

**Рагулін С. В.**, кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри гідротехнічного будівництва,  
водної та електричної інженерії  
Херсонського державного аграрно-економічного університету  
ORCID: 0000-0001-8955-0380

**Зубенко В. О.**, кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри гідротехнічного будівництва,  
водної та електричної інженерії  
Херсонського державного аграрно-економічного університету  
ORCID: 0000-0002-8401-755X

## ПОШУК ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Сучасні повітряні судна оснащуються цифровими пілотажно-навігаційними комплексами нового покоління, в яких всі системи мають вбудовані системи контролю і конструктивно виконуються у вигляді ряду легкозамінних блоків. Безпека польотів сучасних повітряних суден забезпечується шляхом резервування радіоелектронних навігаційних систем, в той час як регулярність польотів – шляхом створення достатньої кількості запасних легкозамінних блоків в обмінному фонді.

У статті відзначається те, що висока інтеграція пілотажно-навігаційних комплексів і висока інтенсивність польотів повітряних суден призводить до того, що за результатами оперативного технічного обслуговування частина легкозамінних блоків помилково визнаються непридатними, демонтуються і відправляються на відновлення. Згідно зі статистичними даними, від 40 до 85% демонтованих легкозамінних блоків радіоелектронних навігаційних систем насправді є працездатними. Це породжує проблематику так званих непідтверджених дефектів. Північноамериканська авіаційна транспортна асоціація «The Air Transport Association» оцінює щорічні втрати на рівні в середньому 100 тисяч доларів на кожен середньо-магістральний літак. Велика кількість непідтверджених дефектів тягне за собою необхідність невиправданого збільшення обсягу в обмінному фонді запасних легкозамінних блоків для підтримки регулярності польотів, що призводить до значних капітальних витрат. Данна стаття присвячена пошуку можливостей зниження цих витрат за рахунок використання наземних автоматизованих систем контролю, що здійснюють перевірку демонтованих блоків з високою достовірністю і запобігають помилковій відправці працездатних легкозамінних блоків на відновлення. Однак закупка та експлуатація наземних автоматизованих систем контролю також вимагає значних інвестицій.

У роботі зазначено, що ефективність експлуатації повітряних суден безпосередньо визначається оптимальним варіантом організації системи технічного обслуговування і ремонту, вибір якого ґрунтується на вирішенні комплексу завдань діагностичного забезпечення, методичного, нормативного забезпечення та оптимального формування обмінного фонду.

Ключові слова: системи контролю; відновлення; технічне обслуговування; легкозамінні блоки; радіоелектронні навігаційні системи.

### **Rahulin S. V., Zubenko V. O. Finding ways to improve radio-electronic navigation systems operational efficiency**

Modern aircraft are equipped with digital pilotage and navigation systems of the new generation, in which all systems have built-in control systems and are structurally made in the form of a number of easily replaceable blocks. The flight safety of modern aircraft is ensured by the redundancy of radio-electronic navigation systems, while the regularity of flights is ensured by the creation of a sufficient number of spare easily replaceable blocks in the exchange fund.

The article notes that the high integration of pilotage and navigation complexes and the high intensity of aircraft flights leads to the fact that, according to the results of operational maintenance, part of easily replaceable blocks are mistakenly recognized as inoperable, dismantled and sent for restoration. According to statistics, from 40 to 85% of disassembled easily replaceable units of radio electronic navigation systems are actually functional. This gives rise to the problem of so-called unconfirmed defects. The North American Air Transport Association (ATA) estimates annual losses at an average of 100,000 thousands of dollars for each medium-haul aircraft. A large number of unconfirmed defects entails the need for an unjustified increase in the volume in the exchange fund of spare easily replaceable units to maintain the regularity of flights, which leads to significant capital costs. This work is devoted to the search for opportunities to reduce these costs through the use of ground-based automated control systems, that verify dismantled blocks with high reliability and prevent erroneous sending of workable easily replaceable blocks for restoration. However, purchasing and operating ground-based automated control systems also requires significant investment.

The article defines that the efficiency of aircraft operation is directly determined by the optimal variant of the organization of the maintenance and repair system, the choice of which is based on the solution of the complex tasks of diagnostic support, methodical, regulatory support and optimal formation of the exchange fund.

Key words: control systems; restoration; maintenance; easily replaceable blocks; radio electronic navigation systems.

**Постановка проблеми.** Система технічного обслуговування і ремонту є системою управління технічним станом радіоелектронних навігаційних систем в заданих умовах експлуатації і являє собою сукупність взаємопов'язаних засобів, експлуатаційно-ремонтної документації та виконавців, необхідних для підтримки якості виробів, що входять в систему. Під ефективністю системи технічного обслуговування і ремонту розуміється сукупність властивостей системи ТОіР, що характеризують співвідношення між витратами ресурсів (матеріальних, часових або трудових) на підтримку чи відновлення працездатності РЕНС і досягається результатом.

Підтримка правильного функціонування всієї системи ТОіР здійснюється за допомогою організації інженерно забезпечення, яке являє собою необхідний і достатній комплекс заходів, що проводяться з метою підтримки справності, забезпечення інтенсивності використання повітряного судна, безпеки і регулярності польотів при економному використанні трудових і матеріально-технічних ресурсів.

На рис. 1 наведені основні складові системи ТОіР ПС. Як видно з аналізу, інженерне забезпечення включає в себе заходи щодо забезпечення льотної експлуатації та підтримання необхідного рівня безпеки польотів, технічне забезпечення процесу ТОіР, а також комплекс фінансового забезпечення.



Рис. 1. Основні складові системи технічного обслуговування повітряних суден

Діагностичне забезпечення призначене для здійснення процесу діагностування та оптимального використання засобів контролю технічного стану РЕНС.

Система забезпечення запасними виробами (СЗЗВ) призначена для вирішення наступних завдань: поповнення запасів виробів, що виробили міжремонтний або назначений ресурс; підтримання необхідного рівня страхових запасів; підтримки необхідних обсягів незнижуваного ОФ виробів (компонентів) в авіапідприємствах і сервісних центрах.

Інформаційне забезпечення процесу ТОіР представляє комплекс взаємопов'язаних заходів щодо збору, обробки, використанню інформації про технічний стан ПС, систем, виробів і обладнання на експлуатаційних і ремонтних підприємствах, обробці результатів експлуатації, випробувань і досліджень з метою вдосконалення конструкції та усунення недоліків ПС і підвищення ефективності експлуатації.

Методичне та документаційне забезпечення має містити комплекс нормативної документації, методів, алгоритмів і рекомендацій з оцінки і розрахунку показників експлуатаційної надійності РЕНС, вибору оптимальних стратегій ТО, оптимізації діагностичного забезпечення та управління системою забезпечення запасами.

Зобов'язання постачальника і експлуатанта являють собою комплекс заходів, засобів і нормативно-технічної документації необхідної для підтримки льотної придатності і необхідного рівня ефективності процесу експлуатації ПС в гарантійний та післягарантійний періоди.

Ефективність системи ТОіР істотно залежить від безвідмовності, ремонтпридатності та довговічності РЕНС, достовірності результатів і тривалості експлуатаційного контролю. Кількісними характеристиками різних властивостей системи ТОіР є відповідно показники безвідмовності, ремонтпридатності та довговічності РЕНС, достовірності та тривалості експлуатаційного контролю, тривалості відновлення систем.

Поряд з програмою ТОіР, що запропонована розробником ПС, кожен експлуатант має право розробляти свою приватну програму ТО експлуатанта, яка враховує всі особливості експлуатації ПС і дозволяє отримати максимальний прибуток при підтримці вимог льотної придатності.

При розробці програм ТОіР необхідно раціональне поєднання якісного інженерного аналізу за вибором методів технічної експлуатації та робіт з ТОіР ПС з кількісною оцінкою показників ефективності ТОіР на основі створення математичних моделей впливу ТОіР на надійність і безпеку бортових систем. Це дозволить формалізовано аналізувати вплив можливих відмов систем та їх компонентів на безпеку, регулярність польотів і економічність ПС.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Вперше раціональний підхід щодо формування програм ТОіР був запропонований в 70-х роках авіакомпанією United Airlines і став пізніше широко відомий як методичний

---

документ з розробки програми планового ТОіР АТА MSG-3 [1]. Однак через відсутність коректної математичної моделі методика MSG-3 дуже слабо формалізована. Тому актуальною є задача методичного забезпечення формування програм ТОіР для розробників і експлуатантів ПС.

Задоволення сучасним вимогам з безпеки польотів призводить до необхідності створення безвідмовних з виконання заданих функцій бортових РЕНС за рахунок багаторазового резервування, введення систем бортового контролю та управління, локалізуючих несприятливий вплив відмов на функціонування пілотажно-навігаційного комплексу в цілому. Це призводить до збільшення кількості обладнання на ПС, що в свою чергу, тягне за собою зростання числа відмов і несправностей обладнання, збільшення трудомісткості ТО і, як наслідок, необхідності збільшення кількості запасних комплектуючих в обмінному фонді. У цих умовах потрібна зміна ідеології льотної та технічної експлуатації з метою підвищення безпеки польотів, підвищення якості функціонування систем ПС і скорочення невиправданих простоїв ПС.

Вирішити це завдання можна шляхом підвищення надійності РЕНС, переходом на обслуговування за станом до безпечної відмови (breakdown maintenance strategy) без виконання зайвих робіт з ТОіР і планових заміन компонентів. У цьому випадку кожна система експлуатується до відмови, яка реєструється в польоті або в процесі передпольотного оперативного ТО.

Перспективним шляхом вирішення даної задачі для резервованих РЕНС є використання типового (головного) переліку мінімального обладнання на підставі якого допускається експлуатація ПС, шляхом відкладеного (у встановлених межах) проміжку часу усунення виявлених несправностей. У зарубіжних нормативних документах цей перелік називається ПМДО (Master Minimum Equipment List). Основний перелік мінімального обладнання (ПМДО) розробляється власником сертифікату-розробником ПС. Цей перелік визначає мінімальну конфігурацію систем ПС, для яких є область основних умов експлуатації та льотно-технічних характеристик, що забезпечує можливість виконання польоту із збереженням необхідного рівня безпеки польоту. Іншими словами, на підставі ПМДО допускається виліт ПС із транзитного аеропорту з відмовленою системою, що входить у ПМДО.

Використання ПМДО/МДО в авіакомпанії може дати істотний економічний ефект за рахунок наступних чинників: запобігання затримок при вильоті з транзитного аеропорту; оптимізації проведення ТО шляхом узгодження часу проведення відновлення відмовленої системи з термінами найближчої періодичної форми; оптимізації обсягів запасних комплектуючих виробів. При розробці ПМДО/МДО сертифікованих ПС, основною умовою включення системи, підсистеми, агрегату в цей перелік має бути збереження для ПС (при його вильоті з непрацездатним обладнанням) рівня безпеки.

Кожен експлуатант вирішує самостійно з урахуванням своїх конкретних умов необхідність використання ПМДО. Це здійснюється шляхом розробки на базі ПМДО конкретизованого переліку MEL (Minimum Equipment List), який враховує конфігурацію ПС і умови експлуатації для конкретної авіакомпанії. При цьому авіакомпанія повинна розробити комплекс організаційно-технічних заходів, що забезпечують необхідний рівень безпеки польоту при використанні МДО. Цей перелік може відрізнитися від ПМДО, але не повинен бути менш жорстким.

Всі можливі відмови ПС по виду їх прояви можна розділити на дві групи: «Явні» для льотної екіпажу при виконанні ним своїх звичайних обов'язків; «Приховані», тобто неявні для екіпажу.

Приховані відмови повинні своєчасно виявлятися вбудованими засобами контролю та усуватися при оперативному обслуговуванні ПС у базовому аеропорту. У групі явних відмов будь-яка небезпечна одинична відмова має бути в принципі виключена, або, за відсутності технічної можливості, ймовірність такої відмови повинна бути обмежена відповідно до норм льотної придатності. Явні відмови резервованих систем зазвичай не впливають на безпеку польоту, і системи, для яких можливі подібні відмови, можуть включатися в перелік ПМДО/МДО.

При прихованих відмовах середній час між відновлення системи залежить від безвідмовності системи, періодичності контролю працездатності, достовірності та повноти контролю. При явних відмовах (за переліком ПМДО) цей час дорівнює сумі середнього часу безвідмовної роботи системи та середнього часу польоту з несправним блоком (за умови, що ця відмова виявлена під час польоту).

Для науково-обґрунтованого підходу до формування оптимальних програм ТОіР, а також переліків ПМДО/МДО, необхідно мати математичні моделі та методики для оцінки експлуатаційної надійності та ймовірності безвідмовної роботи РЕНС протягом польоту ПС. Ці моделі повинні враховувати вплив як прихованих, так і явних відмов. Крім того, вони повинні враховувати достовірність вбудованого контролю та вплив структури резервування з точки зору надійності РЕНС.

Після початку експлуатації весь життєвий цикл ПС (виключаючи утилізацію) можна розділити на два етапи: період гарантійного і період післягарантійного обслуговування. Кожен з цих періодів має свої особливості в побудові системи ТОіР, а, отже, вимагає різного підходу до вибору оптимального варіанту стратегії ТОіР та організації відповідного технічного забезпечення процесу експлуатації. Тому найважливішим є проблема вибору оптимального варіанту стратегії ТОіР РЕНС на різних етапах життєвого циклу НД

Основною відмінністю цих періодів є те, що під час гарантійного обслуговування всі витрати, пов'язані з відновленням РЕНС, несе постачальник ПС, а при післягарантійному обслуговуванні – експлуатант.

Відповідно до вимог, що пред'являються специфікаціями ARINC-700 [2], конструктивно РЕНС сучасних ПС виконуються у вигляді ряду легкозамінних блоків (ЛБ), які в міжнародних стандартах називають Line Replaceable Units (ЛБ). У свою чергу, ЛБ побудовані за модульним принципом і складаються з ряду уніфікованих змінно-складальних модулів – Shop Replaceable Units (ЗМ). Кожен ЛБ має вбудований засіб контролю (ВСК), що дозволяє проводити контроль працездатності (КП) протягом польоту ПС та в аеропорту під час оперативного ТО.

Висока інтеграція пілотажно-навігаційних комплексів і висока інтенсивність польотів ПС призводить до того, що КП на стоянці ПС здійснюється тільки з використанням ВСК. За результатами КПВСК і зауваженням екіпажу приймається рішення про демонтаж ЛБ з борту ПС. Так як достовірність ВСК не абсолютна, деякі з ЛБ помилково визнаються непрацездатними, демонтуються і відправляються на відновлення, що призводить до додаткових витрат.

Згідно зі статистичними даними зарубіжних авіакомпаній, від 40 до 85% демонтованих ЛБ систем авіоніки насправді є працездатними [3,4]. Це призводить до великих витрат авіакомпаній через так звані непідтверджені дефекти. Північноамериканська авіаційна транспортна асоціація АТА оцінює щорічні втрати в середньому 100 тис. дол. на кожне середньо-магістральне ПС через проблеми непідтверджених дефектів (НД).

Основною метою даної роботи є дослідження питання технічної експлуатації радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден з точки зору пошуку шляхів підвищення ефективності її функціонування.

**Виклад основного матеріалу.** Одним із шляхів скорочення кількості непідтверджених дефектів є використання експлуатантами наземних автоматизованих систем контролю (НАСК), які дозволяють здійснювати повторну перевірку демонтованих ЛБ і запобігати помилковій відправці працездатних блоків на відновлення.

Як показує аналіз побудови систем ТОіР вітчизняних та зарубіжних ПС нового покоління з урахуванням особливостей конструктивного виконання сучасних РЕНС, що складаються з ЛБ, які в свою чергу включають в себе ряд ЗМ, можна виділити три рівні ТОіР.

Перший рівень полягає в ТО ЛБ в польоті або на стоянці ПС. Тут за допомогою ВСК проводиться КПЛБ. Забракований за результатами контролю ЛБ, надходить на другий рівень ТОіР.

Другий рівень передбачає ТО демонтованого ЛБ, який може здійснюватися на ЗВ, в базовому аеропорту або в центрі ТОіР. На цьому рівні КП і пошук місця відмови в ЛБ виробляються за допомогою НАСК-L. Пошук місця відмови в ЛБ може здійснюватися з глибиною до ЗМ за допомогою НАСК-S. Відновлення працездатності ЛБ проводиться шляхом заміни відмовлених ЗМ.

Третій рівень – це відновлення ЗМ. Для КП і пошуку місця відмови в ЗМ з глибиною до одного або декількох невідновлювальних елементів (НЕ) може застосовуватися НАСК високого рівня (НАСК-Е).

Таким чином, залежно від рівня діагностичного забезпечення можливі наступні варіанти побудови системи ТОіР РЕЗ: експлуатант не має НАСК і всі демонтовані ЛБ відправляються для відновлення на ЗВ або в центр ТОіР. Запасні справні ЛБ поступають для монтажу на борт ПС з ОФ; експлуатант має НАСК-L, яка дозволяє здійснювати КП демонтованих ЛБ. При цьому внаслідок високої достовірності контролю НАСК-L практично всі помилково демонтовані ЛБ повертаються для монтажу на борт ПС; експлуатант має НАСК-S, яка дозволяє здійснювати КП демонтованих ЛБ і проводити пошук несправності в них з глибиною до ЗМ. При цьому, для відновлення на ЗВ (в центр ТОіР) відправляються ЗМ, визнані непрацездатними за результатами контролю за допомогою НАСК-S. У цьому випадку створюється ОФ, що складається з ЗМ, необхідних для відновлення ЛБ; експлуатант має НАСК-Е, яка дозволяє здійснювати КП демонтованих ЛБ і проводити пошук несправності в них з глибиною до невідновлюваного елемента. У цьому випадку відновлення ЛБ здійснюється безпосередньо експлуатантом, а ОФ складається з ЗМ і НЕ.

Як видно з рис. 2, при цьому варіанті ЛБ, забракований за результатами КП ВСК, демонтується з борту ПС і відправляється на ЗВ. Для підтримки необхідної регулярності польотів з ОФ поставляється працездатний ЛБ, який монтується на борт НД. Забракований ЛБ після відновлення на ЗВ або поступає в ОФ, або відразу монтується на борт ПС.

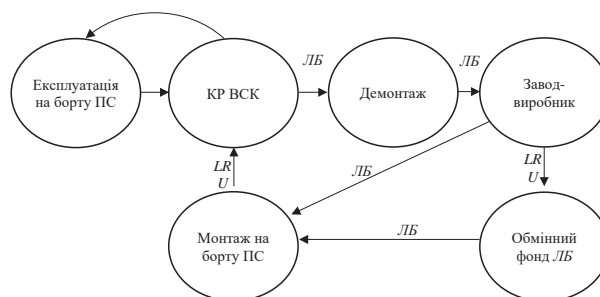


Рис. 2. Діаграма станів ЛБ при відсутності в експлуатанта НАСК



На рис. 3 наведена діаграма станів ЛБ за наявності у експлуатанта НАСК-Л, що відповідає другому варіанту побудови системи ТОіР. З рисунка, видно, що при цьому варіанті ЛБ, забракований за результатами КР ВСК, демонтується з борту ПС і надходить на НАСК- L, для повторної перевірки. Якщо за результатами КР за допомогою НАСК- L, ЛБ визнається працездатним, то він монтується назад на борт ПС. Якщо ж ЛБ бракується, то він відправляється для відновлення на ЗВ, а на борт ПС монтується ЛБ з ОФ.

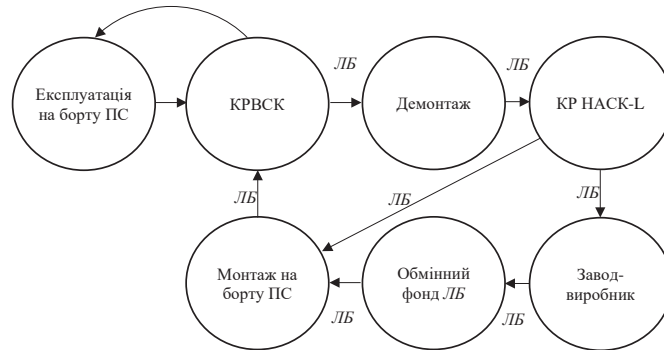


Рис. 3. Діаграма станів ЛБ при наявності в експлуатанта НАСК-Л

На рис. 4 наведено діаграму станів ЛБ за наявності у експлуатанта НАСК-S, що відповідає третьому варіанту побудови системи ТОіР. Як видно в цьому випадку ЛБ, забракований за результатами КР ВСК, демонтується з борту ПС і надходить на НАСК-S для КР. Якщо за результатами КР ЛБ визнається працездатним, то він монтується назад на борт ПС. Якщо ж ЛБ бракується, то проводиться пошук одного або декількох дефектних ЗМ, які далі відправляються на ЗВ для відновлення. Справні ЗМ, необхідні для заміни дефектних, надходять із ОФ у цех відновлення ЛБ. Після відновлення ЛБ монтується назад на борт ПС.

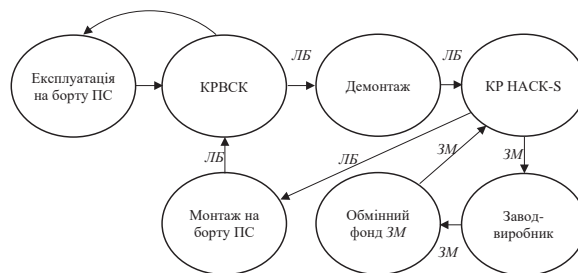


Рис. 4. Діаграма станів ЛБ при наявності в експлуатанта НАСК-S

Діаграма станів ЛБ за наявності у експлуатанта НАСК-Е наведено на рис. 5, що відповідає четвертому варіанту побудови системи ТОіР.

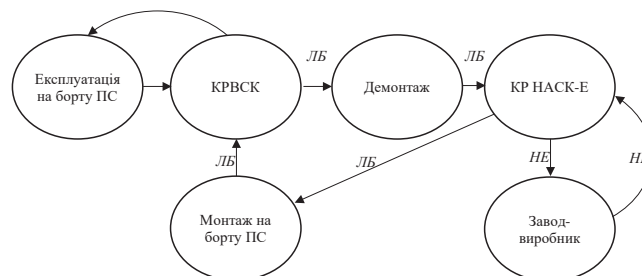


Рис. 5. Діаграма станів ЛБ при наявності в експлуатанта НАСК-Е

Як видно з рисунку, ЛБ, забракований за результатами КР ВСК, демонтується з борту ПС і надходить на НАСК-Е для КР, пошуку несправних ЗМ і відмовлених НЕ. Якщо за результатами КР ЛБ визнається працездатним, то він монтується назад на борт ПС. Якщо ЛБ забракований за результатами КР, то проводиться пошук несправного ЗМ і відмовлених в ньому елементів. Несправні елементи замінюються на справні із запасів обмінного фонду. Після відновлення ЛБ монтується назад на борт ПС.

---

Таким чином, перед постачальником і експлуатантом стоїть завдання вибору оптимального варіанта стратегії ТО, що дозволяє забезпечити максимальну ефективність експлуатації ПС. Це пов'язано з тим, що, з одного боку, купівля та експлуатація НАСК вимагає певних інвестицій, а з іншого боку, відсутність НАСК призводить до витрат внаслідок НД і необхідності формування дорогого ОФ ЛБ.

Для вибору оптимального варіанту необхідно розробити показники, що дозволяють оцінювати повні експлуатаційні витрати з урахуванням основних характеристик процесу ТОiP, достовірності КР ВСК, періодичності КР, тривалості відновлення ЛБ, структури та обсягу ОФ. Причому, ці показники повинні враховувати особливості післягарантійного періоду експлуатації ПС. Крім того, вартісні показники повинні враховувати різночасовість капітальних вкладень, оскільки ОФ і НАСК можуть закуповуватися як разом з ПС, так і в період його експлуатації.

Сучасні НАСК будуються за модульним принципом з різною конфігурацією вимірювальних засобів. З точки зору структурної побудови можливі такі варіанти: варіант розосередженого НАСК, що складається з кількох локальних станцій контролю, профільованих за типом контрольованого обладнання; варіант зосередженої НАСК (універсальна одномісна НАСК).

Перевагою розосередженої НАСК є порівняно більш висока продуктивність і надійність. Така НАСК може одночасно контролювати кількість блоків, яка дорівнює кількості локальних станцій контролю. При відмові однієї станції контролю решта продовжують працювати. Крім того, деякі з відмов локальних станцій контролю можуть бути парировані за рахунок використання однотипного обладнання інших станцій контролю. Недоліком розосередженою НАСК є відносно висока вартість.

Універсальна НАСК в будь-який момент часу може контролювати тільки один ЛБ. Така система має значно меншу продуктивністю. У випадку, якщо необхідна продуктивність виявиться більшою, ніж та, яку може забезпечити одномісна НАСК, виникне черга на контроль з ЛБ різного типу. Це може призвести до необхідності збільшення обсягу обмінного фонду і до простою ПС у разі відсутності запасних ЛБ в обмінному фонді.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі.** Таким чином, незважаючи на можливо меншу вартість одномісна НАСК може виявитися менш ефективною, ніж розосереджена. Наслідки відмови одномісної НАСК є порівняно більш важкими, ніж для розподіленої, так як на протязі часу усунення причин відмови повністю припиняється процес контролю. Тому важливим є завдання вибору оптимальної структури НАСК для конкретних умов авіакомпанії. Проте в даний час відсутнє методичне забезпечення для оцінки ефективності використання НАСК з різною структурою побудови.

Ефективність експлуатації РЕНС значною мірою визначається умовами формування і обсягом обмінного фонду. Збільшення обсягу запасних виробів дозволяє забезпечувати високий рівень регулярності польотів, але з іншого боку це тягне за собою великі витрати. При малій кількості запасних виробів в обмінному фонді витрати знижуються, але ризик дефіциту зростає, що призводить до простоїв ПС і порушення регулярності польотів, а отже, до фінансових втрат. Вирішення цієї суперечності може бути досягнуто шляхом мінімізації загальних витрат, що включають втрати через простої ПС і витрат на придбання необхідної кількості запасних виробів.

#### Список використаних джерел:

1. Airline manufacturer maintenance program planning document: MSG-3. / ed. by Air Transport Association of America. Maintenance Steering Group – 3 Task Force. 2nd ed. Washington, DC : Air Transport Association of America, 1993.
2. Pham H., Wang H. Reliability and Optimal Maintenance. Springer, 2006.
3. Gertsbakh I. B. Reliability theory: With applications to preventive maintenance. Berlin : Springer, 2000. 219 p.
4. Pham H., Wang H. Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 94, no. 3. P. 425–438. URL: [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(96\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00099-9)
5. Stochastic Models in Reliability and Maintenance / ed. by S. Osaki. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2002.
6. Kumar U. D. Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Boston, MA : Springer US, 2000. 490 p.

#### References:

1. Airline/manufacturer maintenance program planning document: MSG-3. / ed. by Air Transport Association of America. Maintenance Steering Group – 3 Task Force. 2nd ed. Washington, DC : Air Transport Association of America, 1993.
2. Pham H., Wang H. Reliability and Optimal Maintenance. Springer, 2006.
3. Gertsbakh I. B. Reliability theory: With applications to preventive maintenance. Berlin : Springer, 2000. 219 p.
4. Pham H., Wang H. Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 94, no. 3. P. 425–438. URL: [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(96\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00099-9)
5. Stochastic Models in Reliability and Maintenance / ed. by S. Osaki. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2002.
6. Kumar U. D. (2000) Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Boston, MA : Springer US, 490 p.