

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗЛЬОТУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА У СКЛАДНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

Розроблена математична модель встановлює кількісну залежність між надійністю світлосигнальної системи аеродрома та рівнем безпеки польотів на етапі зльоту повітряного судна у складних метеорологічних умовах та пропонується бути прийнята за основу для оцінки і нормування показників надійності світлосигнальної системи аеродрома.

Постановка проблеми. На етапі візуального пілотування повітряного судна (ПС) у складних метеорологічних умовах (СМУ) одною з найголовніших наземних систем, які безпосередньо беруть участь у забезпеченні етапів посадки та зльоту є світлосигнальна система аеродрому (ССА).

У СМУ на етапі зльоту ССА є єдиним джерелом візуальної інформації для пілота ПС, адже зліт виконується тільки візуально за допомогою вогнів ССА. Надійне функціонування наземних візуальних засобів забезпечення зльоту гарантує забезпечення нормованого рівня безпеки польотів.

Для оцінки впливу надійності ССА на рівень безпеки польотів під час зльоту ПС у СМУ необхідно мати математичну модель, яка встановлює залежність між показниками надійності підсистем ССА, які безпосередньо приймають участь у процесі зльоту ПС і ймовірністю виникнення особливої ситуації на цьому етапі.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження щодо математичного моделювання процесу взаємодії екіпажу ПС у СМУ під час посадки, опубліковані в [1], [2] надають можливість проводити об'єктивну оцінку впливу показників надійності ССА на рівень безпеки польотів на всіх етапах її життєвого циклу. Розроблена в [1] і пізніше вдосконалена математична модель може бути прийнята за основу для нормування показників надійності ССА та її підсистем. Недоліком даної математичної моделі є те, що вона не враховує такого етапу візуального пілотування, як зліт, тому є неповною і має обмежене коло застосування.

Основною метою статті є розробка математичної моделі зльоту ПС у СМУ, яка встановлює співвідношення між показниками надійності підсистем ССА, які беруть участь у процесі зльоту, і ймовірністю виникнення особливої ситуації на борту ПС під час зльоту. Дана модель в купі з математичною моделлю посадки ПС складе завершену модель етапу візуального пілотування і знайде широке коло використання для оцінки впливу показників надійності ССА на рівень безпеки польотів у СМУ на всіх етапах візуального пілотування та для нормування показників надійності як ССА в цілому, так і окремих її підсистем.

Виклад основного матеріалу. Зліт ПС у СМУ є досить складним етапом польоту, адже пілот має покладатися тільки на візуальну інформацію, яку він отримує наземних візуальних засобів – вогнів ССА.

Етап зльоту ПС може бути умовно поділений на дві складові:

- руління ПС від місця стоянки до виконавчого старту;
- розбіг ПС по злітно-посадковій смугі (ЗПС) від виконавчого старту до місця відриву ПС від злітної смуги (землі).

Для успішного здійснення зльоту ПС у СМУ необхідно, щоб екіпаж застиг ССА у працездатному стані, і щоб цей стан зберігався протягом зльоту.

Етап зльоту ПС забезпечують не всі підсистеми ССА, а тільки три з них: підсистема руліжних доріжок та знаків (РДЗ), підсистема бічних вогнів ЗПС (БВЗПС) та підсистема осьових вогнів ЗПС (ОВЗПС) (для ССА II та III категорій посадкових мінімумів). У лівій частині таблиці наведено можливі стани підсистем ССА у певні проміжки часу – підсистем РДЗ, осьових і бокових вогнів ЗПС, що беруть участь у забезпеченні

етапу зльоту ПС, а в правій частині таблиці (останній стовпчик) вказано ймовірності виникнення особливої ситуації, яка формується в залежності від сполучень станів ССА. У таблиці введено наступні позначення:

$Q_{РДЗ}(t)$, $Q_{РДЗ}(t_p)$ – імовірності відмови підсистеми РДЗ за час між двома технічними обслуговуваннями t та за час руління ПС t_p відповідно;

$Q_{САК\ РДЗ}(t)$, $Q_{САК}(t)$ – імовірності відмови систем автоматичного контролю (САК) технічного стану РДЗ та вогнів ЗПС за час t відповідно;

$Q_{ССА}(t_{вп})$ – імовірність відмови ССА за час візуального пілотування $t_{вп}$;

$Q_{ОВ}(t)$, $Q_{БВ}(t)$ – імовірності відмов підсистем осьових і бічних вогнів ЗПС за час t ;

$Q_{ОС}(t)$ – імовірність виникнення особливої ситуації з причини відмови ССА на етапі зльоту ПС у СМУ.

Перераховані вище величини є показниками надійності – ймовірностями відмови різних підсистем ССА за певний проміжок часу.

Тривалість часу руління ПС t_p складає в середньому 5 хвилин, часу візуального пілотування $t_{вп}$ (розбіг ПС від виконавчого старту до точки відриву ПС від землі) в середньому складає близько 20 секунд, а час t , за який розглядається відмова осьових і бічних вогнів ЗПС є часом між двома технічними обслуговуваннями ССА і складає 12 годин.

Стани підсистем ССА та їх вплив на рівень безпеки польотів

| Відмови підсистем ССА | | | | | | | Особлива ситуація |
|-----------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|--------------|-------------------|
| $Q_{РДЗ}(t)$ | $Q_{САК\ РДЗ}(t)$ | $Q_{РДЗ}(t_p)$ | $Q_{ССА}(t_{вп})$ | $Q_{ОВ}(t)$ | $Q_{БВ}(t)$ | $Q_{САК}(t)$ | $Q_{ОС}(t)$ |
| – | – | – | – | | – | | – |
| + | – | «« | «« | | «« | | – |
| + | + | «« | «« | | «« | | + |
| – | – | + | «« | | «« | | + |
| | – | | + | | – | | + |
| | – | | – | +/- | -/+ | «« | – |
| | – | | – | + | + | + | + |

Примітка: знак «+» означає, що відмова відбулася; «–» – відмова не відбулася; ««» – відмова не розглядається.

Розглянемо докладніше всі можливі стани підсистем ССА (див. таблицю) та проаналізуємо їх вплив на рівень безпеки польотів.

1. Всі підсистеми ССА, що забезпечують етап зльоту знаходяться у працездатному стані – ПС здійснює успішний зліт. Імовірність виникнення особливої ситуації $Q_{ОС}(t)$ дорівнює нулю.

2. За час між двома перевірками технічного стану ССА ($t = 12$ годин) відбулася відмова підсистеми РДЗ, але САК технічного стану РДЗ знаходяться у працездатному стані. Факт відмови фіксується одразу і технічний персонал має можливість відновити працездатний стан ССА. Імовірність виникнення особливої ситуації в цьому випадку також дорівнює нулю, а інші відмови ССА не розглядаються, так як зліт ПС не відбувається.

3. За час між двома перевірками технічного стану ССА відбулася відмова підсистеми РДЗ разом із відмовою САК технічного стану РДЗ (або при їх відсутності). Факт відмови одразу не фіксується і ССА переходить до стану «відмова – немає інформації про відмову». В цьому випадку з'являється імовірність виникнення особливої ситуації.

4. За умови великої інтенсивності польотів відмова підсистеми РДЗ під час руління ПС від місця паркування до виконавчого старту у СМУ може привести до дезорієнтації пілотів ПС та стати причиною виникнення особливої ситуації.

5. У випадку, якщо пілот ПС застав ССА у працездатному стані він починає розбіг по ЗПС. При відмові ССА за час розбігу тобто за час візуального пілотування $t_{вп}$, пілот може втрати орієнтацію. У цьому випадку він може продовжити або перервати

зліт, але в кожному разі є загроза успішному завершенню зльоту – виникає особлива ситуація.

6. Можна вважати, що під час зльоту ПС підсистеми осьових та бічних вогнів ЗПС резервують одна одну, тобто ці підсистеми з точки зору надійності з'єднані паралельно. Тому відмова одної з підсистем вогнів ЗПС за умови працездатного стану іншої не приводить до виникнення особливої ситуації під час зльоту (при цьому САК можуть знаходитися у будь-якому стані).

7. Після отримання дозволу на зліт, ПС починає розбіг, але ССА може знаходитися у стані «відмова, немає інформацію про відмову» (через відмову підсистеми осьових $Q_{ОВЗПС}(t)$ та бокових вогнів ЗПС $Q_{БВЗПС}(t)$ разом з відмовою САК аеродромних вогнів $Q_{САК}(t)$). Вогні, що відмовили в обох підсистемах можуть бути зосереджені на відстані більшої, ніж дальність видимості на ЗПС, тому пілот вважає, що ССА працездатна. Він може зрозуміти, що ССА перебуває у стані відмови після початку розбігу, після чого або продовжити, або перервати зліт, але в кожному з цих випадків виникає особлива ситуація, так як в разі екстреного гальмування є загроза викочування ПС за межі ЗПС.

На підставі проведеного аналізу таблиці створено математичну модель зльоту ПС у СМУ, яка враховує всі ситуації, що впливають на рівень безпеки польотів.

$$Q_{OC}(t) = [Q_{РДЗ}(t_p) + Q_{РДЗ}(t)Q_{САКРД}(t)]M'_{СМУ} + [P_{РДЗ}(t_p)K_{ГССА}(t)Q_{ССА}(t_{вп}) + P_{РДЗ}(t_p)Q_{БВЗПС}(t)Q_{ОВЗПС}(t)Q_{САК}(t)K]M_{СМУ}, \quad (1)$$

де $P(t)$, $Q(t)$ – відповідно імовірності безвідмовної роботи та відмови певних підсистем ССА за певний проміжок часу;

$K_{ГССА}(t)$ – нестационарний коефіцієнт готовності ССА (у складі ССА враховуються тільки ті підсистеми, що беруть участь у процесі зльоту);

$M'_{СМУ}$, $M_{СМУ}$ – інтенсивності зльотів і посадок та тільки зльотів у СМУ відповідно;

K – коефіцієнт, що враховує розподілення відмов вогнів впродовж осі ЗПС.

Чотири доданки формули (1) описують чотири випадки виникнення особливої ситуації на борту ПС під час зльоту. Перший доданок (у перших дужках) характеризує випадок відмови підсистеми РДЗ під час руління ПС від місця стоянки до виконавчого старту. Другий доданок (також у перших дужках) характеризує випадок «відмова підсистеми РДЗ – немає інформацію про відмову», тобто імовірність відмови підсистеми РДЗ разом із відмовою САК РДЗ за час між двома технічними обслуговуваннями ССА. Обидва випадки розглядаються за умови високої інтенсивності повітряного руху в зоні аеродрому ($M'_{СМУ} \geq 10^{-3}$), в тому числі і у СМУ. Якщо ж інтенсивність повітряного руху не висока ($M'_{СМУ} < 10^{-3}$) величиною у перших дужках можна знехтувати. Інтенсивність зльотів і посадок у СМУ $M'_{СМУ}$ знаходиться як відношення сумарної кількості зльотів і посадок у СМУ до загальної кількості зльотів і посадок для конкретного аеродрому за певний час.

$$M'_{СМУ} = \frac{N_{СМУз} + N_{СМУп}}{N_з + N_п} \quad (2)$$

де $N_{СМУз}$, $N_{СМУп}$ – кількість зльотів і посадок у СМУ за певний проміжок часу;

$N_з$, $N_п$ – загальна кількість зльотів і посадок за певний час на даному аеродромі.

Статистичні дані про кількість зльотів і посадок ПС на даному аеродромі надаються метеорологічною службою аеропорту.

Третій доданок (перший вираз у других дужках) характеризує випадок відмови ССА за час візуального пілотування. У складі ССА розглядаються тільки підсистеми осьових та бічних вогнів ЗПС, так як тільки вони є візуальними засобами, що приймають участь в процесі зльоту ПС у СМУ.

Останній – четвертий доданок описує випадок відмови аеродромних вогнів ЗПС разом із САК їх технічного стану – ССА знаходиться у випадку «відмова – немає інформації про відмову».

Третій та четвертий випадки розглядаються за умови СМУ, що враховується коефіцієнтом, який характеризує інтенсивність зльотів у СМУ. Інтенсивність зльотів у СМУ $M_{\text{СМУ}}$ знаходиться як відношення середньої кількості зльотів у СМУ до загальної кількості зльотів в зоні аеродрому за певний період:

$$M_{\text{СМУ}} = \frac{N_{\text{СМУз}}}{N_3} \quad (3)$$

Коефіцієнт K , на який помножується четвертий доданок враховує розташування вогнів, що відмови впродовж осі ЗПС. Розглядається саме той випадок, коли аеродромні вогнів, що відмовили зосереджені поза зоною видимості пілота ПС, і він приймає рішення про виконання зльоту з впевненістю, що підсистеми вогнів ЗПС знаходяться у працездатному стані.

Значення коефіцієнту K розраховується із припущення, що відмови аеродромних вогнів розташовується рівномірно впродовж ЗПС. Тобто, ймовірність виникнення відмови аеродромного вогню на кожній ділянці ЗПС є однаковою. Для прийняття рішення про виконання зльоту, пілот повинен бачити 3 бічних вогні ЗПС (відстань між ними 60 метрів). Дальність видимості на ЗПС в умовах мінімуму II категорії – 200 метрів. При довжині ЗПС 3км значення K буде дорівнювати 0,93 (враховуються непрацездатні вогні на ділянці 200 – 3000 метрів від торця ЗПС).

Коефіцієнти $M'_{\text{СМУ}}$ та $M_{\text{СМУ}}$ розраховуються на підставі статистичних даних за певний час, тому є статистичними оцінками і мають випадковий характер. Для перетворення цих статистичних випадкових величин у імовірнісні величини для кожної з них визначається довірчий інтервал, який покриває відповідну випадкову величину з заданим рівнем точності та достовірності.

Складена математична модель зльоту ПС у СМУ має наступні обмеження.

1. Вважається, що стан САК аеродромних вогнів без відмови підсистеми аеродромних вогнів не впливає на рівень безпеки польотів.
2. При відмові підсистеми РДЗ за час t вважається, що відмови вогнів згруповані поза зоною видимості пілота на даній ділянці руліжних доріжок, інакше пілот має інформацію про відмову підсистеми і не починає зліт.
3. Вважається, що відмова підсистеми РДЗ може привести до виникнення особливої ситуації за умови високої інтенсивності повітряного руху в зоні аеродрому – один зліт або посадка ПС за 5 хвилин.

Висновки. Вираз (1) являє собою закінчену математичну модель зльоту ПС у СМУ. Розроблена математична модель враховує всі ситуації, пов'язані з відмовами підсистем ССА, які можуть виникнути під час зльоту ПС у СМУ.

Математична модель зльоту ПС у СМУ встановлює однозначне аналітичне співвідношення між показниками надійності підсистем ССА, що безпосередньо приймають участь у процесі зльоту і рівнем безпеки польотів ПС під час зльоту.

Дана математична модель може бути застосована для нормування показників надійності підсистем ССА для функції зльоту.

Список літератури

1. Дев'яткіна С.С. Визначення надійності світлосигнальних систем аеродромів на етапах проектування, сертифікації та експлуатації: Дис. канд. техн. наук: 05.22.20. – К., 2003. – 146 с.
2. Азарсков В.М., Дев'яткіна С.С. Кількісний аналіз впливу надійності світлосигнальної системи аеродрому на безпеку польотів // Вісник центрального наукового центру транспортної академії наук України. – 2002. – №5. – С. 48-50.
3. Руководство по проектированию аэродромов (Дос 9157-AN/901). Часть четвертая. Визуальные средства. 2-е изд. 1983 г. – ИКАО – 170 с.