

УДК 629.7.083

В.А. Храмченко¹ к.т.н.
С.О. Пустовий² к.т.н.
П.М. Яблонський³ к.т.н.
О.І.Скляр¹

ФОРМАЛІЗОВАНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ РІЗНИХ СТРАТЕГІЙ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

¹Державний науково-дослідний інститут авіації, e-mail: dndia@ukr.net

²Товариство з обмеженою відповідальністю "Котрис", e-mail: kotris@kotris.com.ua

³Національний університет оборони України

Розроблено графічні моделі станів і переходів процесу технічної експлуатації елемента літального апарату (ЕЛА) для трьох стратегій технічного обслуговування (ТО), які враховують особливості системи експлуатації існуючих зразків літальних апаратів військового призначення.

Ключові слова: елемент літального апарату, процес технічної експлуатації, стратегія технічного обслуговування, формалізована модель, технічний стан, граф станів та переходів.

Вступ

Наразі основу бойового складу авіації Повітряних Сил Збройних Сил України (ПС ЗС України) становлять літаки 3-го і 4-го поколінь випуску середини та кінця 80-х років, витрати на експлуатацію яких зростають. В умовах обмеженого фінансування авіації ПС ЗС України особливу актуальність набуває питання забезпечення належного рівня бойової ефективності і безпеки польотів літальних апаратів на прогнозований період часу з мінімальними витратами.

Одним із шляхів розв'язання цього завдання є формування оптимальних режимів ТО елементів літального апарату військового призначення, який експлуатують за технічним станом. Під ЕЛА слід розуміти агрегати (вузли) планера та систем літального апарату, блоки і модулі бортового обладнання, інші конструктивно закінчені елементи (складові частини) систем і конструкції, які мають індивідуальну потребу у ТО та ремонті. Режимом ТО прийнято називати умови виконання ТО, які включають обсяг і періодичність проведення робіт на об'єкті [1]. Оптимальним режимом ТО ЕЛА військового призначення слід вважати такий режим, який забезпечує необхідний рівень безвідмовності та технічного використання за призначенням ЕЛА при мінімальних витратах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Формування оптимальних режимів ТО полягає у встановленні обсягу робіт для ЕЛА та визначенні періодичності їх проведення на основі поєднання методів технічної експлуатації і стратегій технічного обслуговування [2, 3].

Згідно із [1-3], під методом технічної експлуатації (МТЕ) розуміється сукупність правил вибору критерію граничного стану об'єкта. Стратегія технічного обслуговування (СТО) – це система принципів організації і проведення ТО [3, 4], тобто СТО визначає принцип (правило) призначення обсягів ТО ЕЛА та періодичності їх виконання. Аналіз літератури [2,3] показує, що визначальним під час формування оптимальних режимів ТО для ЕЛА є не МТЕ, а СТО.

Питанню формування режимів ТО виробів авіаційної техніки присвячено ряд робіт, наприклад [2, 5-7]. Проте, в даних роботах залишилося невирішеним питання формування оптимальних режимів ТО ЕЛА для трьох стратегій ТО (за напрацюванням; з контролем рівня надійності; з контролем параметрів) за умови комплексного врахування таких характеристик існуючої системи експлуатації літального апарату (ЛА) як: достовірність контролю технічного стану ЕЛА; інтенсивність використання ЛА за призначенням; періодичність проведення ТО ЕЛА.

Постановка завдання

Наукове завдання полягає у розробці графів станів та можливих переходів, які враховують особливості системи експлуатації ЛА військового призначення, з метою отримання формалізованого опису процесу технічної експлуатації (ПТЕ) ЕЛА для трьох стратегій ТО.

Вирішення завдання

1. Стратегія технічного обслуговування за напрацюванням

Характерною рисою даної стратегії є проведення профілактичного обслуговування ЕЛА незалежно від його фактичного технічного стану через невідомий час T . Час проведення профілактичного обслуговування t_{Σ} включає час контролю технічного стану ЕЛА (візуальний контроль без застосування та із застосуванням інструментальних засобів) t_K і час проведення профілактичних робіт $t_{ПР, РОБ}$. При виникненні у процесі експлуатації ЕЛА явних відмов (самопроявлення відмов) у випадковий момент τ виконується військовий ремонт (відновлення працездатності) виробу протягом часу $t_{В, РЕМ}$. У разі виявлення у випадковий час $\gamma_{ПР}$ прихованих відмов ЕЛА під час проведення профілактичного обслуговування також виконується військовий ремонт виробу. Описаний СТО відповідає граф фізичних (досліджуваних) станів та переходів, представлений на рис.1.

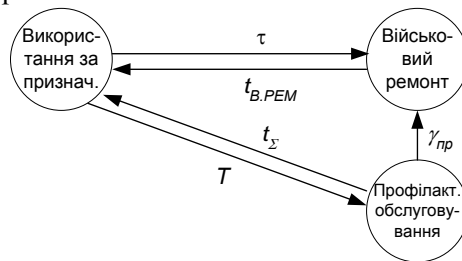


Рис. 1. Стохастичний граф фізичних станів та можливих переходів для СТО ЕЛА за напрацюванням

Очевидно, що для адекватного та однозначного опису СТО ЕЛА за напрацюванням необхідно розширити граф фізичних станів до фазових шляхом врахування такої додаткової фазової координати як “відмова (втрата працездатності) ЕЛА”. Що стосується фазової координати “справність ЕЛА”, то її врахування у даній моделі недоцільно, тому що, як зазначалося вище, при застосуванні стратегії ТО за напрацюванням профілактичне обслуговування проводиться незалежно від його реальної необхідності.

На підставі графу фізичних станів (рис.1) і з урахуванням обґрунтованого у [8] математичного апарату напівмарковських випадкових процесів для опису ПТЕ ЕЛА побудовано граф фазових станів (рис.2). У дужках на графі для кожного стану вказано значення врахованої фазової координати, що означає: 0 – працездатний виріб; 1 – непрацездатний виріб.

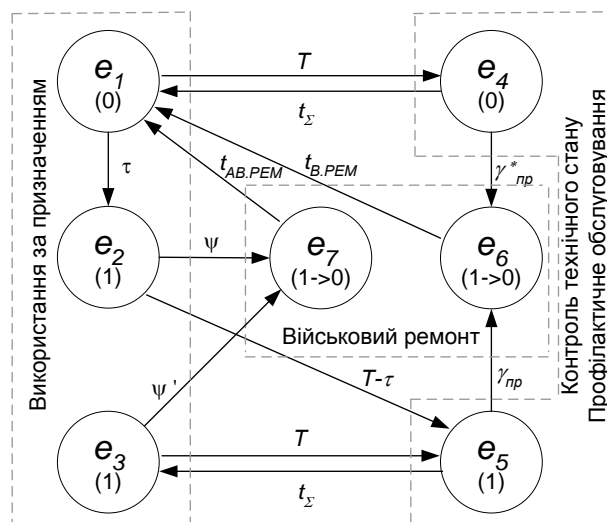


Рис.2. Стохастичний граф фазових станів та можливих переходів для СТО ЕЛА за напрацюванням

Найменування станів побудованого графу:

стан e_1 – використання працездатного ЕЛА за призначенням;

стани e_2, e_3 – наявність прихованої відмови ЕЛА. Стани e_2 та e_3 відрізняються тим, що перехід у стан прихованої відмови e_2 здійснюється із працездатного стану e_1 через випадковий час τ (момент відмови) (перехід $e_1 \rightarrow e_2$), а перехід у стан прихованої відмови e_3 здійснюється із

стану проведення контролю технічного стану та профілактичних робіт на непрацездатному ЕЛА e_5 через невідповідний час T (перехід $e_5 \rightarrow e_3$). Перехід $e_1 \rightarrow e_2$ характеризує надійність ЕЛА, а перехід $e_5 \rightarrow e_3$ – достовірність контролю технічного стану ЕЛА;

стану e_4 , e_5 – проведення контролю технічного стану і профілактичних робіт на працездатному та непрацездатному ЕЛА відповідно;

стану e_6 , e_7 – виконання військового ремонту ЕЛА після виявлення відмови на землі та у польоті відповідно.

Важливою особливістю під час побудови графу фазових станів, як для СТО за напрацюванням, так і для стратегій ТО з контролем рівня надійності та з контролем параметрів є урахування проведення аварійних та профілактичних ремонтів за час $t_{\text{АВ.РЕМ}}$ і $t_{\text{ПР.РЕМ}}$ відповідно. Як відомо із досвіду експлуатації АТ, відмова ЕЛА під час використання літака за призначенням приводить до більш суттєвих матеріальних збитків, ніж при її виявленні, наприклад, на землі, під час проведення контролю технічного стану.

Для СТО за напрацюванням переходи у стан аварійного ремонту e_7 ($e_2 \rightarrow e_7$, $e_3 \rightarrow e_7$) відповідають самопроявленню відмови в польоті у випадкові моменти Ψ та Ψ^* відповідно з імовірністю самопроявлення ρ . Перехід у стан профілактичного ремонту e_6 ($e_5 \rightarrow e_6$) відповідає виявленню прихованої відмови у випадковий момент $\gamma_{\text{ПР}}$ під час проведення чергового контролю технічного стану та профілактичних робіт на ЕЛА.

У загальному випадку час аварійного $t_{\text{АВ.РЕМ}}$ та профілактичного $t_{\text{ПР.РЕМ}}$ ремонтів, а також їх відповідні вартості $C_{\text{АВ.РЕМ}}$ та $C_{\text{ПР.РЕМ}}$ відрізняються. Якщо при виконанні практичних розрахунків зазначений факт не враховується, то достатньо прийняти $t_{\text{АВ.РЕМ}} = t_{\text{ПР.РЕМ}} = t_{\text{В.РЕМ}}$, $C_{\text{АВ.РЕМ}} = C_{\text{ПР.РЕМ}} = C_{\text{В.РЕМ}}$.

Як відомо, виконання профілактичного обслуговування ЕЛА супроводжується контролем його технічного стану протягом часу $t_{\text{К}}$. При цьому можливі так звані помилки першого та другого роду. Помилка першого роду відповідає виникненню у випадковий момент $\gamma_{\text{ПР}}^*$ хибної відмови з заданою імовірністю $1 - d_{\text{П}}$ – (перехід $e_4 \rightarrow e_6$), де $d_{\text{П}}$ – імовірність правильного визначення працездатного стану ЕЛА. Помилка другого роду відповідає пропуску відмови ЕЛА з імовірністю $1 - d_{\text{НП}}$ – (перехід $e_5 \rightarrow e_3$), де $d_{\text{НП}}$ – імовірність правильного визначення непрацездатного стану ЕЛА.

2. Стратегія технічного обслуговування з контролем рівня надійності

Відомо [2], що при СТО з контролем рівня надійності проводиться періодичний контроль працездатності ЕЛА і рівня надійності парку однотипних виробів. Плановим для цієї СТО є контроль технічного стану (перевірки працездатності) ЕЛА протягом часу $t_{\text{К}}$ через визначені інтервали часу T . При виникненні у процесі експлуатації ЕЛА явних відмов (самопроявлення відмов) у випадковий момент τ виконується військовий ремонт (відновлення працездатності) виробу протягом часу $t_{\text{В.РЕМ}}$. У разі виявлення у випадковий час $\gamma_{\text{К}}$ прихованих відмов виробу під час контролю працездатності $t_{\text{К}}$ також виконується військовий ремонт виробу. Описаний СТО відповідає граф фізичних станів та переходів, зображений на рис.3.

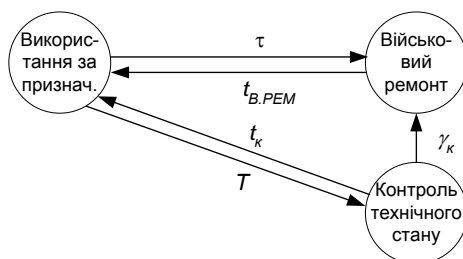


Рис.3. Стохастичний граф фізичних станів та можливих переходів для СТО ЕЛА з контролем рівня надійності

Очевидно, що як і при СТО за напрацюванням, додатковою фазовою координатою є відмова (втрата працездатності ЕЛА). У зв'язку з цим граф фазових станів для даної стратегії (рис.4) буде мати вигляд, аналогічний представленому на рис.2.

На відміну від графа фазових станів, представленого на рис.2, стани e_4 , e_5 (рис.4) відповідають проведенню за час $t_{\text{К}}$ контролю технічного стану працездатного та непрацездатного ЕЛА відповідно. При цьому $t_{\text{К}} < t_{\text{В.РЕМ}}$ ($t_{\text{АВ.РЕМ}}$, $t_{\text{ПР.РЕМ}}$), а вартість контролю $C_{\text{К}}$ менше вартості військового ремонту $C_{\text{В.РЕМ}}$.

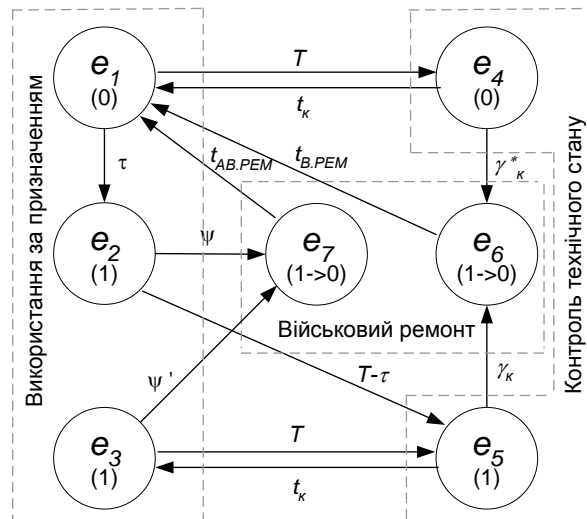


Рис. 4. Стохастичний граф фазових станів та можливих переходів для СТО ЕЛА з контролем рівня надійності

3. Стратегія технічного обслуговування з контролем параметрів

Необхідною умовою застосування даної СТО є впровадження в експлуатацію АТ сучасних бортових, наземних або наземно-бортових систем контролю та діагностування з високою достовірністю. Описаній СТО відповідає граф фізичних станів та переходів, який представлено на рис.5.

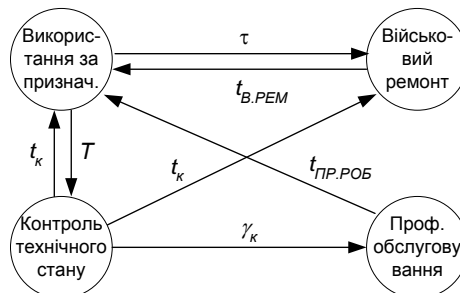


Рис. 5. Стохастичний граф фізичних станів та можливих переходів для СТО ЕЛА з контролем параметрів

На відміну від вище розглянутих стратегій, СТО з контролем параметрів передбачає поглиблений періодичний контроль технічного стану ЕЛА за час t_K через визначені інтервали часу T . При цьому роботи з відновлення справності ЕЛА (профілактичні роботи) протягом часу $t_{PP.POB}$ проводяться тільки у випадку їх реальної необхідності за результатами чергового контролю, тобто роботи проводяться на працездатному ЕЛА з метою переведення його у справний стан.

Відновлення працездатності ЕЛА (військовий ремонт) за час $t_{B.PEM}$ здійснюється при самопроявленні відмови, яка може виникнути у випадковий момент τ у польоті, або у разі її виявлення у випадковий момент часу γ_k при черговому контролі технічного стану. У даному випадку на ЕЛА виконуються відновлювальні роботи, тобто роботи проводяться на непрацездатному ЕЛА з метою переведення його у працездатний стан.

Очевидним фактом при побудові графу фазових станів для СТО з контролем параметрів є необхідність враховувати дві додаткові фазові координати: виникнення несправності та виникнення відмови ЕЛА. При цьому слід зазначити, що під несправністю ЕЛА, для даної СТО, слід розуміти вихід контрольованих параметрів досліджуваного об'єкта в область випереджуючих допусків, тобто мова йде про несправний, але працездатний ЕЛА [3].

Введення цих фазових координат обумовлене можливістю ЕЛА (за даною СТО) перебувати у справному стані, який характеризується здатністю об'єкта виконувати усі задані функції [5] і несправному, а також у працездатному, який характеризується здатністю об'єкта виконувати усі потрібні функції [5] і непрацездатному.

З урахуванням цього, а також необхідності забезпечення властивості напівмарковості, граф

фазових станів для розглянутої стратегії буде мати вигляд, представлений на рис.6.

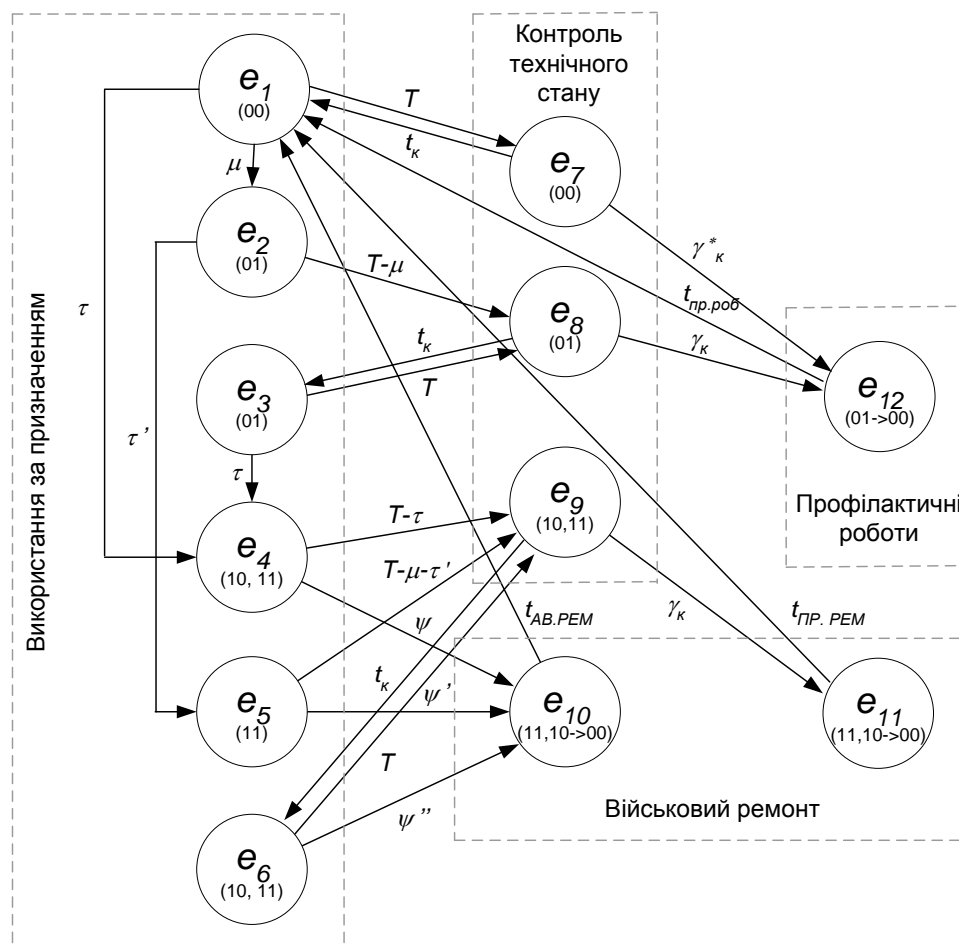


Рис. 6. Стохастичний граф фазових станів та можливих переходів для СТО ЕЛА з контролем параметрів

У дужках на графі для кожного стану виділено значення врахованих фазових координат, при цьому перша цифра 0 означає працездатний виріб, 1 – непрацездатний виріб, друга цифра 0 означає справний виріб, 1 – несправний виріб. З урахуванням того, що в ЕЛА можуть виникати різні види відмов та несправностей, отримаємо можливі варіанти сполучення додатково виділених фазових координат: 00 – виріб справний, 01 – виріб несправний (виникнення однієї з можливих несправностей), 10 – виріб непрацездатний (виникнення однієї з можливих відмов – миттєва відмова), 11 – виріб непрацездатний (виникнення несправності з подальшим розвитком у відмову ЕЛА). Як видно на рис. 6, стан використання за призначенням декомпоновано на 6 окремих станів, які будуть відрізнятися значеннями фазових координат, а також функціями розподілу часу перебування у станах. У випадку коли за період T у момент часу μ на справному ЕЛА виникає несправність, то здійснюється перехід $e_1 \rightarrow e_2$.

Якщо за час $(T - \mu)$ несправність поступово розвивається у відмову (поступова відмова), або раптово виникає інша відмова виробу (раптова відмова) у випадковий момент τ здійснюється перехід $e_2 \rightarrow e_5$.

Відмова, що виникла у випадковий момент часу ψ' , з імовірністю ρ може проявитися в польоті (перехід $e_5 \rightarrow e_{10}$), або через час $(T - \mu - \tau')$ буде здійснено черговий контроль технічного стану протягом часу t_k (перехід $e_5 \rightarrow e_9$).

Якщо несправність відсутня, або відмова не встигла виникнути, то відповідно через визначений невідповідний інтервал часу T (перехід $e_1 \rightarrow e_7$), або через випадковий час $T - \mu$ (перехід $e_2 \rightarrow e_8$) на ЕЛА впродовж часу t_k буде здійснено контроль його технічного стану. При наявності несправності виробу (фазові координати 01) за час контролю t_k з імовірністю $d_{нп}$ у випадковий момент часу γ_k несправність може бути виявлена (перехід $e_8 \rightarrow e_{12}$), або не виявлена

з імовірністю $1 - d_{\text{нп}}$ (перехід $e_8 \rightarrow e_3$).

В останньому випадку ЕЛА буде перебувати у несправному але працездатному стані e_3 до моменту τ поступового розвитку несправності у відмову чи раптового виникнення іншої відмови (перехід $e_3 \rightarrow e_4$), або на ньому буде здійснено черговий контроль технічного стану (перехід $e_3 \rightarrow e_8$).

Якщо за період T у момент часу τ на справному ЕЛА виникає раптова відмова, то здійснюється перехід $e_1 \rightarrow e_4$. Раптова, або поступова відмова, що виникла через проміжок $T-\tau$ (перехід $e_4 \rightarrow e_9$) з імовірністю $d_{\text{нп}}$ у випадковий момент γ_k буде виявлена на землі (перехід $e_9 \rightarrow e_{11}$) та усунена впродовж часу профілактичного ремонту $t_{\text{пр.рем}}$ (перехід $e_{11} \rightarrow e_1$), або з імовірністю ρ у випадковий момент часу ψ може самопроявитися у польоті (перехід $e_4 \rightarrow e_{10}$) та буде усунена за час аварійного ремонту $t_{\text{ав.рем}}$ (перехід $e_4 \rightarrow e_{10}$).

При правильному виявленні несправного стану ЕЛА з імовірністю $d_{\text{нп}}$ (перехід $e_8 \rightarrow e_{12}$), або помилковому визнанні справного виробу несправним з імовірністю $1 - d_{\text{нп}}$ (перехід $e_7 \rightarrow e_{12}$) впродовж часу $t_{\text{пр.роб}}$ відбувається відновлення справності виробу (перехід $e_{12} \rightarrow e_1$). При невиявленні відмови ЕЛА з імовірністю $1 - d_{\text{нп}}$ в ході проведення контролю технічного стану виробу за час t_k здійснюється перехід в стан e_6 (перехід $e_9 \rightarrow e_6$) в якому виріб буде перебувати впродовж часу T до моменту чергового контролю (перехід $e_6 \rightarrow e_9$), або до моменту ψ самопроявлення відмови в польоті (перехід $e_6 \rightarrow e_{10}$).

Перехід $e_7 \rightarrow e_{12}$ відповідає виникненню при контролі технічного стану ЕЛА помилок першого роду, переходи $e_8 \rightarrow e_3$, $e_9 \rightarrow e_6$ – помилок другого роду. Переходи $e_1 \rightarrow e_4$, $e_2 \rightarrow e_5$, $e_3 \rightarrow e_4$ відповідають виникненню прихованих відмов, переходи $e_4 \rightarrow e_{10}$, $e_5 \rightarrow e_{10}$, $e_6 \rightarrow e_{10}$ – самопроявленню відмов в польоті.

Врахування інтенсивності польотів ЛА за розробленими графами здійснюється через визначення законів розподілу часу τ , μ , τ' , де інтенсивність польотів ЛА використовується в якості вихідних даних.

Висновки

Таким чином, розроблено формалізований опис ПТЕ ЕЛА – побудовано графи фазових станів та можливих переходів для кожної стратегії технічного обслуговування (рис. 2, 4, 6).

Отримані результати дозволяють, використовуючи математичний апарат напівмарковських процесів [9], провести розрахунок показників техніко-економічної ефективності ПТЕ ЕЛА для вирішення питання формування оптимальних режимів ТО ЕЛА з одночасним врахуванням особливостей системи експлуатації ЛА військового призначення.

Список літературних джерел

1. ГОСТ 28056-89. Построение, изложение, оформление и содержание программы технического обслуживания и ремонта. – М.: Госстандарт СССР. 1989. – 31 с.
2. Далецкий С.В. Проектирование системы технического обслуживания и ремонта воздушных судов гражданской авиации. – М.: МАИ, 2001. – 364 с.
3. Техническая эксплуатация авиационного оборудования. Под. ред. В.Г. Воробьева. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 90 с.
5. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1980. – 229 с.
6. Деркач О.Я. Формирование систем технического обслуживания самолетов при их создании. – М.: Машиностроение, 1993. – 223 с.
7. Смирнов Н.Н., Андронов А.М., Владимиров Н.И., Лемин Ю.И. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов. – М.: Транспорт, 1974. – 304 с.
8. Скляр О.І., Григоров В.А., Зав'ялова О.І., Карпов О.П. Вибір класу і метода моделювання для математичного опису процесу технічної експлуатації модернізованого літального апарата військового призначення // Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". Вып. 27. – Харьков: НАКУ, 2005. – С. 71 – 78.
9. Королюк В.С. Стохастические модели систем. – К.: Наукова думка, 1989. – 208 с.