних стратегій проведення профілактичних обслуговувань виробів, які засновані на теорії марковського відновлення.

У роботі [6, с. 236...302] на основі дискретної марковської ергодичної моделі з кінцевою множиною станів і безперервним часом розроблено методику оптимізації періодичності контролю і діагностування виробів з урахуванням глибини і неповної імовірності контролю.

У [7, с. 85...130] приведено математичні моделі експлуатації виробів АТ за станом, які засновані на прогнозуванні деякого реально існуючого, чи штучно синтезованого узагальненого параметру, що характеризує технічний стан авіаційної системи, яка досліджується. Запропоновано підхід порівняльного аналізу ефективності аналітичних моделей експлуатації авіаційних систем, побудованих за допомогою теорії керованих марковських процесів.

Як показує аналіз літератури, питання організації раціонального управління процесом ТЕ вирішуються відповідними математичними підходами.

Мета статті – є вибір і обґрунтування класу моделі і методу математичного моделювання процесу ТЕ ЛА, на основі якого можна буде оперативно оцінити оптимальність заходів з

відновлення належного рівня справності та боєготовності ЛА в сучасних умовах.

Виклад основного матеріалу

Необхідність використання математичної моделі процесу, який досліджується, і де є взаємозалежні параметри, показники і критерії, впливає з принципу системного підходу при оцінці ефективності складних систем.

Вибір математичного апарату аналізу явища, яке досліджується, базується на попередньому досвіді і даних, отриманих у результаті вивчення реальних об'єктів. У зв'язку з тим, що процес ТЕ ЛА класифікується як стохастичний, то для його описання повинна бути розроблена стохастична модель. На сьогоднішній день розроблено велику кількість стохастичних моделей [8, с. 7...56; 9, с. 46...97; 10, с. 21...25, 99...102, 142...148, 168...173; 11, с. 58...100; 12, с. 238...290] процесу технічної експлуатації складних технічних систем, основними класами яких є: булеві, агрегатні, автоматні, гаусовські, лінійні, марковські і полумарковські імовірнісні моделі та моделі у вигляді системи масового обслуговування.

У рамках булевої імовірнісної моделі передбачається, що функціонування технічної системи можливо представити у вигляді послідовно-паралельної схеми з входом і виходом, а також заданою кількістю проміжних вершин (контактів), замкнутість яких трактується як настання події, що моделюються. Очевидно, що така проста інтерпретація функціонування технічних систем не дозволяє використовувати булеві імовірнісні моделі для адекватного кількісного описання процесу ТЕ ЛА. Даний клас моделей, як правило, використовується для спрощених імовірнісних розрахунків надійності технічних систем, що досліджуються [9, с. 51...54; 10, с. 21...25].

У випадку, коли системи є досить складними, для описання звичайними математичними схемами об'єкт розчленовують на елементи, які доступні для такого описання. Звісно, що при цьому підході елементи системи можуть бути представлені у вигляді різних математичних схем. Для системи, елементи якої описані різними способами, не можна використовувати єдиний метод дослідження. Тому для описання систем, які складаються з великої кількості елементів, прагнуть вибрати для формалізації останніх універсальні математичні схеми. На сьогодні найбільш універсальною схемою, що використовується для цього, є агрегат [9, с. 90...97; 11, с. 82...100].

Агрегат як уніфікований елемент характеризується множиною моментів часу t , станів в кожний момент z , вхідних X і вихідних Y

сигналів. Перехід агрегату із стану $z(t_1)$ в $z(t_2)$, $t_2 > t_1$ визначається динамічними властивостями самого агрегату і вхідними сигналами.

Як будь-яка універсальна система, агрегатний підхід веде до перевантаження моделі, що є суттєвим негативним фактором для системи, яка може нараховувати сотні елементів. Крім того, при даному підході у моделі є обмеження на простір станів, а також складність її і втрата наочності.

Технічна система, представлена у вигляді автомата [9, с. 85...90], характеризується множиною: вхідного алфавіту x , вихідного алфавіту y та внутрішніх станів Z .

Ці множини кінцеві. Послідовні моменти часу поступання чергового вхідного сигналу ототожнюються з послідовним рядом натуральних чисел $t = 0, 1, 2, \dots$, які називаються тактами.

Сукупність вихідних сигналів залежить не тільки від сукупності вхідних сигналів, але й від внутрішнього стану автомата, який визначається інформацією, що запам'ятовується в процесі попередньої його роботи. Одна з важливих особливостей автоматів полягає в тому, що їх можна об'єднувати в складні системи, які також являються автоматами.

Необхідно відмітити, що моделями у вигляді автоматів описувати складні системи досить важко, тому їх використовують до окремих частин об'єктів, якщо вони можуть бути розподілені на окремі блоки. Це, в свою чергу, призводить до втрати наочності моделі, що може стати суттєвою перешкодою для адекватного її використання.

Гаусовська імовірнісна модель [9, с. 61...63; 10, с. 99...102] припускає можливість представлення входу $x(t)$ системи, що моделюється у вигляді

$$x(t) = u(t) + iv(t), \quad (1)$$

де $u(t), v(t)$ - дійсні процеси.

Крім того, передбачається, що багатомірні випадкові величини $(u(t_1), v(t_1), \dots, u(t_n), v(t_n))$ мають нормальний (гаусовий) розподіл.

Таким чином, процес $x(t)$ являє собою гаусовський процес і може бути представлений у вигляді

$$x(t) = \sum_n \hat{a}_n j_n(t), \quad (2)$$

де $\hat{a}_n$ - незалежні дійсні нормальні величини; $j_n(t)$ - деякі комплексні функції.

У цьому випадку вихід системи $h(t)$ в рамках гаусовської імовірнісної моделі являє собою лінійне перетворення A вхідного процесу $x(t)$:

$$h(t) = A(x(t)) = \sum_n \hat{a}_n x_n g_n(t), \quad (3)$$

де $g_n(t)$ - лінійне перетворення за допомогою оператора A функції $j_n(t)$.

Лінійна імовірнісна модель технічної системи [9, с. 54...61] заснована на припущенні, що процес її функціонування описується лінійним оператором $y = Ax$. Це означає, що є такі лінійні простори X, Y , при яких вхід x процесу може бути будь-як елементом X , а вихід y належить Y .

При цьому простори X, Y можуть вважатися кінцево вимірними або просторами функцій на кінцевому або нескінченному інтервалі часу. У першому випадку оператор A ототожнюється з матрицею $A = (a_{ij})$, тоді модель процесу функціонування системи задається стохастичним співвідношенням $h = Ax$, де вектор-стовпець x - вхід системи, а вектор-стовпець h - вихід системи.

У другому випадку модель описується лінійним перетворенням вихідного випадкового процесу $x(t)$:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{itw} g(w) dy(w), \quad (4)$$

де $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{itw} dy(w)$ - спектральне розкладання випадкового

процесу $x(t)$; $x(t)$ - вхід системи (випадкова функція часу t); $h(t)$ - вихід системи; $g(w)$ - передатна функція лінійного перетворення $x(t)$ в $h(t)$.

Описання процесу ТЕ ЛА на основі гаусовських і лінійних імовірнісних моделей досить складне. Це обумовлено складністю обґрунтування лінійної залежності між параметрами, що описують процес ТЕ, і показниками його ефективності, а також у знаходженні оператора A лінійного перетворення (передатної функції $g(w)$). Тому за допомогою лінійних і гаусовських імовірнісних моделей можна адекватно описати процес функціонування лише досить обмеженого кола технічних систем, які дозволяють прийняти відповідні даним моделям припущення про імовірнісний характер випадкових процесів, що розглядаються.

При дослідженні функціонування складних технічних систем дуже часто приходиться мати справу з аналізом роботи своєрідних систем, які називаються системами масового обслуговування [11, с. 58...82; 12, с. 238...290]. Відмінною ознакою вирішення задач оцінки ефективності складних технічних систем, які вирішуються методами теорії масового обслуговування, є наявність потоку заявок (вимог), які поступають на обслуговування в спеціальні пристрої, іменовані каналами обслуговування. При цьому моменти часу надходження заявок і час, що витрачається на їх обслуговування, є випадковими величинами, тобто

процеси обслуговування і надходження заявок на обслуговування відносяться до класу марковських процесів. Під дією такого процесу система змінює свій стан, утворюючи в окремому випадку кінцеву (рахункову) множину дискретних станів – дискретний випадковий процес. Характерною задачею теорії масового обслуговування є встановлення залежності між характером потоку заявок, продуктивністю окремих каналів і ефективністю обслуговування.

Основне припущення у даній моделі – потік вимог (заявок) на обслуговування є найпростішим. Але, як відомо, в реальних системах потоки подій не являються пуасонівськими. У цьому випадку описання реальних процесів методами теорії масового обслуговування стає дуже складним і громіздким. Крім того, для дослідження ПТЕ складної технічної системи у вигляді системи масового обслуговування ефективно, коли число станів системи невелике. У протилежному випадку вирішення великої кількості диференціальних або алгебраїчних рівнянь представляє складну задачу.

Дослідження показали, що для реальних стохастичних систем, які змінюють свої стани стрибкоподібно, характерна наявність кінцевого числа можливих переходів, що визначаються кінцевим числом випадкових факторів, які впливають на зміну даного стану системи. Кожний з таких факторів характеризується визначеним випадковим часом впливу, що залежить, як правило, від даного стану системи. У зв'язку з цим, серед стохастичних моделей систем особливо виділяються марковські і напівмарковські системи [8, с. 58...129; 9, с. 64...85; 12, с. 181...237].

Процес функціонування технічної системи S у марковській моделі описується марковським процесом $S(t)$, що може бути представлений у вигляді випадкового процесу з дискретними або безперервними станами, з дискретним або безперервним часом. На практиці для опису процесу функціонування реальних технічних систем, як правило, використовують марковський процес з дискретним фазовим простором станів і безперервним часом [12, с. 185...199]. У цьому випадку передбачається, що система S може знаходитися в кінцевій чи рахунковій множині станів $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$, де N – кількість всіх можливих станів. Процес еволюції системи S полягає в зміні її станів $S(T) = S_n$ за рахунок переходу з одного стану e_i в інше e_j ($i, j \in E$). Марковський процес визначається марковською властивістю, що полягає в незалежності імовірностей переходів системи з даного стану від усієї попередньої еволюції системи до влучення в цей стан і незалежності розподілів тривалостей

перебування в станах q_n від усієї попередньої даному стану еволюції системи:

$$P\{S_{n+1}, q_{n+1} / S_0, q_0; S_1, q_1; \dots; S_n, q_n\} = P\{S_{n+1}, q_{n+1} / S_n, q_n\}, \quad (5)$$

де S_n – стан системи після n -го переходу; q_n – інтервал сталості марковського процесу $S(t)$ (тривалість перебування в стані S_n); n – номер зміни стану системи.

Однак, обмежувальним допущенням у марковській моделі є припущення про те, що тривалості q перебування системи, що моделюється, в будь-якому модельному стані з $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$ мають показовий розподіл:

$$f_q(t) = \begin{cases} l \times e^{-lt}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad (6)$$

де $f_q(t)$ – щільність імовірності величини q ; l – інтенсивність розподілу.

При відносно невеликій кількості станів N марковської системи досить просто одержати кінцеві аналітичні вирази для шуканих характеристик системи, що відображають ефективність її функціонування. Однак, умова експоненціальності законів розподілу часу перебування в модельних станах у практичних задачах ТЕ, що передбачає виконання різних операцій по технічному обслуговуванню і ремонту, виконується рідко. Це пов'язано, насамперед, із наявністю в процесі експлуатації станів планових перевірок і контролів, технічних обслуговувань із регламентованим часом [4, с. 31...100; 6, с. 303...315], а також непуасонівських потоків, що переводять систему зі стану в стан. Тому в рамках марковської імовірнісної моделі не можна адекватно описати реальний процес ТЕ ЛА.

Напівмарковські моделі [8, с. 58...129; 9, с. 79...85], так як і марковські, характеризуються досить ефективним описанням процесу ТЕ складних технічних систем. Але одна їх суттєва відмінність дозволила першим знайти більш широке застосування. Це обумовлено тим, що на відміну від марковських моделей вони не мають обмеження на закон розподілу часу перебування системи в модельованих станах. Ця умова дає можливість описувати за допомогою даної моделі значно більшу частину складних технічних систем, зміна станів яких проходить під дією випадкових факторів. Крім того, для напівмарковських моделей розроблено ефективний математичний апарат.

Узагальнені результати аналізу вибору класу математичної моделі для опису процесу ТЕ ЛА військового призначення представлено у таблиці 1.

Як видно з таблиці, найбільш прийнятним класом математичної моделі для опису процесу ТЕ

ЛА військового призначення є клас напівмарковських моделей.

Відомо, що основною задачею математичного моделювання є отримання імовірнісних характеристик стохастичних моделей. Для цього використовують аналітичні, імітаційні і комбіновані методи моделювання [12, с. 14...16; 13, с. 7...49; 14, с. 76...79, 99...127].

Таблиця 1

Результати аналізу вибору класу математичної моделі для опису процесу ТЕ ЛА військового призначення

Основні вимоги до математичних моделей опису процесу ТЕ ЛА	Класи стохастичних моделей							
	Білеві	Автоматні	Агрегатні	Лінійні	Гаусовські	Система масового обслуговування	Марківські	Напівмарковські
Можливість створення моделі процесу	–	+	+	+	+	+	+	+
Відсутність обмежень на простір станів	–	–	–	–	–	–	+	+
Відсутність обмежень на функцію розподілу часу перебування у станах	–	+	+	–	–	±	–	+
Простота	+	–	–	+	+	±	+	–
Наочність	+	–	–	–	–	–	+	+

Як правило, математична модель у своєму початковому вигляді не може бути використана для аналітичного дослідження процесу. Зокрема, математична модель узагалі може не містити в явному виді шуканих величин. Необхідно перетворити математичну модель у таку систему співвідношень (наприклад, алгебраїчних або диференціальних рівнянь) щодо шуканих величин, що допускає одержання потрібного результату аналітичними методами. Це перетворення є найбільш важким кроком при аналітичному дослідженні процесів. Під одержанням результату тут розуміється побудова явних формул для шуканих величин, або приведення рівнянь до виду для якого рішення відомі. Слід відмітити, що найбільш повне дослідження можна провести в тому випадку, коли отримані явні залежності, які пов'язують шукані величини з параметрами системи і початковими умовами. Але скористатися аналітичним дослідженням вдається досить рідко тому, що перетворення математичної моделі в систему рівнянь, які забезпечують ефективне рішення, є важкою задачею, а особливо для складних

процесів. У зв'язку з цим при вирішенні багатьох прикладних (а іноді і теоретичних) задач ідуть на навмисний відступ від реальної моделі, на її спрощення й огрубіння заради можливості одержати хоча б наближене рішення задачі. При цьому приходиться нехтувати деякими особливостями системи, від чого створена модель вже перестав відповідати своєму основному призначенню – бути засобом вивчення складної системи, що розглядається [8, с. 15...20].

Поряд з аналітичними імітаційні методи є найбільш розповсюдженими засобами теорії управління і дослідження операцій, основною формою системного аналізу в управлінні ефективністю складних систем.

Імітаційне моделювання [13, с. 7...49; 14, с. 99...127] є досить зручним апаратом для дослідження випадкових процесів. Для методу імітаційного моделювання додаткові труднощі (синтез рівнянь щодо невідомих законів розподілу або інших імовірнісних характеристик (середніх значень, дисперсій, кореляційних функцій і т.д.) аналізованих процесів, а також рішенням отриманих рівнянь) виявляються звичайно порівняно легко вирішуваними. Суть даного методу моделювання полягає в реалізації на електронно-обчислювальній машині спеціального алгоритму, який відтворює формалізований процес складної системи.

Алгоритм, що моделюється, дозволяє за вихідними даними, які містять відомості про початковий стан процесу (вхідної інформації) і його параметрах, отримати відомості про стан процесу в довільні моменти часу. Вплив випадкових факторів на протікання процесу імітується за допомогою випадкових чисел із заданими або сформованими в процесі моделювання імовірнісними характеристиками. Однак докладне дослідження випадкового процесу пов'язане з визначеністю статистично стійких середніх характеристик, які вираховуються по великій кількості реалізацій.

Важливою перевагою імітаційного моделювання є можливість фіксації проміжних значень різних показників в процесі імітації подібно тому, як це має місце при виборі даних в процесі експлуатації реальної системи.

Але поряд з відміченими перевагами, імітаційне моделювання, як і будь-який чисельний метод, володіє тим недоліком, що отримане рішення носить приватний характер, відповідаючи фіксованим значенням параметрів системи, вхідної інформації і початкових умов. Не дивлячись на цей досить серйозний недолік, імітаційне моделювання є на сьогоднішній день найбільш ефективним методом дослідження складних систем, а інколи і єдиним практично доступним засобом отримання інформації

про поведінку системи, особливо на стадії проектування заходів для забезпечення її ефективного функціонування, таких як вдосконалення програми технічного обслуговування, вибір варіанта модернізації та ін.

У комбінованому методі робиться спроба об'єднати переваги аналітичного й імітаційного моделювання [12, с. 14...16].

У цьому випадку функціонування деяких підсистем вдається описати аналітично і отримати кінцеві відношення (рівняння), а для решти будуються імітаційні моделі. Однак застосування даного методу для моделювання процесу ТЕ ЛА є досить складним.

Таблиця 2

Результати аналізу вибору методу моделювання для опису процесу ТЕ ЛА військового призначення

Основні вимоги до математичних моделей опису процесу ТЕ ЛА	Методи моделювання		
	Аналітичні	Імітаційні	Комбіновані
Адаптивність	—	+	—
Універсальність	—	±	±
Достовірність	+	±	±
Системність	+	±	±
Контрольованість результатів	±	—	±
Трудомісткість	+	±	±
Простота	—	+	±

Узагальнені результати аналізу вибору методу моделювання для опису процесу ТЕ ЛА військового призначення представлено у таблиці 2.

Як видно з таблиці 2, оптимальним методом моделювання для опису процесу ТЕ ЛА військового призначення є метод імітаційного моделювання.

Висновки

Результати проведеного аналізу свідчать про те, що найбільш прийнятним методом моделювання з погляду відповідності моделей запропонованим до неї вимогам є метод імітаційного моделювання, а найбільш прийнятним класом для створення стохастичної моделі процесу технічної експлуатації ЛА є клас напівмарковських моделей.

Такий підхід дозволить адекватно описати процес ТЕ ЛА військового призначення, а результати, отримані в процесі моделювання, можуть бути використані в якості аргументів під час вибору оптимальних заходів з відновлення справності парку ЛА в сучасних умовах.

Напрями подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на проведення математичного моделювання процесу ТЕ одного із типів ЛА та за вибраними критеріями ефективності оцінити ефективність заходів з відновлення рівня справності і боєготовності ЛА в умовах існуючих обмежень техніко-економічного та іншого характеру.

Список літератури

1. Харченко О.В. Науково-технічне супроводження Державним науково-дослідним інститутом авіації модернізації та підтримання справності авіаційної техніки Збройних Сил України / О.В. Харченко, В.В. Самуєєв // Збірник наукових праць ДНДІА. – 2005. – Вип. 8. – С. 6 – 14.
2. “Про затвердження Порядку експлуатації за технічним станом виробів авіаційної техніки державної авіації, за якими розробник (виробник) не виконує своїх обов’язків із супроводження експлуатації та підтримання льотної придатності”: Наказ Міністерства оборони України від 19.12.2014 року № 904 / Міністерство оборони України. – Офіц. вид. – К.: Вид-во Міністерства оборони України, 2014. – 14 с. – (Бібліотека офіційних видань).
3. “Про затвердження Порядку продовження (збільшення) встановлених показників виробів авіаційної техніки державної авіації, за якою не здійснюється авторський нагляд”: Наказ Міністерства оборони України від 16.02.2015 року № 68 / Міністерство оборони України. – Офіц. вид. – К.: Вид-во Міністерства оборони України, 2015. – 13 с. – (Бібліотека офіційних видань).
4. Смирнов Н. Н., Ицкович А. А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1987. – 271 с.
5. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
6. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высшая школа, 1981. – 400 с.
7. Барзилович Е. Ю., Воскобоев В. Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию: элементы теории. – М.: Транспорт, 1981. – 197 с.
8. Королюк В. С. Стохастические модели систем. – К.: Наукова думка, 1989. – 208 с.
9. Коваленко И. Н. Вероятностный расчет и оптимизация. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
10. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т./ Ред.совет: В.С. Авдеевский /пред./ и др. – М.: Машиностроение, 1988. Т 2: Математические методы в теории надежности и эффективности. / Под ред. Гнеденко Б. В. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.

11. Снапелев Ю.М., Старосельський В.А. Моделирование и управление в сложных системах. – М.: Сов. радио. 1974. – 264с.
12. Вентцель Е. С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1975. – 552 с.
13. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988. - 232 с.
14. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т./ Ред.совет: В.С. Авдеевский /пред./ и др. – М.: Машиностроение, 1988. Т 3: Эффективность технических систем / Под ред. В.Ф. Уткина и Ю.В. Крючкова.. – 319 с.

Надійшла до редколегії 01.11.2022

Схвалена до друку 21.12.2022

Відомості про авторів:

Гришин Володимир Михайлович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3353-7819>

Скляр Олександр Іванович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4776-8821>

Information about the authors:

Volodymyr Grishin

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Leading Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3353-7819>

Oleksandr Sklyar

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4776-8821>

CHOICE OF MODEL CLASS AND METHOD OF MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF TECHNICAL OPERATION OF MILITARY AIRCRAFT

V. Grishin, O. Sklyar

The article analyzes the models and methods of mathematical modeling of the process of technical operation of military aircraft, which would allow the most complete and adequate consideration of the peculiarities of the technical operation of aviation equipment in modern conditions.

Stochastic models, which are widely used to describe the process of technical operation of complex technical systems, the main classes of which are; Boolean, Gaussian, linear, aggregate, automatic, Markov, semi-Markov and mass service systems. Different methods of modeling random processes are used to determine the probabilistic characteristics of stochastic models: analytical, simulation, and combined modeling methods.

In the course of the analysis, the advantages and disadvantages of models and methods of mathematical modeling, which are used to describe the process of operation of complex technical systems, were determined. The choice of models and methods of mathematical modeling of the process of technical operation of military aircraft is proposed to be carried out on the basis of the requirements set for the mathematical models being developed.

Based on the results of the analysis, it was established that the most acceptable modeling method, from the point of view of compliance of the models with the proposed requirements, is the statistical modeling method, and the most appropriate class for creating a stochastic model of the process of technical operation of military aircraft is the class of semi-Markov models.

The selected model and modeling method will allow to adequately describe the process of technical operation of the military aircraft, and the results obtained in the modeling process can be used as decisive arguments when choosing optimal measures to restore the serviceability of the park. aircraft in the conditions of repelling armed aggression.

Keywords: process of technical exploitation, mathematical model, semi-Markov process, stochastic model.