

УДК 656.735(045)

О.А. Тамаргазін, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Розглянуто основні принципи побудови моделі системи технічного обслуговування комплексуючих авіаційної техніки, що експлуатують за станом. Проаналізовано основні характеристики моделі і їх вплив на ймовірність перебування авіаційної техніки у стані готовності до використання.

Характерною рисою сучасних літаків є необхідність повернення їх на технічні майданчики при виникненні відмов у значній частині їхніх систем і агрегатів, великий обсяг підготовчих і заключних операцій при усуненні відмов і наближенні їх до тривалості регламентного технічного обслуговування (РТО). В зв'язку з цим в експлуатації необхідно оцінювати можливість використання комбінованої стратегії проведення РТО. Якщо відмови виникли незадовго до планового терміна проведення РТО, їх усунення необхідно доповнити операціями РТО. Якщо відмови виникли незабаром після РТО, то необхідно провести тільки їх усунення. Якщо відмови до проведення РТО взагалі не виникли, варто провести РТО в плановий термін.

При побудові моделі комбінованої стратегії проведення РТО будемо використовувати такі правила:

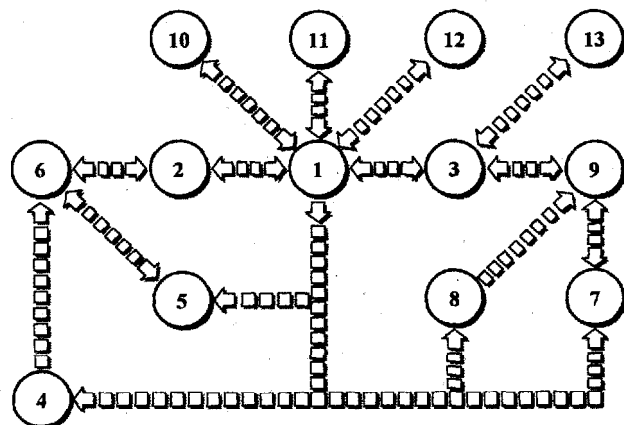
– якщо відмова відбулася і виявлена при періодичному контролі в межах деякого безрегламентного інтервалу $\tau_{\text{бр}} \leq \tau_{\text{мрг}}$, то її усунення не поєднується з РТО, яке проводиться в плановий термін;

– якщо відмова виявлена за межами безрегламентного інтервалу, то роботи з усунення відмови доповнюються до повного обсягу РТО, яке в цьому випадку в плановий термін не проводиться.

Для оцінки доцільності застосування комбінованої стратегії технічного обслуговування (ТО) у вектор X експлуатаційних характеристик вводиться коефіцієнт ξ плановості РТО: $\xi = \tau_{\text{бр}} / \tau_{\text{мрг}}$.

Комплексна модель може бути зображена як орієнтований граф (див. рисунок). Незважаючи на те, що з метою запобігання надмірного розширення числа можливих станів агрегати і системи літака розглядаються як єдине ціле, без врахування резервування (заниження при цьому надійності можна компенсувати еквівалентним перерахуванням параметрів потоку відмов [1; 2]), число станів (табл. 1) моделі досягло 13, а переходів – 26 (табл. 2).

Побудована модель погоджує такі види ТО: безперервний і періодичний контроль (через малу періодичність проведення останній об'єднуємо з безупинним контролем), міжрегламентне ТО, автоматизовані періодичні перевірки (АПП) і РТО, враховує як відмови, так і пошкодження елементів, які контролюються безперервно, при АПП і РТО, що вимагають зниження готовності для їхнього усунення, можливі помилки обслуговуючого персоналу при проведенні АПП і РТО, помилки 1-го і 2-го роду, ускладнені режими роботи елементів в ході проведення АПП і РТО.



Узагальнена комплексна модель системи ТО

Таблиця 1

Можливі стани агрегатів і систем в узагальненій комплексній моделі системи ТО

Код стану	Зміст стану
1	Система (агрегат) знаходиться в готовності до роботи
2	Проводиться РТО системи (агрегату). Готовність знижена
3	Виконуються АПП системи (агрегату). Готовність знижена
4	Система (агрегат) знаходиться в стані прихованого пошкодження з причини пошкодження елементів, які контролюються під час РТО
5	Система (агрегат) знаходиться в стані прихованої відмови з причини втрати працездатності елементів, які контролюються під час РТО
6	Проводиться усунення відмов і пошкоджень під час РТО. Готовність знижена
7	Система (агрегат) знаходиться в стані прихованої відмови з причини втрати працездатності елементів, які контролюються під час АПП. Готовність знижена
8	Система (агрегат) знаходиться в стані прихованого пошкодження з причини пошкодження елементів, які контролюються під час АПП
9	Проводиться усунення відмов і пошкоджень під час АПП. Готовність знижена
10	Проводиться усунення відмов елементів системи (агрегату), які контролюються безперервно. Готовність знижена
11	Проводиться усунення пошкоджень елементів системи (агрегату), які контролюються безперервно. Готовність знижена
12	Проводиться міжрегламентне ТО системи (агрегату). Готовність знижена
13	Система (агрегат) знаходиться в стані помилкової відмови, виконуються ремонтно-відбудовні роботи. Готовність знижена

Таблиця 2

Можливі переходи агрегатів і систем в узагальненій комплексній моделі системи ТО

Код переходу	Характеристика переходу
1-2	Перевід готової до роботи системи (агрегату) на РТО
1-3	Перевід готової до роботи системи (агрегату) на АПП
1-4	Пошкодження, які контролюються під час РТО елементів
1-5	Відмова елементів, які контролюються під час РТО
1-7	Відмова елементів, які контролюються під час АПП
1-10	Відмова елементів, які контролюються безперервно
1-11	Пошкодження елементів, які контролюються безперервно
1-12	Перевід системи (агрегату) на міжрегламентне ТО
2-1	Перевід системи (агрегату) після закінчення РТО в стан готовності до роботи
2-6	Відмова системи (агрегату) в процесі РТО
3-1	Перевід системи (агрегату) після закінчення АПП в стан готовності до роботи
3-9	Відмова системи (агрегату) в процесі АПП
3-13	Помилкова відмова системи (агрегату) в процесі АПП
4-6	Перевід пошкодженої системи (агрегату) на РТО
5-6	Перевід відмовившої системи (агрегату) на РТО
6-2	Усунення відмов і пошкоджень системи (агрегату) в процесі РТО
6-5	Перевід системи (агрегату) в стан прихованої відмови з причини помилкової відмови елементів, які контролюються під час РТО
7-9	Перевід пошкодженої системи (агрегату) на АПП
8-9	Перевід відмовившої системи (агрегату) на АПП
9-3	Перевід системи (агрегату) на підтверджуючу АПП після усунення відмов і пошкоджень
9-7	Перевід системи (агрегату) в стан прихованої відмови із причини помилкового пропуску відмови елементів, які контролюються під час АПП
10-1	Перевід системи (агрегату) в стан готовності після усунення відмов елементів, які контролюються безперервно
11-1	Перевід системи (агрегату) в стан готовності після усунення пошкоджень елементів, які контролюються безперервно
12-1	Перевід системи (агрегату) в стан готовності після міжрегламентного ТО
13-3	Перевід системи (агрегату) на підтверджуючу АПП після ремонтно-відбудовних робіт на помилково відмовившій системі

Умовні інтенсивності переходів s_{ij} в узагальненій комплексній моделі системи ТО визначаються за формулами, наведеними в табл. 3, а система диференціальних рівнянь має такий вигляд:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(s_{1-2} + s_{1-3} + s_{1-4} + s_{1-5} + s_{1-7} + s_{1-8} + s_{1-10} + s_{1-11} + s_{1-12}) P_1(t) + s_{2-1} P_2(t) + s_{3-1} P_3(t) + s_{10-1} P_{10}(t) + s_{11-1} P_{11}(t) + s_{12-1} P_{12}(t);$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = s_{1-2} P_1(t) - (s_{2-1} + s_{2-6}) P_2(t) + s_{6-2} P_6(t);$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = s_{1-3} P_1(t) - (s_{3-1} + s_{3-9} + s_{3-13}) P_3(t) + s_{9-3} P_9(t) + s_{13-3} P_{13}(t);$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = s_{1-4} P_1(t) - s_{4-6} P_4(t);$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = s_{1-5} P_1(t) - s_{5-6} P_5(t) - s_{6-5} P_6(t);$$

$$\frac{dP_6(t)}{dt} = s_{2-6} P_2(t) + s_{4-6} P_4(t) + s_{5-6} P_5(t) - (s_{6-2} + s_{6-5}) P_6(t);$$

$$\frac{dP_7(t)}{dt} = s_{1-7} P_1(t) - s_{7-9} P_7(t) + s_{9-7} P_9(t);$$

$$\frac{dP_8(t)}{dt} = s_{1-8} P_1(t) - s_{8-9} P_8(t);$$

$$\frac{dP_9(t)}{dt} = s_{3-9} P_3(t) + s_{7-9} P_7(t) + s_{8-9} P_8(t) - (s_{9-3} + s_{9-7}) P_9(t);$$

$$\frac{dP_{10}(t)}{dt} = s_{1-10} P_1(t) - s_{10-1} P_{10}(t);$$

$$\frac{dP_{11}(t)}{dt} = s_{1-11} P_1(t) - s_{11-1} P_{11}(t);$$

$$\frac{dP_{12}(t)}{dt} = s_{1-12} P_1(t) - s_{12-1} P_{12}(t);$$

$$\frac{dP_{13}(t)}{dt} = s_{3-13} P_3(t) - s_{13-3} P_{13}(t).$$

Вектор X в узагальненій комплексній моделі системи ТО агрегатів і систем літака включає 21 експлуатаційну характеристику: ω_{pr}^H – параметр потоку пошкоджень елементів системи (агрегату), які контролюються під час РТО; ω_{pr}^0 – параметр потоку відмов елементів системи (агрегату), які контролюються під час РТО; ω_{mn}^H – параметр потоку пошкоджень елементів системи (агрегату), які контролюються під час АПП; ω_{mn}^0 – параметр потоку відмов елементів системи (агрегату), які контролюються під час АПП; $\omega_{непр}^H$ – параметр потоку пошкоджень елементів системи (агрегату), які контролюються безперервно; $\omega_{непр}^0$ – параметр потоку відмов елементів системи (агрегату), які контролюються безперервно; $\omega_{pr}^{вкл}$ – параметр потоку відмов і пошкоджень елементів системи (агрегату) в навантаженому режимі під час РТО; $\omega_{mn}^{вкл}$ – параметр потоку відмов і пошкоджень елементів системи (агрегату) в навантаженому режимі під час АПП; v_1 – інтенсивність помилок ІТС в процесі РТО; v_2 – інтенсивність помилок обслуговуючого персоналу в процесі АПП; α – імовірність помилок 1-го роду; β – імовірність помилок 2-го роду; τ_{pr} – тривалість РТО; τ_{mn} – тривалість АПП;

Таблиця 3

Інтенсивність переходів в узагальненій комплексній моделі системи ТО

Код переходу	Інтенсивність переходу	Код переходу	Інтенсивність переходу
1-2	$\tau_{\text{мрг}}^{-1}$	3-13	$\alpha \tau_{\text{пп}}^{-1}$
1-3	$\tau_{\text{мпн}}^{-1}$	4-6	$\left[\tau_{\text{мрг}} - \omega_{\text{рг}}^{\text{н}^{-1}} \left(1 - e^{-\omega_{\text{рг}}^{\text{н}} \tau_{\text{мрг}}} \right) \right]^{-1}$
1-4	$\omega_{\text{рг}}^{\text{н}} = (1 - \gamma) \omega_{\text{рг}}$	5-6	$\left[\tau_{\text{мрг}} - \omega_{\text{рг}}^{\text{о}^{-1}} \left(1 - e^{-\omega_{\text{рг}}^{\text{о}} \tau_{\text{мрг}}} \right) \right]^{-1}$
1-5	$\omega_{\text{рг}}^{\text{о}} = \gamma \omega_{\text{рг}}, \omega_{\text{рг}} = b_{\text{рг}} \omega_{\Sigma}$	6-2	$(1 - \beta) \tau_{\text{ус}}^{\text{пр}^{-1}}$
1-7	$\omega_{\text{мпн}}^{\text{о}} = \gamma \omega_{\text{мпн}}, \omega_{\text{мпн}} = b_{\text{мпн}} \omega_{\Sigma}$	6-5	$\beta \tau_{\text{ус}}^{\text{пр}^{-1}}$
1-10	$\omega_{\text{непр}}^{\text{н}} = \gamma \omega_{\text{непр}}, \omega_{\text{непр}} = b_{\text{непр}} \omega_{\Sigma}$	7-9	$\left[\tau_{\text{мпн}} - \omega_{\text{мпн}}^{\text{о}^{-1}} \left(1 - e^{-\omega_{\text{мпн}}^{\text{о}} \tau_{\text{мпн}}} \right) \right]^{-1}$
1-8	$\omega_{\text{мпн}}^{\text{н}} = (1 - \gamma) \omega_{\text{мпн}}$	8-9	$\left[\tau_{\text{мпн}} - \omega_{\text{мпн}}^{\text{н}^{-1}} \left(1 - e^{-\omega_{\text{мпн}}^{\text{н}} \tau_{\text{мпн}}} \right) \right]^{-1}$
1-11	$\omega_{\text{непр}}^{\text{н}} = (1 - \gamma) \omega_{\text{непр}}$	9-3	$(1 - \beta) (\tau_{\text{ус}}^{\text{пр}} + \tau_{\text{пп}})^{-1}$
1-12	$\tau_{\text{мро}}^{-1}$	9-7	$\beta \tau_{\text{пп}}^{-1}$
2-1	$\tau_{\text{рг}}^{-1}$	10-1	$(\tau_{\text{ус}}^{\text{непр}})^{-1}$
2-6	$\omega_{\text{рг}}^{\text{вкл}} + \nu_1, \omega_{\text{рг}}^{\text{вкл}} = 10^2 \dots 10^3 \omega_{\text{рг}}$	11-1	$(\tau_{\text{ус}}^{\text{непр}})^{-1}$
3-1	$(1 - \alpha) \tau_{\text{пп}}^{-1}$	12-1	$\tau_{\text{по}}^{-1}$
3-9	$\omega_{\text{мпн}}^{\text{вкл}} + \nu_1, \omega_{\text{мпн}}^{\text{вкл}} = 10^2 \dots 10^3 \omega_{\text{мпн}}$	13-1	$(\tau_{\text{ус}}^{\text{пп}})^{-1}$

$\tau_{\text{по}}$ – тривалість міжрегламентного ТО; $\tau_{\text{мрг}}$ – періодичність проведення РТО; $\tau_{\text{мпн}}$ – періодичність проведення АПП; $\tau_{\text{ус}}^{\text{пр}}$ – тривалість усунення відмов і пошкоджень під час РТО; $\tau_{\text{ус}}^{\text{пп}}$ – тривалість усунення відмов і пошкоджень під час АПП; $\tau_{\text{ус}}^{\text{непр}}$ – тривалість усунення відмов і пошкоджень елементів системи (агрегату), які контролюються безперервно; $\tau_{\text{мро}}$ – періодичність проведення міжрегламентного ТО.

При проведенні параметричного аналізу комплексних моделей систем ТО будемо змінювати тільки декілька змінних при фіксованих значеннях інших змінних, це дозволить виявити вплив основних параметрів систем ТО агрегатів (систем) літака на їхню готовність до роботи і висунути вимоги до організації оцінки цих параметрів в процесі їхньої експлуатації. Крім цього, необхідно оцінити чутливість комплексних моделей до параметрів систем ТО, стійкість показників якості систем ТО до флуктуацій вхідних даних і визначити границі варіювання параметрів при рішенні задач оптимального синтезу системи ТО літака.

З розв'язання системи диференціальних рівнянь видно, що модель чутлива до параметрів системи ТО. Максимум має яскраво виражений характер для $\omega_{\Sigma} = 10^{-5} \text{ г}^{-1}$ при періодичності $\tau_{\text{мрг}}$ РТО 0,8...1,4 р., для $10^{-7} \text{ г}^{-1} < \omega_{\Sigma} < 10^{-5} \text{ г}^{-1}$ максимум вже більш розмитий і досягається при $\tau_{\text{мрг}} = 1,5 \dots 3,0$ р., а для $\omega_{\Sigma} \leq 10^{-7} \text{ г}^{-1}$ імовірність P_1 при $\tau_{\text{мрг}} > 3,0$ р. стабілізується на одному рівні. Це вказує як на взаємозв'язок між параметрами надійності агрегатів (систем) і параметрами ТО, так і на необхідність організації якісного збору, обліку і обробки статистичних даних з надійності авіаційної техніки в процесі експлуатації.

Визначеному рівню надійності ω_{Σ} відповідає визначена періодичність РТО, що забезпечує максимум P_1 , при цьому зменшення ω_{Σ} призводить до зсуву вправо максимуму P_1 .

При збільшенні повного обсягу ТО в процесі експлуатації ймовірність P_1 зростає. Так, якщо частка відмов і пошкоджень, виявлених при РТО, складає 60% ($b_{\text{пр}} = 0,6$) від сумарного параметра потоку відмов і пошкоджень ω_{Σ} , виявлених під час АПП – 30% ($b_{\text{пп}} = 0,3$) і виявлених під час безперервного контролю – 10% ($b_{\text{непр}} = 0,1$), максимальне значення P_1 при $\omega_{\Sigma} = 10^{-5} \text{ г}^{-1}$ дорівнює 0,914. При збільшенні обсягу АПП у порівнянні із РТО ($b_{\text{пр}} = 0,3$; $b_{\text{пп}} = 0,6$; $b_{\text{непр}} = 0,1$) максимальне значення P_1 зростає на 11% і дорівнює 0,927. Ще більшого збільшення P_1 можна було б досягти переносом основного обсягу перевірок на безперервний контроль ($b_{\text{пр}} = 0,1$; $b_{\text{пп}} = 0,3$; $b_{\text{непр}} = 0,6$). При зменшенні ω_{Σ} характер залежності не змінюється. Проте приріст P_1 стає менш помітним. Для забезпечення вірогідності оцінки достатності повного обсягу різних видів ТО необхідно при обробці статистики з відмов і пошкоджень елементів агрегатів і систем літака визначати, при якому виді ТО контролюються ці елементи в процесі експлуатації.

Розглянемо вплив тривалості технологічних експлуатаційних процесів на ймовірність P_1 . Найбільш суттєве зменшення максимального значення P_1 при збільшенні $\tau_{\text{пр}}$ із 100 до 250 г для низької надійності ($\omega_{\Sigma} \geq 10^{-5} \text{ г}^{-1}$) – на 2 % і більше, при цьому максимум P_1 зсувається вправо з 0,5...1,0 до 1,5 р. Для $\omega_{\Sigma} = 10^{-6} \text{ г}^{-1}$ зменшення P_1 складає 1 %, а максимум P_1 зсувається зо 2 до 4 р. Це ще раз підкреслює необхідність в експлуатації пошук шляхів скорочення тривалості РТО і одержання її достовірної оцінки.

Комплексна модель системи ТО чутлива до тривалостей усунення відмов і пошкоджень елементів, які контролюються безперервно, при АПП і РТО на відміну від елементарних моделей систем ТО. Розрахунки показують, що зменшення середніх тривалостей усунення відмов і пошкоджень в шість разів призводить до збільшення ймовірності P_1 для $\omega_{\Sigma} = 10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ г}^{-1}$ на 6...7 %.

Зі зменшенням середніх термінів технологічних процесів ймовірність P_1 для $\omega_{\Sigma} = 10^{-5} \text{ г}^{-1}$ при $\tau_{\text{мрг}} < 2$ р. є більшою, ніж у авіаційної техніки з надійністю на два порядки вище ($\omega_{\Sigma} = 10^{-7} \text{ г}^{-1}$), а при $\tau_{\text{мрг}} < 3$ р. – більшою, ніж у тих що надійність на один порядок вище $\omega_{\Sigma} = 10^{-6} \text{ г}^{-1}$.

І хоча це зменшення термінів дуже мало впливає на ймовірність перебування P_4 авіаційної техніки в стані усунення відмов і пошкоджень під час РТО, усунення P_7 при АПП і усунення P_8 за результатами безперервного контролю при параметрах системи ТО, які забезпечують максимальне значення ймовірності P_1 , помітно збільшується зайнятість обслуговуючого персоналу при усуненні відмов і пошкоджень. Наприклад, при $\omega_{\Sigma} = 10^{-5} \text{ г}^{-1}$ ймовірність перебування літака на усуненні відмов і пошкоджень $P_{E_{4,7,8}} = 0,00129$, а середня зайнятості обслуговуючого персоналу на усуненні дорівнює 14,7 діб за 1 р. на 10 літаків, в той час як при зменшенні термінів усунення в 2 рази ймовірність $P_{E_{4,7,8}}$ збільшується в чотири рази і відповідно завантаження обслуговуючого персоналу – до 29,4 діб за 1 р.

Таким чином, збір статистичних даних про терміни усунення відмов і пошкоджень дозволяє оцінити не тільки ремонтпридатність авіаційної техніки, його показники надійності, але і завантаження і чисельність обслуговуючого персоналу, необхідного для проведення цих робіт.

Список літератури

1. Епифанов А.Д. Надежность систем управления. – М.: Машиностроение, 1975. – 180 с.
2. Подовко А.М. Основы теории надежности. – М.: Наука, 1964. – 446 с.

Стаття надійшла до редакції 15.10.01.