

КИЇВСЬКИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

на правах рукопису

Козарук Василь Васильович

ЕФЕКТИВНІСТЬ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ
ПОЛЬОТІВ СИСТЕМОЮ ЕКІПАЖ - ПОВІТРЯНЕ СУДНО

Спеціальність 05.22.14

"Експлуатація повітряного транспорту"

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 1996

Дб. 35. 600

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Київському міжнародному університеті цивільної авіації

Офіційні опоненти: заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор Комаров Андрій Олександрович
доктор технічних наук, професор Котельников Геннадій Ниллович
доктор технічних наук, професор Павлов Вадим Володимирович

Провідна організація: Авіаційний науково-технічний комплекс ім. О.К. Антонова.

Захист відбудеться "31" жовтня 1996 р. о 15⁰⁰г. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.35.04 при Київському міжнародному університеті цивільної авіації за адресою: 252601, Київ-58, просп. Комарова, 1, КМУЦА.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці КМУЦА.

Автореферат розісланий "24" 09 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради

д.т.н. проф.
М.С. Кулик

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00760009 (M)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ. Необхідність виконувати польоти в різних фізико-географічних і метеорологічних умовах обумовила підвищення рівня автоматизації процесу аеронавігації повітряних суден /ПС/. Розширення функцій навігаційного обладнання ПС, його ускладнення і багаторежимність з можливими несигналізованими відказами при обмеженні навігатора по завантаженості, обчислювальних операціях і працездатності стали важливими чинниками появи актуальної проблеми – відказобезпечного застосування, оперативного визначення стану і підвищення відказобезпеки засобів аеронавігації.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ – виконати теоретичні узагальнення методів визначення експлуатаційних характеристик навігаційного обладнання, які впливають на безпеку польотів, створити єдиний критерій якості навігаційних ергетичних комплексів /НЕК/ і процесу аеронавігації, обґрунтувати сукупність способів відказобезпечного застосування і оперативного визначення стану навігаційного обладнання ПС.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ:

1. Обґрунтувати підхід до оцінювання впливу відказів приладів, блоків, агрегатів і інших елементів системи екіпаж-ПС на безпеку польотів.

2. Виконати теоретичні узагальнення методів визначення показників безвідказності навігаційного обладнання і розробити критерії відказобезпеки і цільової ефективності НЕК.

3. Розробити аналітичні і експериментальні методи визначення динамічної завантаженості оператора НЕК і оцінки його впливу на ефективність забезпечення безпеки польотів.

4. На основі теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтувати способи відказобезпечного застосування і оперативного визначення стану навігаційного обладнання для підвищення ефективності експлуатації ПС і безпеки польотів.

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.

1. Застосування методів теорії імовірностей і математичної статистики для оцінки впливу навігаційного обладнання на безпеку польотів з урахуванням можливостей і особливостей його застосування екіпажами ПС.

2. Системний підхід до формування критерія якості функціонування НЕК як складової частини системи екіпаж-ПС.

3. Теоретичні узагальнення методів визначення показників надійності і точності навігаційного обладнання з урахуванням можливостей і особливостей його застосування оператором НЕК.

4. Обґрунтування на основі положень інженерної психології методів дослідження динамічної завантаженості оператора НЕК процесом експлуатації навігаційного обладнання в польотах.

5. Застосування методів моделювання складних систем для визначення операційної надійності оператора НЕК в процесі розв'язування навігаційних задач в польотах.

6. Застосування теорії прийняття рішень для обґрунтування правил експлуатації і оперативного визначення стану навігаційного обладнання.

ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ, ЯКІ ВИНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ:

1/ декомпозиція системи екіпаж-ПС на бортові цільові ергатичні комплекси для аналізу безвідказності і відказобезпеки приладів, блоків, агрегатів і систем авіаційного обладнання, оцінки їх впливу на рівень безпеки польотів і обґрунтування стратегії обслуговування [5, 10, 16, 20, 21] ;

2/ критерії безвідказності, відказобезпеки і цільової ефективності бортових ергатичних комплексів як складових частин системи екіпаж-ПС [6, 7, 8, 11, 15, 16, 20] ;

3/ метод визначення безвідказності і відказобезпеки навігаційного обладнання як сукупності основних і контрольних ланцюгів вимірювання, обробки і використання навігаційної інформації з урахуванням повноти контролю застосовуваних систем і необхідної завантаженості оператора процесом контролю їх стану [7, 15, 16, 18, 20] ;

4/ метод визначення точності аеронавігації і навігаційного обладнання з урахуванням взаємозв'язку бокових, поздовжніх і вертикальних відхилень ПС від заданої просторово-часової траєкторії польоту на повітряних трасах зі зломами [5, 18, 14, 20] ;

5/ аналітичний і експериментальний методи визначення динамічної завантаженості оператора процесом аеронавігації ПС з урахуванням встановлених законів розподілу тривалості розв'язування навігаційних задач і імовірностей їх виконання [1, 4, 9, 11, 13, 17, 19] ;

6/ методи відказобезпечного застосування і оперативного визначення стану навігаційного обладнання для підвищення ефективності експлуатації ПС і безпеки польотів [10, 13, 14, 18, 20] ;

Достовірність винесених на захист результатів дисертаційної роботи обумовлена тим, що вони одержані на базі фундаментальних теоретичних положень з використанням випробуваних моделей, адекват-

но відбиваючих реальні процеси.

Достовірність першого результату обумовлена тим, що він, базуючись на міжнародній статистиці по безпеці польотів більш як за двадцятилітній період, об'єднує в собі всі основні причини авіаційних пригод і інцидентів, які сталися із-за недоліків системи екіпаж-ПС. Із всієї сукупності чинників, що впливають на безпеку польотів, виділені і об'єднані такі, які синтезують всі різновидності систем екіпаж-ПС. Це дало можливість сформулювати узагальнюючі причини невиконання своєї задачі бортовим ергатичним комплексом і обґрунтувати єдиний критерій цільової ефективності НЕК і процесу аеронавігації.

Достовірність другого результату обумовлена тим, що критерії безвідказності, відказобезпеки і цільової ефективності бортових ергатичних комплексів сформульовані так, що синтезують всю сукупність чинників, які відображені в міжнародній статистиці про авіаційні пригоди.

Достовірність третього результату обумовлена тим, що він базується на відомих положеннях теорії надійності, враховує доцільні структури застосовуваних засобів визначеними способами з алгоритмами переходу при зміні стану навігаційного обладнання, відпрацьовані в випробувальних, виробничих і навчальних польотах.

Достовірність четвертого результату підтверджується тим, що математичний апарат визначення точності процесу аеронавігації у вигляді системи рекурентних рівнянь оснований на теорії похибок і рівняннях зчислення шляху, які реалізовані в сучасних НЕК, і підкріплені результатами, одержаними в дослідницьких і виробничих польотах.

Достовірність п'ятого результату обумовлена тим, що він базується на відомому положенні інженерної психології про одноканальність оператора і цілеспрямованість його дій в процесі розв'язування своїх задач, а алгоритми моделювання роботи оператора на ЕОМ для оцінки його надійності з заданою точністю враховує випадкову тривалість розв'язування кожної задачі і випадковий час, який має оператор для її вирішення, а статистично однорідні вибірки тривалостей визначені в реальних польотах.

Достовірність шостого результату обумовлена тим, що розроблені способи відказобезпечного застосування і оперативного визначення стану навігаційного обладнання кількісно характеризуються критеріями відказобезпеки і цільової ефективності ергатичного комплексу, враховуючи характеристики надійності і точності технічних засобів і можливості їх застосування.

Нижче і прикладне значення результатів дослідження полягає

в розвитку теорії експлуатації складних авіаційних ергетичних систем і виражається в наступному:

1. На основі декомпозиції системи екіпаж-ПС на енергетичний, навігаційний, пілотажний і життєзабезпечуючий бортові цільові ергетичні комплекси з однозначно сформульованими постійними задачами функціонування виділений об'єкт дослідження – НЕК і устновлений взаємозв'язок характеристик його елементів з відказобезпекою і ефективністю забезпечення безпеки польотів в аеронавігаційному відношенні.

2. З допомогою критеріїв відказобезпеки і цільової ефективності бортових ергетичних комплексів, враховуючих можливості і особливості застосування обладнання в польотах, обгрунтовані шляхи удосконалення процесу експлуатації засобів аеронавігації.

3. З допомогою методу визначення точності процесу аеронавігації, враховуючого взаємозв'язок бокових, поздовжніх і вертикальних відхилень ПС від заданої траєкторії, обгрунтована можливість виконання корекцій зчислених координат в визначених точках маршрутів, що дозволяє забезпечити потрібну імовірність знаходження ПС в межах траси, завчасно спланувати і забезпечити оптимальний інтервал завантаженості оператора /0,2...0,3/, оперативне оцінювати відношувальність фактичної точності навігаційного обладнання устновленим нормам і скоротити затрати на їх обслуговування, в 2...3 рази зменшити число корекцій координат і скоротити час польотів за рахунок зменшення кількості бокових переміщень ПС відносно лінії заданого шляху.

4. Розроблені методи визначення динамічної завантаженості операторів дають можливість оцінювати їх операційну надійність, необхідну для удосконалення технології роботи екіпажів ПС в польотах.

5. Створена єдина міра якості процесу аеронавігації і НЕК дозволяє з точки зору забезпечення безпеки польотів оптимізувати вплив експлуатаційних показників навігаційних систем на можливість їх застосування екіпажами ПС в польотах, обгрунтувати на відомих характеристиках надійності, точності і повноти контр,оля навігаційного обладнання, даних повітряних трас і потрібної завантаженості оператора способи відказобезпечного застосування і оперативного визначення стану засобів аеронавігації для підвищення ефективності використання ПС і безпеки польотів.

Впровадження результатів досліджень.

1. Методи визначення цільової ефективності НЕК і завантаженості операторів, спосіб реєстрації інформації про завантаженість

членів екіпажу на літаючій лабораторії використані для визначення структури НЕК і компоновки кабін літаків Ан-28, Ан-72, Ан-74, Ан-124 і в наукових роботах, направлених на підвищення безпеки польотів.

2. Результати дослідження завантаженості екіпажів ПС процесом аеронавігації в польотах і алгоритми аеронавігації використані на етапах проєктування і сертифікації літака Іл-86.

3. Метод моделювання на ЕОМ процесу роботи оператора з метою прогнозування можливості виконання заданої технології використаний для кількісної оцінки варіантів технології роботи екіпажу на літаку Ту-154.

4. Метод аналізу впливу елементів системи екіпаж-ПС на безпеку польотів, методи визначення надійності авіаційного обладнання, метод визначення точності процесу аеронавігації з урахуванням взаємозв'язку бокових, поздовжніх і вертикальних відхилень ПС, методи застосування і визначення стану навігаційного обладнання з заданою ефективністю забезпечення безпеки польотів використані в програмах навчальних дисциплін: "Технічна експлуатація і ремонт електроприборного і пілотажно-навігаційного обладнання повітряних суден", "Вортові комплекси електроприборного і пілотажно-навігаційного обладнання повітряних суден", "Аеронавігація" і книгах по вказаних дисциплінах.

ДІРОВАЦІЯ виснесених на захист положень дисертації виконана у вигляді доповідей, повідомлень і обговорень на Науково-методичній конференції по безпеці польотів /Ленінград, 1973/, конференції "Авіаційна ергономіка і безпека польотів" /Київ, 1974/, Науково-практичній конференції по деяких питаннях забезпечення безпеки польотів в цивільній авіації /Рига, 1975/, конференції "Норми льотної годності" /Москва, 1976/, науково-практичній конференції "Ергономіка і труд в авіації" /Київ, 1977/, науково-практичній конференції "Безпека і ефективність експлуатації повітряного транспорту" /Ленінград, 1985/, республіканських і галузевих семінарах, а також на лекціях по навчальних дисциплінах, які веде автор, багатьох конференціях і семінарах факультету авіаційного обладнання і кафедри технічної експлуатації авіаційних електрифікованих і пілотажно-навігаційних комплексів /ТЕАБІОНИ/ ЮВУЦА.

ПУБЛІКАЦІЇ. Виснесени на захист наукові результати опубліковані в 10 книгах: одній науковій монографії і 9 посібниках для вузів, 32 статтях, 84 наукових звітах і збірниках.

СТРУКТУРА І ОБСЯГ РОБОТИ. Дисертація складається із вступу, шес-

ти розділів, висновків і додатків, вміщує 256 сторінок основного тексту, 27 рисунків, 35 таблиць і списка використаної літератури із 200 назв.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито актуальність наукової проблеми, сформульовані мета і задачі досліджень, коротко описаний зміст розділів дисертації, вказані основні наукові результати, що виносяться на захист.

Перший розділ присвячений аналізу впливу системи екіпаж-ПС на ефективність забезпечення безпеки польотів і обґрунтування моделей критеріїв відказобезпеки і цільової ефективності НЕК. Приведений короткий огляд і аналіз критеріїв оцінки безпеки польотів, що забезпечується поліергатичною системою екіпаж-ПС. Аналіз досліджень по проблемі критеріїв оцінки безпеки польотів свідчить про різні підходи до її вирішення. Кількісна оцінка стану безпеки польотів і ефективності заходів по її підвищенню здійснюється з допомогою багатьох абсолютних і відносних показників, серед яких повна безумовна імовірність безпечного виконання польоту стала загальноприйнятим показником як рівень безпеки польотів. Це зв'язано з розвитком концепції прийнятого рівня безпеки польотів, заснованої на статистичному підході до планування і прогнозування діяльності цивільної авіації.

Її суть полягає в тому, що на основі прийнятого рівня безпеки польотів знаходиться значення імовірності ризику по статистичному критерію, з допомогою якого вирішуються проблеми експлуатації повітряного транспорту. До цих проблем відносяться нормування ешелонування польотів і обґрунтування стратегії технічного обслуговування систем навігаційного обладнання ПС.

Ця концепція дозволяє співставляти рівень безпеки польотів, який забезпечується повітряно-транспортною системою, з частотою ризику всіх інших видів транспорту. Безпека польотів визначається багатьма елементами великої складної повітряно-транспортної системи, до складу якої входять багато систем екіпаж-ПС, служб забезпечення і управління польотами, і залежить від множини

$$V_0 = \{0, t, e, p, f, m, \dots, x\} \quad (1)$$

організаційних, технічних, економічних, психофізіологічних, морально-етичних та інших чинників, зв'язаних з створенням, застосуванням, обслуговуванням і ремонтом авіаційної техніки. В багаторівневій автоматизованій системі управління "Безпека" врахову-

ються II груп причин авіаційних пригод і інцидентів. В кожній групі можна виділити десятки і сотні причин. Деталізуючи різноманітності першопричин авіаційних пригод, можна переконалися, що навіть перерахувати всі фактори, які впливають на безпеку польотів, практично неможливо. До того слід мати на увазі, що ПС конструктивно складається із таких функціональних систем як планер, силова установка, злітно-посадовочні пристрої, система управління, пілотажно-навігаційне обладнання, електрообладнання і радіообладнання різного призначення, які мають різну структурно-функціональну надмірність і можуть застосовуватися екіпажем різними способами і в різних режимах.

Взаємодіючи з указаними системами, члени екіпажу ПС допускають різні помилки в роботі, які приводять до різних наслідків, в тому числі до авіаційних пригод. Причому відкази і переходи систем в різні стани провокують помилкові дії членів екіпажу, і складаються з такими особистими чинниками як рівень професійної підготовки, емоційна стійкість до дії стресових чинників, повільність або поспішність в діях, приводять до особливих ситуацій, наслідки яких класифікуються як інциденти і авіаційні пригоди. Тому найбільш повна і об'єктивна оцінка відказобезпеки і впливу елементів системи екіпаж-ПС на рівень безпеки польотів може бути дана тільки при розгляді процесу функціонування цієї системи по етапах польоту в різних режимах з переходами в різні стани.

Інцидент або авіаційна пригода як складна подія \bar{B}_0 можуть бути приставлені як об'єднання подій, що виражають невиконання своєї задачі, системою екіпаж-ПС \bar{B} і несприятливий вплив зовнішніх чинників відносно цієї системи \bar{C}

$$\bar{B}_0 = \bar{B} \cup \bar{C}, \quad (2)$$

$$\text{де } \bar{C} = \bar{C}_1 \cup \bar{C}_2 \cup \dots \cup \bar{C}_n$$

Значить

$$B_0 = B \cap C, \quad B_0 \cap \bar{B} = \emptyset \quad (3)$$

і ймовірність авіаційної пригоди

$$P(\bar{B}_0) = P(\bar{B}) + P(\bar{C}) - P(\bar{B} \cap \bar{C}) \quad (4)$$

Із статистики ІКАО за двадцятилітній період витікає, що тільки 12% авіаційних пригод являються наслідком негативного впливу зовнішніх чинників відносно системи екіпаж-ПС /9% - метеумови, 1% - відсутність контролю зі сторони органу управління повітряним рухом, 2% - неправильна суперечлива інформація органу управління повітряним рухом.

Так як $P(B) \gg P(C)$, то в сенс обмежитися розглядом впливу властивостей системи екіпаж ПС як основної і відносно автономної одиниці повітряно-транспортної системи на безпеку польотів з допомогою окремого критерія, враховуючого в єдності і взаємозв'язку її основні характеристики, по відомих значеннях яких можна визначати, нормувати і прогнозувати ефективність забезпечення безпеки польотів і оптимізувати процес технічного обслуговування і ремонту ПС. Для в'яснення ролі і послідувочої кількісної оцінки кожного елемента авіаційного обладнання в забезпеченні безпеки польотів, розділимо систему екіпаж-ПС на більш прості цільові ергатичні комплекси на основі наступних принципів:

1. Кожний із бортових цільових комплексів на протязі всього польоту повинен вирішувати свою постійну чітко сформульовану задачу, яка не дублюється іншими бортовими комплексами.

2. Всі бортові цільові комплекси у відношенні безпеки польотів вважаються рівнозначними - якщо хоча би один із них свою задачу не вирішує, то безпечного польоту не буде.

Не дивлячись на багатогранність причин інцидентів і авіаційних пригод, із вказаної вище статистики витікає, що безпечний цілеспрямований політ системою екіпаж-ПС забезпечується, якщо на його борту на протязі всього часу польоту вирішуються наступні задачі:

1/ перетворюються необхідні види енергії для створення тяги і живлення бортових систем;

2/ формується безпечна просторово-часова траєкторія польоту;

3/ здійснюється управління ПС відносно його центру мас на заданій просторово-часовій траєкторії;

4/ створюються нормальні умови життєдіяльності людей на борту.

Відповідно сформульованим так задачам, без яких неможливо здійснити безпечний цілеспрямований політ, кожна система екіпаж-ПС підрозділяється на наступні цільові ергатичні комплекси:

1/ енергетичний комплекс;

2/ навігаційний комплекс;

3/ пілотажний комплекс;

4/ життєзабезпечуючий комплекс.

Кожний із виділених таким чином комплексів характеризується множиною взаємозв'язків і елементів, режимів роботи і способів

застосування, складність структури і може відрізнятись по ряду інших ознак, але складна подія, яка полягає в виконанні системою екіпаж-ПС своїх задач,

$$B = B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap B_4, \quad B \cap \bar{B}_i = \emptyset, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (5)$$

де B_i - події, що означають виконання своїх задач бортовими цільовими комплексами.

На основі цього імовірність виконання польоту тривалістю t без особливих ситуацій як критерій цільової ефективності системи екіпаж-ПС

$$E_{\text{енс}}(t) = P(B) = P(B_1)P(B_2/B_1)P(B_3/B_1 \cap B_2)P(B_4/B_1 \cap B_2 \cap B_3), \quad (6)$$

де $P(B_i)$ - умовні імовірності вирішення своїх задач бортовими цільовими ергатичними комплексами.

В силу закону комутативності множин і подій

$$\begin{aligned} P(B_1)P(B_2/B_1)P(B_3/B_1 \cap B_2)P(B_4/B_1 \cap B_2 \cap B_3) &= P(B_2)P(B_3/B_2) \times \\ \times P(B_4/B_2 \cap B_3)P(B_1/B_2 \cap B_3 \cap B_4) &= P(B_3)P(B_4/B_3) \cdot P(B_1/B_3 \cap B_4) \times \\ \times P(B_2/B_1 \cap B_3 \cap B_4) &= P(B_4)P(B_1/B_4)P(B_2/B_1 \cap B_4)P(B_3/B_1 \cap B_2 \cap B_4). \quad (7) \end{aligned}$$

Проте кількісні залежності взаємного впливу систем і комплексів при непрацездатному стані інших бортових цільових комплексів втрачаються. Тому приймається допущення про статистичну незалежність їх відказів і вираз (6) приймає вигляд

$$E_{\text{енс}}(t) = E_1(t)E_2(t)E_3(t)E_4(t). \quad (8)$$

Єдиність і постійність задач, що вирішуються бортовими ергатичними комплексами, дозволяє вважати їх цільову ефективність узагальнюючою зовнішньою характеристикою, яка відображає ступінь відповідності кожного комплексу своєму призначенню в відомих умовах застосування.

Такий підхід дає можливість виділити об'єкт дослідження - НЕК як сукупність елементів, включаючих в себе оператора і всі засоби, що застосовуються для формування безпечної просторово-часової траєкторії з урахуванням інформації органів управління повітряним рухом про параметри польоту ПС і обмежень, наложених на вказану траєкторію.

Таким чином новизна першого назованого результату полягає в декомпозиції системи екіпаж-ПС на бортові цільові ергатичні комплекси, що дає можливість виразити ефективність забезпечення безпеки польотів у вигляді добутку імовірностей вирішення своїх за-

дач енергетичним, навігаційним, пілотажним і життєзабезпечуючим комплексами.

Складаючись з кінцевої множини функціональних систем, блоків і приладів об'єкт дослідження – НЕК характеризується множиною станів

$$M = \{N_i\} = \bigcup_{i=0}^m N_i = N_0 \cup N_1 \cup \dots \cup N_i \dots \cup N_m, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

і можливістю переходу будь-якого елемента із працездатного стану X_i в непрацездатний \bar{X}_i в будь-який момент часу, $i = 1, 2, \dots, K$.

Відсутність необхідних чинників успішного функціонування НЕК-формування безпечної просторово-часової траєкторії означає порушення установлених правил і схем набору висоти, виходу із зони аеродрому, зниження і заходу на посадку, бокового, поздовжнього і вертикального ешелонування, безпечної висоти польоту, втрати орієнтировки, небезпечного зближення ПС в польоті, попадання ПС в зони небезпечних метеоявищ, зіткнення з іншими об'єктами в польоті, посадки з кількістю палива, меншим необхідного для повторного заходу на посадку. Визначення НЕК фактичних і завдання пілотажному комплексу потрібних параметрів режиму польоту ПС з метою його безпечного виводу по установленій або оперативно вибраній і узгодженій з органом управління повітряним рухом траєкторії є складною подією.

$$B_2/B_1 \cap B_3 \cap B_4 = A_1 \cap A_2 \cap A_3, \quad (B_2/B_1 \cap B_3 \cap B_4) \cap A_i = \emptyset, \quad i = 1, 2, 3, \quad (10)$$

де A_1 – подія, яка означає роботоздатність застосовуваних оператором засобів для вирішення навігаційної задачі;

A_2 – подія, яка означає, що похибки засобів аеронавігації і діючі на них збурення дозволяють вирішити навігаційні задачі з потрібною точністю;

A_3 – подія, яка означає, що підготовленому /знаючому що і як робити/ оператору забезпечена необхідна часова надмірність для рішення своїх задач в комплексі.

Звідси цільова ефективність НЕК як критерій, характеризуючий його здатність формувати безпечну просторово-часову траєкторію польоту тривалістю t ,

$$E(t) = P(A_1)P(A_2/A_1)P(A_3/A_1 \cap A_2) = P(t) \Phi(t) R(t), \quad (11)$$

де $P(A_1) = P(t)$ – імовірність безвідказної роботи засобів аеронавігації при даному способі їх застосування;

$P(A_2/A_1) = \Phi(t)$ – імовірність того, що похибки засобів аеронавігації і діючі на них збурення дозволяють вирішити задачу формування безпечної просторово-часової траєкторії польоту з потрібною

точність при умові, що ці засоби працюють безвідказно ;

$P(A_3/A_1 \wedge A_2) = R(t)$ — імовірність того, що при вказаних вище двох умовах у підготовленого оператора не виникне дефіцит часу і його психофізіологічний стан дозволить йому виконувати професійну діяльність. Очевидно в силу комутативності множин і подій

$$P(A_1)P(A_2/A_1)P(A_3/A_1 \wedge A_2) = P(A_2)P(A_3/A_2)P(A_1/A_2 \wedge A_3) = \\ = P(A_3)P(A_1/A_3)P(A_2/A_1 \wedge A_3). \quad (12)$$

Так як кожний бортовий цільовий комплекс має структурно-функціональну надмірність і можливість реалізації ряду режимів роботи і способів застосування, з відказами окремих систем, то критерій відказобезпеки НЕК приймає вигляд

$$P_{НК}(t) = P_0(t) + \sum_{k_1=1}^{K_1} (1 - P_{\alpha}(t)) P_1(t) + \sum_{k_2=1}^{K_2} (1 - P_{\alpha}(t)) (1 - P_{\beta}(t)) P_2(t) + \\ + \sum_{k_3=1}^{K_3} (1 - P_{\alpha}(t)) (1 - P_{\beta}(t)) (1 - P_{\gamma}(t)) P_3(t) + \dots, \quad (13)$$

де $P_{\alpha}(t)$ — імовірність безвідказної роботи комплексу в основному режимі роботи і основному способі застосування його систем при відсутності відказів за час польоту t ;

$P_{\alpha}(t), P_{\beta}(t), P_{\gamma}(t)$ — імовірності безвідказної роботи L, B, Y — систем, що використовуються для вимірювання, обчислення і контролю параметрів траєкторії польоту по висоті, напрямку і дальності ;

$P_1(t), P_2(t), P_3(t)$ — імовірності безвідказної роботи засобів аеронавігації, що використовуються при відказах L, B, Y — систем ;

K_i — ($i = 1, 2, 3 \dots$) — кількість режимів і способів застосування обладнання при відказах L, B, Y — систем.

У функціоналі (13) кожний доданок під знаками сум виражає приріст імовірності безвідказної роботи комплексу за рахунок можливості його застосування в резервних режимах роботи. Ці складові являються кількісними оцінками впливу застосовуваних засобів даними способами на рівень безпеки польотів і разом з першим членом функціоналу кількісно характеризують відказобезпеку бортового комплексу.

Таким чином новизна другого наукового результату полягає в тому, що імовірність безвідказної роботи комплексу виражається функціоналом відказобезпеки, а з відповідними співмножниками функцій точності і надійності оператора функціоналом його цільової ефективності.

У другому розділі приведений аналіз особливостей функціонування НЕК з урахуванням вимог безпеки польотів в аеронавігаційному відношенні. Приведено узагальнення ознак класифікації методів

аеронавігації і НЕК. Для різносторонньої характеристики впливу на ефективність забезпечення безпеки польотів всі задачі, які вирішує оператор НЕК, проаналізовані по змісту, визначеності в часі, значенню, кратності рішень в польоті і виду потрібної діяльності.

Виконана на основі аналізу льотної діяльності екіпажів ПС по аеронавігації класифікація методів, засобів і змісту задач забезпечення безпеки польотів підтверджує правильність обґрунтованих моделей критеріїв відказобезпеки і цільової ефективності і показує, що, не дивлячись на значний ріст рівня автоматизації процесу літаководіння, основна одиниця повітряно-транспортної системи-система екіпаж-ПС повністю автоматичною не становиться, а залишається ергатичною. Це обумовлює необхідність узагальнення відомих і розробки нових методів визначення і підвищення відказобезпеки навігаційного обладнання з урахуванням можливостей і особливостей його застосування екіпажами.

Тому третій розділ вміщує теоретичні узагальнення методів визначення основних експлуатаційних характеристик НЕК. Обґрунтований метод визначення відказобезпеки навігаційного обладнання з урахуванням можливостей їх застосування оператором, так як бажання зменшити наслідки відказів засобів аеронавігації на безпеку польотів привело до росту їх кількості і значної надмірності навігаційної інформації. Проте обробити і використати всю цю інформацію неможливо навіть при наявності обчислювальної техніки на борту.

Людина в силу своєї одноканальності і обмежених можливостей виконувати обчислювальні операції не може одночасно застосовувати для підвищення точності процесу літаководіння декілька справних засобів аеронавігації. Однак вплив функціонального резерву на ефективність процесу літаководіння проявляється через оператора. При цьому, як правило, засоби аеронавігації застосовуються найменш трудомісткими способами, або з найбільшим рівнем автоматизації. В зв'язку з цим знайдена відповідь на запитання — як необхідно контролювати автоматичний режим роботи засобів аеронавігації, коли від оператора не потрібно ніяких дій. В основу відповіді положено те, що мета візуального контролю роботи засобів аеронавігації полягає в коректуванні їх роботи або переході на запасні способи їх застосування при відказах систем і їх

елементів.

Якби повнота контролю застосовуваних засобів $Q = 1$, то оператор при відказі кожного елемента навігаційного обладнання одержував би звукову, світлову чи іншу інформацію без затрати уваги на візуальний контроль. Така інформація могла би бути сигналом до раціональних дій по переходу на інший спосіб застосування навігаційного обладнання. Цей перехід міг би бути і чисто автоматичним. Однак для наявних засобів аеронавігації $Q < 1$. Тому оператор повинен здійснювати візуальний контроль шляхом звірення показань приладів функціонально резервуючих засобів з показаннями приладів, що безпосередньо застосовуються для рішення основної навігаційної задачі, і таким чином доповнювати автоматичний контроль, підвищувати ефективність процесу літаководіння переходом на інші способи застосування і алгоритми роботи.

Таким чином в ергетичних комплексах можна виділити основний /ОЛ/ і контрольний ланцюги /КЛ/ застосовуваних засобів.

Імовірність візуального виявлення неконтрольованого автоматичними пристроями відказу систем $P_{в.к}$ не може перевищувати імовірності безвідказної роботи контрольного ланцюга $P_{к.ц}$, за яку оператор використовує функціонально резервуючі системи, тобто $P_{в.к} \leq P_{к.ц}$.

В той же час відказ систем або відхилення режиму польоту можуть бути виявлені з імовірністю $P_{в.к}$, яка може бути найдена із співвідношення інтенсивностей неконтрольованих автоматично відказів і інтенсивності візуального контролю оператором даного режиму

$$P_{в.к} = 1 - \lambda_{н} / \lambda_{в.к}. \quad (14)$$

Тому інтенсивність візуального контролю оператором параметрів функціонування систем і режиму польоту, при якому максимально використовується надійність функціонального резерву як засобу контролю

$$\lambda_{в.к} = \lambda_{н} / (1 - P_{в.к}). \quad (15)$$

Розкриваючи зміст повноти контролю

$$Q = \sum P_{а.к} / \sum P_{о.л} = \sum \lambda_{а.к} / \lambda_{о.л} = (\lambda_{о.л} - \lambda_{н}) / \lambda_{о.л}, \quad (16)$$

де $P_{а.к}$ - імовірність безвідказної роботи автоматично контролюємої частини систем, застосовуваних в основному ланцюгу даним способом;

$P_{о.л}$ - імовірність безвідказної роботи систем основного ланцюга;

$$\text{одержим } \lambda_{н} = \lambda_{о.л} (1 - Q). \quad (17)$$

Так як $P_{a,l} = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t)$, $\ln P_{a,l} = -\lambda_{a,l} t$, (18)

то $\lambda_{b,k} = \frac{\lambda_{a,l}}{1-P_{k,c}} = \frac{\lambda_{a,l}(1-q)}{1-P_{k,l}} = -\frac{(1-q)\ln P_{a,c}}{t(1-P_{k,c})}$. (19)

Найдене по цій формулі значення $\lambda_{b,k}$ являється максимально можливим з точки зору максимального використання інформації від засобів контрольного ланцюга.

Тому циклічна складова завантаженості оператора повинна бути обмежена з урахуванням верхньої допустимої границі його загальної завантаженості

$$\sum \lambda_{b,k} = \lambda_{b,k} \tau_{b,k} = -\frac{\tau_{b,k}(1-q)\ln P_{a,l}}{t(1-P_{k,l})}, \quad (20)$$

де $\tau_{b,k}$ - тривалість однократного візуального контролю.

При співставленні показань приладів основного ланцюга з показаннями приладів контрольного ланцюга достовірність візуального контролю

$$D_{b,k} = P_0 P_k + [P_0(1-P_k) + (1-P_0)P_k] P_d, \quad (21)$$

де P_0 - імовірність безвідказної роботи основного приладу;

P_d - імовірність безвідказної роботи додаткового засобу, що використовується як арбітр при розбіжності в показаннях вказаних приладів;

P_k - імовірність безвідказної роботи контрольного приладу.

При цьому допуск на розходження в показаннях основного і контрольного приладів або навігаційних визначень

$$\Delta_{\text{доп}} = 2 \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_k^2}, \quad (22)$$

де σ_0 - середньоквадратична похибка вимірювання параметру основним приладом.

σ_k - середньоквадратична похибка вимірювання того ж параметру контрольним приладом.

З урахуванням повноти контролю критерій відказобезпеки НЕК має вигляд $P_{НК}(t) = P_0(t) + \sum_{\alpha=1}^{K1} (1-P_{\alpha}^{q_{\alpha}}(t)) P_1(t) + \sum_{\alpha, \beta=1}^{K2} (1-P_{\alpha}^{q_{\alpha}}(t)) \times$
 $\times (1-P_{\beta}^{q_{\beta}}(t)) P_2(t) + \sum_{\alpha, \beta, \gamma=1}^{K3} (1-P_{\alpha}^{q_{\alpha}}(t)) (1-P_{\beta}^{q_{\beta}}(t)) (1-P_{\gamma}^{q_{\gamma}}(t)) P_3(t) \dots (23)$

Таким чином новизна третього наукового результату полягає в тому, що безвідказність і відказобезпека навігаційного обладнання визначається з урахуванням можливості і особливостей його порежильного застосування способами у вигляді сукупностей основних ланцюгів засобів контролю шляху по висоті, напрямку і дальності, і контрольних ланцюгів, що складаються із аналогічних або близь-

ких по призначенню засобів, які служать для візуального контролю працездатності основних ланцюгів з визначеною інтенсивністю як функцією їх безвідказності, повноти і достовірностей контролю.

Так як співмножник $\Phi(t)$ критерію (II) характеризує можливість НЕК функціонувати певний відрізок часу в межах допустимих відхилень ПС без участі оператора, то в роботі обгрунтований метод визначення точності процесу аеронавігації з урахуванням взаємозв'язку бокових, поздовжніх і вертикальних відхилень ПС від заданої траєкторії на повітряних трасах зі зломами, характерних для цивільної авіації.

На основі рівнянь зчислення шляху як безперервних функцій часу з урахуванням незалежності середньоквадратичних похибок /СКП/ визначення координат навігаційної програми $\sigma_{zпм}$, $\sigma_{sпм}$, шляхової швидкості σ_w , курсу σ_k , заданого шляхового кута $\sigma_{зшк}$ і кута зносу $\sigma_{kз}$ одержані наступні вирази для визначення бокових і поздовжніх відхилень ПС від лінії заданого шляху /ЛЗШ/:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \sigma_z^2(t) = \sigma_{zп}^2 + (\sigma_w t \sin(K+Kз-3ШК))^2 + (\sigma_k W t \cos(K+Kз-3ШК))^2 \\ &+ (\sigma_{kз} W t \cos(K+Kз-3ШК))^2 + (\sigma_{зшк} W t \cos(K+Kз-3ШК))^2, \\ \sigma_s^2 &= \sigma_s^2(t) = \sigma_{sпм}^2 + (\sigma_w t \cos(K+Kз-3ШК))^2 + (\sigma_k W t \sin(K+Kз-3ШК))^2 \\ &+ (\sigma_{kз} W t \sin(K+Kз-3ШК))^2 + (\sigma_{зшк} W t \sin(K+Kз-3ШК))^2, \end{aligned} \quad (24)$$

де СКП вимірювання курсу складається із СКП початкової виставки курсової системи і СКП азимутальної з виходу курсового гіроскопу

$$\sigma_k^2 = \sigma_{кн}^2 + (\sigma_w t / \rho)^2. \quad (25)$$

При $K + Kз - 3ШК = 0$, що справедливо для прямих відрізків повітряних трас, бокова і поздовжня СКП зчислення шляху

$$\begin{aligned} \sigma_{zп}^2 &= \sigma_{zпм}^2 + (Wt)^2 (\sigma_{кн}^2 + (\sigma_w t / \rho)^2 + \sigma_{kз}^2 + \sigma_{зшк}^2), \\ \sigma_{sп}^2 &= \sigma_{sпм}^2 + (\sigma_w t)^2, \end{aligned} \quad (26)$$

в відстань і час подорожу між точками корекції зчислених координат:

$$S_{кп} = \sqrt{\frac{\sigma_{zд}^2 - \sigma_{zк}^2}{\sigma_{кн}^2 + (\sigma_w t / \rho)^2 + \sigma_{kз}^2 + \sigma_{зшк}^2}} \quad (27) \quad (28)$$

$$t_{кп} = \sqrt{2W^4(\sigma_{кн}^2 + \sigma_{kз}^2 + \sigma_{зшк}^2) + (W\sigma_w)^2(\sigma_{zд}^2 - \sigma_{zк}^2) - 2W(\sigma_{кн}^2 + \sigma_{kз}^2 + \sigma_{зшк}^2) / W\sigma_w},$$

де $\sigma_{zд}$ - допустиме середньоквадратичне ЛВВ ПС від ЛЗШ, що визначається по відомій ширині повітряної траси $2b$ із залежності $\Phi(b/\sigma_{zд})$ при нормальному законі розподілу відхилень ПС від ЛЗШ або із формули оцінки гарантійної імовірності знаходження ПС в межах траси

$$\inf \Phi = \Phi_r = 1 - 4/9 \sigma_{zд}^2 / (b - m_z)^2 \quad (29)$$

Ця формула одержана на основі нерівності Кемп-Мейдель і використовується для визначення функції точності процесу аеронавігації з одно-, дво-, трьох- і чотирьохмірними обмеженнями

$$\Phi(t) = \begin{cases} P(zc|B) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(z, s, H) dz ds dH, \\ P((z, H) \in A) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(z, s, H) dz ds dH, \\ P((z, s, H) \in V) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(z, s, H) dz ds dH, \\ P(z(t), s(t), H(t) \in V(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(z(t), s(t), H(t)) dz(t) ds(t) dH(t). \end{cases} (30)$$

Доцільність використання формули (29) обумовлюється тим, що ЛВВ ПС від ЛЗШ, як і інші навігаційні елементи, задовольняють наступним умовам:

- 1/ їх розподіл може мати одну або декілька мод;
- 2/ єдина або найбільша мода приблизно дорівнює математичному очікуванню m_z ;
- 3/ частоти розподілу спадають безперервно, хоча можливо неоднаково по обох сторонах від моди.

Для цивільної авіації характерним являється те, що польоти здійснюються по прямих коротких ділянках повітряних трас, з'єднаних між собою під певними кутами розвороту вліво і вправо, в середньому рівними 30° .

Бокові і поздовжні похибки зчислення шляху на кожній прямій ділянці повітряної траси являються незалежними випадковими величинами з нульовими математичними очікуваннями і рівномірними відхиленнями ПС вліво і вправо від осі повітряної траси.

Виходячи з цього, в системі прямокутних ортодромічних координат ZOS бокове і поздовжнє відхилення ПС від заданої просторово-часової траєкторії на i -й ділянці шляху

$$\Delta z_i = \Delta z_{i-1} \cos KPi - \Delta s_{i-1} \sin KPi + \Delta z_{in}, \quad (31)$$

$$\Delta s_i = \Delta s_{i-1} \cos KPi + \Delta z_{i-1} \sin KPi + \Delta s_{in},$$

де $\Delta z_{i-1}, \Delta s_{i-1}$ - бокове і поздовжнє відхилення ПС від заданої траєкторії на i -й ділянці шляху перед розворотом;

KPi - кут розвороту ПС на i -у ділянцю шляху;

$\Delta z_{in}, \Delta s_{in}$ - бокове і поздовжнє відхилення ПС на i -й прямій ділянці шляху.

Застосовуючи операцію математичного очікування і зводячи до квадрату рівняння (31), маємо наступні вирази для визначення дисперсій бокового і поздовжнього відхилень ПС від ЛЗШ:

$$\sigma_{zi}^2 = (\sigma_{zi-1} \cos KPi)^2 + (\sigma_{si-1} \sin KPi)^2 - 2K_{i-1} \sin KPi \cos KPi,$$

$$\sigma_{si}^2 = (\sigma_{si-1} \cos KPi)^2 + (\sigma_{zi-1} \sin KPi)^2 + 2K_{i-1} \sin KPi \cos KPi, \quad (32)$$

де $K_{i-1} = M[\Delta z_{i-1} \Delta s_{i-1}]$.

Перемножуючи рівняння (31)

$$\begin{aligned} \Delta z_i \Delta s_i &= \Delta z_{i-1} \Delta s_{i-1} (\cos^2 KPi - \sin^2 KPi) + \\ &+ (\Delta z_{i-1}^2 - \Delta s_{i-1}^2) \sin KPi \cos KPi + \Delta \sin (\Delta z_{i-1} \cos KPi - \\ &- \Delta s_{i-1} \sin KPi) + \Delta z_{in} (\Delta z_{i-1} \sin KPi + \Delta s_{i-1} \cos KPi) + \Delta z_{in} \Delta \sin \end{aligned} \quad (33)$$

і застосовуючи до них операцію математичного очікування,

маємо

$$K_i = K_{i-1} (\cos^2 KPi - \sin^2 KPi) + \sigma_{zi-1}^2 \sigma_{si-1}^2 \sin KPi \cos KPi. \quad (34)$$

Із приведених рівнянь витікає, що лінійне бокове відхилення ПС від лінії заданого шляху як функція кореляційного моменту і кута розвороту буде мінімальним

$$\sigma_{zi} = f(K_{i-1}, KPi) = \min, \quad (35)$$

$$\text{при } K_i = \frac{(\sigma_{zi} \cos KPi)^2 + (\sigma_{si-1} \sin KPi)^2}{2 \cos KPi \sin KPi}, \quad (36)$$

$$KPi = \arctg \frac{\sigma_{zi-1} - \sigma_{si-1} \pm \sqrt{\sigma_{zi-1}^2 - \sigma_{si-1}^2 + 4K_i}}{2K_{i-1}}$$

Перенесені з $(i-1)$ -ї ділянки шляху на i -у ділянку похибки зчислення шляху в середньоквадратичних значеннях параметрів виражені рівняннями:

$$\sigma_{zih} = (\sigma_{zi-1} \cos KPi)^2 + (\sigma_{si-1} \sin KPi)^2 + \sigma_{znp}^2,$$

$$\sigma_{sih} = (\sigma_{si-1} \cos KPi)^2 + (\sigma_{zi-1} \sin KPi)^2 + \sigma_{snp}^2, \quad (37)$$

де $\sigma_{znp}, \sigma_{snp}$ - СКП перетворення координат навігаційним обчислювачем.

СКП зчислення координат в процесі руху ПС по криволінійній траєкторії на розвороті:

$$\begin{aligned} \sigma_{zkr}^2 &= (\sigma_w \int_{t_1}^{t_2} \sin \alpha(t) dt)^2 + (\sigma_k \int_{t_1}^{t_2} \cos \alpha(t) dt)^2 \times \\ &\times (\sigma_{k3w} \int_{t_1}^{t_2} \cos \alpha(t) dt)^2 + (\sigma_{3wk} \int_{t_1}^{t_2} \sin \alpha(t) dt)^2; \quad (38) \end{aligned}$$

$$\sigma_{zkr}^2 = \left(\sigma_w \int_{t_1}^{t_2} \cos \Delta(t) dt \right)^2 + \left(\sigma_w W \int_{t_1}^{t_2} \sin \Delta(t) dt \right)^2 + \\ + \left(\sigma_{k3} W \int_{t_1}^{t_2} \sin^2 \Delta(t) dt \right)^2 + \left(\sigma_{3шк} W \int_{t_1}^{t_2} \sin \Delta(t) dt \right)^2$$

$$\text{де } \Delta(t) = K(t) + K3(t) - 3ШК$$

Після перетворень для розрахунків ці рівняння мають вигляд:

$$\sigma_{zkr}^2 = \left(\sigma_w \frac{t_{kp}}{n} \sum_{i=1}^n \sin \Delta_i \right)^2 + (4,75 \cdot 10^{-2} W \frac{t_{kp}}{n} \sum_{i=1}^n \cos \Delta_i)^2 (\sigma_k^2 + \sigma_{k3}^2 + \sigma_{3шк}^2);$$

$$\sigma_{skp}^2 = \left(\sigma_w \frac{t_{kp}}{n} \sum_{i=1}^n \cos \Delta_i \right)^2 + (4,75 \cdot 10^{-2} W \frac{t_{kp}}{n} \sum_{i=1}^n \sin \Delta_i)^2 (\sigma_k^2 + \sigma_{k3}^2 + \sigma_{3шк}^2);$$

$$\text{де } \Delta_i = K_i + K3 - 3ШК;$$

n - кількість відрізків криволінійної траєкторії, які приймаються за прямолінійні;

t_{kp} - час польоту ПС по криволінійній траєкторії.

Із рівнянь (39) витікає, що при польоті по колу, коли кут розвороту $KP = 360^\circ$,

$$\sum_{i=1}^n \cos \Delta_i = \sum_{i=1}^n \sin \Delta_i \quad ; \quad \Delta_{zkr} = \Delta_{skp} = 0. \quad (40)$$

Таким чином при польоті по замкнутій траєкторії похибки зчислення шляху компенсуються повністю, а на повітряних трасах частково. СКП літаководіння в трьохмірному просторі виражаються слідуючою системою рекурентних рівнянь:

$$\sigma_{zab} = (\sigma_{zi-1} \cos KP_i)^2 + (\sigma_{si-1} \sin KP_i)^2 + \sigma_{znp}^2 + \sigma_{zkr}^2 + \sigma_{zл}^2 + \sigma_{zшк}^2;$$

$$\sigma_{snb} = (\sigma_{si-1} \cos RP_i)^2 + (\sigma_{zi-1} \sin RP_i)^2 + \sigma_{snp}^2 + \sigma_{skp}^2 + \sigma_{sn}^2;$$

$$\sigma_{h_{ab}} = (\sigma_{si} (H_2 - H_1) / S)^2 + \sigma_{bb}^2 + \sigma_{h_{шк}}^2, \quad (41)$$

де $\sigma_{zшк}, \sigma_{h_{шк}}$ - СКП пілотування ПС по боковому каналу і висоті;

H_1, H_2 - початкове і кінцеве значення висоти польоту на ділянці маршруту довжиною S_i ;

σ_{bb} - СКП вимірювання висоти польоту.

Приведені співвідношення дозволяють визначити точність процесу аеронавігації ПС в кожному перерізі траєкторії польоту і попередньо розрахувати інтервали корекції координат на кожній повітряній трасі, скоротити число корекцій і відповідно час польотів, оперативно оцінювати відповідність точності навігаційного обладнання своїм нормам, знайти складову завантаженості оператора рішенням цих задач.

Таким чином новизна четвертого наукового результату полягає у врахуванні з допомогою системи рекурентних рівнянь взаємного впливу бокових, поздовжніх і вертикальних відхилень ПС від за-

даної просторово-часової траєкторії польоту і установленні закономірності накопичення похибок зчислення шляху на повітряних траєкторіях зі зломами.

У відповідності до функціоналу (13) для визначення його третього співмножника процес роботи оператора описаний у вигляді стохастичної послідовності тривалостей розв'язування різних задач і зміст третього співмножника критерія T_{ki} (II) має вигляд

$$J_m(\tau_{ki} \leq T_{ki}) = R_i(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad (42)$$

де τ_{ki} - випадкова тривалість рішення оператором задачі, обумовлена кількістю і характером допущених ним помилок при виконанні окремих операцій, його кваліфікацією, часом реакції і іншими психофізіологічними якостями;

T_{ki} - відведений для рішення задачі час, який залежить від технічних характеристик комплексу. Затрачений в процесі функціонування НЕК час оператором К на подію і включає в себе наступні складові: $\tau_{ki}^{(0)}$ - тривалість відпочинку /паузи/; $\tau_{ki}^{(02)}$ - тривалість очікування на реакцію обладнання, коли воно працює автоматично без його участі; $\tau_{ki}^{(p)}$ - тривалість рішення задачі, що складається з часу звернення уваги, сприйняття інформації, прийняття рішення і дії.

Ці параметри в процесі експлуатації характеризують динамічну завантаженість оператора

$$S(t) = \frac{\tau_{ki}^{(02)} + \tau_{ki}^{(p)}}{T_{ki}(t)} = \frac{\tau_{ki}}{T_{ki}(t)}. \quad (43)$$

Із розгляду оператора як системи масового обслуговування одержана залежність

$$R(s) = \frac{1 - \exp(-1 - 1/s)}{1 - s \exp(-1 - 1/s)}. \quad (44)$$

Проте потоки задач, які розв'язує в польоті оператор, не являються ординарними, стаціонарними і без післядії. Тому ця залежність уточнена методами статистичного моделювання на основі результатів, що зміщені в четвертий і п'ятий розділ дисертації.

В четвертому розділі приведені методи і результати дослідження завантаженості екіпажів ПС рішенням навігаційних задач. Описана розроблена методика експериментального дослідження завантаженості операторів ПС в транспортних польотах, яка об'єднує відомі засоби запису елементів діяльності оператора з реєстрацією на спеціальний магнітофон кодів початку, змісту і закінчення вирішуваних задач з послідувочою розшифровкою і наглядним зображен-

ням тривалостей на смужці самописця.

Експериментально знайдені кількості розв'язувань задач кожного потоку /повідомлень: командир-екіпаж, штурман-екіпаж, пілот-екіпаж, бортінженер-екіпаж, пілот/командир/-диспетчер, штурман-диспетчер, екіпажі інших ПС - диспетчер; візуального і радіолокаційного обзору передньої півсфери і місцевості, ведення бортового журналу, виконання розрахунків на навігаційній лінії, контролю положення і руху ПС по приладах, установки даних на задатчиках і індикаторах навігаційних систем/ розподілені по інтервалах часу польоту і описані рівняннями інтенсивностей розв'язування задач кожного потоку.

П'ятий розділ вміщує результати дослідження законів розподілу тривалостей розв'язування навігаційних задач і залежностей імовірності виконання оператором навігаційних задач від його завантаженості.

В статистичних моделях тривалостей прийому і передачі повідомлень і рішення розглянутих вище навігаційних задач використані одержані в процесі льотних досліджень дані, представлені у вигляді рядів і гістограм. Статистики тривалостей розв'язування оператором задач описані двохпараметричними законами розподілу з правосторонніми подовженнями, наявність яких пояснюється тим, що оператор допускає помилки при виконанні окремих операцій. По стандартній програмі на ЕОМ визначені наступні характеристики: відповідність вибірки тривалостей рішення оператором кожної задачі даному закону розподілу, симетричні довірвальні інтервали для математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень з довірвальною імовірністю 0,95, дисперсія, третій, четвертий і п'ятий центральні моменти, значення критерію Колмогорова і Пірсона, середини 20 інтервалів, на які розділені розмахи варіації, кількість попадань випадкової величини в кожний інтервал, частоти, значення емпіричної і теоретичної функцій щільності, емпіричної і теоретичної функцій розподілу тривалостей рішення оператором задач.

Залежність імовірності рішення оператором кожної задачі від його динамічної завантаженості визначена методом Монте-Карло за допомогою розробленого алгоритму, в якому використані експериментальні дані безпосередньо з гістограм. Із залежностей імовірності вирішення оператором задач від завантаженості, що мають вигляд

$$R(S) = \begin{cases} -0,272 \cdot 10^{-2} S^3 + 0,889 \cdot 10^{-1} S^2 - 0,740 S + 1,202, \\ \sqrt{S} = 0,00 \dots 0,26, & \sqrt{S} = 0,26 \dots 0,9 \end{cases} \quad (45)$$

витає, що завантаженість оператора по верхній границі повинна обмежуватися помітним збільшенням допущених оператором помилок при виконанні операцій.

Таким чином по набору функцій розподілу тривалостей рішення оператором задач і відведеного для цього часу, які відбивають структуру робіт оператора при відомих характеристиках надійності, точності і повноти контролю застосовуваних систем НЕК в даних умовах, можна одержати оцінки імовірності вирішення оператором кожної із задач, що властиві його професії, з заданою точністю.

Таким чином новизна п'ятого наукового результату полягає в обґрунтуванні і експериментальному дослідженні в польотах динамічної завантаженості оператора як узагальнюючої характеристики його діяльності в ергатичному комплексі і установленні залежності імовірності вирішення оператором задач від його завантаженості процесом розв'язування навігаційних задач.

У шостому розділі описані способи відказобезпечного застосування засобів аеронавігації у відповідності з критерієм цільової ефективності НЕК

$$E_2(t) = P_0(t) \Phi_0(t) R_0(t) + \sum_{\alpha=1}^{K1} (1 - P_{\alpha}^{q\alpha}(t)) P_1(t) \Phi_1(t) R_1(t) + \\ + \sum_{\alpha, \beta=1}^{K2} (1 - P_{\alpha}^{q\alpha}(t)) (1 - P_{\beta}^{q\beta}(t)) P_2(t) \Phi_2(t) R_2(t) + \sum_{\alpha, \beta, \gamma=1}^{K3} (1 - P_{\alpha}^{q\alpha}(t)) \times \\ \times (1 - P_{\beta}^{q\beta}(t)) (1 - P_{\gamma}^{q\gamma}(t)) P_3(t) \Phi_3(t) R_3(t) + \dots \quad (46)$$

Ці способи відрізняються від відомих тим, що на основі априорних відомостей про точність і надійність засобів літаководіння із всієї їх сукупності виділяють два ланцюги визначення навігаційних елементів польоту по висоті, напрямку і дальності: основний ланцюг, ланки якого складають найбільш точні засоби, з допомогою яких утримують режим польоту; і контрольний ланцюг, який складається із таких же або менш точних засобів, з допомогою яких візуально контролюють працездатність засобів основного ланцюга для визначення можливих відказів його елементів і переходу на інші способи застосування засобів літаководіння; при цьому допуск на розходження в показаннях приладів вказаних ланцюгів і аеронавігаційних визначень утримують як функцію їх точності, а при розходженні показань цих приладів, більшому ніж до-

допуски, для виявлення відказавшого засобу застосовують додатковий засіб із резерву або знаходять необхідний навігаційний елемент із функціональної залежності з параметрами, визначеними перевіреними на працездатність засобами основного і контрольного ланцюгів; по одержаному ряду аеронавігаційних визначень відказавшим засобом признають той, з допомогою якого одержаний результат, який найбільше відрізняється від серединного значення; припиняють застосовувати відказавший засіб і вказаними вище операціями змінюють структури основного і контрольного ланцюгів для подальшого формування безпечної просторово-часової траєкторії польоту.

Показник відказобезпеки типового комплексу перспективного навігаційного обладнання ПС, яке складається із трьох систем повітряних сигналів СПС, трьох інерціальних систем ІНС, двох обчислювальних систем літаководіння ОСЛ і двох радіотехнічних засобів корекції зчислених координат РЗК з середнім напрацюванням однієї системи на відказ $T_1 = 5000$ ч, в трьохгодинному польоті має значення

$$P_{\text{ІНК}}(t) = 0,9940 + 0,598127 \cdot 10^{-2} + 0,215905 \cdot 10^{-5} = 0,99998,$$

де перший доданок характеризує безвідказність комплексу основним способом застосування. Другий доданок характеризує приріст імовірності безвідказної роботи комплексу 16 способами з відказами одної із систем в кожній ланці ланцюга ЗСПС-ЗІНС-2ОСЛ-2РЗК. Третій доданок характеризує приріст імовірності безвідказної роботи комплексу послідовними 17 способами, які реалізуються при умові, що в кожній ланці працездатна хочаб одна система.

Таким чином новизна шостого наукового результату полягає в способах застосування навігаційного обладнання структурами основних і контрольних ланцюгів, в яких кожна структура характеризується імовірностями безвідказної роботи як показниками впливу застосовуваних систем на рівень безпеки польотів.

ВИСНОВКИ

1. Необхідні умови забезпечення безпеки польотів в аеронавігаційному відношенні системою екіпаж-ПС виражені функціоналом цільової ефективності НЕК у вигляді суми добутків імовірностей стану навігаційного обладнання, визначення параметрів просторово-часової траєкторії польоту з заданою точністю і забезпечення часовою надмірністю оператора при вирішенні навігаційних задач, які являються функціями відомих і контрольованих в процесі експлуатації авіаційної техніки параметрів і динамічної завантаженості

оператора застосуванням засобів аеронавігації.

2. Відказобезпека навігаційного обладнання ПС з урахуванням можливостей його застосування оператором визначена у вигляді сукупності основних ланцюгів, які складаються з послідовно з'єднаних систем, необхідних для літаководіння, і контрольних ланцюгів, які складаються із аналогічних або близьких по призначенню систем, які служать для візуального контролю працездатності основних ланцюгів з інтенсивністю, залежною від імовірності їх безвідказної роботи і повноти контролю.

3. Розроблений рекурентний метод визначення взаємозв'язаних бокових, поздовжніх і вертикальних відхилень ПС від заданої просторово-часової траєкторії і підтвердуючі його експериментальні дані свідчать, що аеронавігація між двома послідовними точками корекції зчислених координат представляє собою нестационарний випадковий процес з ростучою дисперсією, яка на діючих повітряних трасах зі зломами в середньому в 2...3 рази менше, ніж на прямих маршрутах.

4. За узагальнюючу кількісну характеристику діяльності оператора НЕК, побічно враховуючу його психофізіологічний стан і яка піддається визначенню в умовах експлуатації авіаційної техніки, прийнята динамічна завантаженість як функція інтенсивностей потоків задач на даному відрізку часу і закону розподілу тривалостей їх рішення з урахуванням помилок оператора і повторних дій по їх виправленню.

5. Експериментальні дослідження завантаженості екіпажів ПС процесом аеронавігації по розробленій методиці в рейсових польотах показують, що інтенсивності розв'язування оператором НЕК задач всіх потоків від зльоту до посадки ПС описуються рівняннями регресії першого-третього порядків; при цьому динамічна завантаженість навігатора прийомом і передачею повідомлень по системі внутрішнього зв'язку ПС на етапах зльоту і посадки виростає до 0,36, а з урахуванням радіообміну між диспетчерами і екіпажами інших ПС—до 0,8, що приводить до помилок при виконанні операцій згідно технології роботи і перервам в фільтрації по змісту інформації.

6. На основі статистичних даних про тривалість вирішення оператором різних по змісту навігаційних в виробничих польотах установлено, що їх розподіли значно відрізняються між собою і не мають властивостей простішого пуассонівського потоку; статистичні дані про тривалість розв'язування оператором навігаційних задач з урахуванням

помилки, які допускаються при виконанні окремих операцій і їх сукупностей, задовільно описуються двохпараметричними законами розподілу з правосторонніми подовженнями.

7. Залежність імовірності виконання оператором своїх задач в ергатичному комплексі від його завантаженості з потрібною точністю визначена методом статистичного моделювання роботи оператора по створеному алгоритму, в якому враховуються випадкова тривалість виконання операцій і випадковий відведений для цього час, визначені експериментально в польотах.

8. При завантаженості менше 0,3 підготовлений оператор практично не знижує імовірності виконання ергатичним комплексом своєї задачі, при завантаженості 0,3...1 залежність імовірності вирішення оператором задач від завантаженості падає значно менше, ніж це витікає із аналізу його роботи як системи масового обслуговування; надійність виконання задач оператором в екіпажі визначена з урахуванням підстраховки одного оператора іншим.

9. Обґрунтовані способи відказобезпечного комплексного застосування структурно і функціонально резервованих засобів еро-навігації, який відрізняється тим, що з метою підвищення ефективності НЕК в забезпеченні безпеки польотів, оператором на основі априорних зведень про точність систем в даних умовах польоту, застосовуються два ланцюги визначення одних і тих же або близьких по своєму значенню параметрів: основний ланцюг, з допомогою якого видержують режим польоту, і контрольний ланцюг, який складається із таких же або менш точних систем і едужить для виявлення відказів ланки основнаго ланцюга шляхом візуального контролю і співставлення показань приладів основнаго і контрольнаго ланцюгів і переходу на інший спосіб застосування засобів еро-навігації при відказах ланки основнаго ланцюга.

10. Оцінка стану навігаційного обладнання РС по якості функціонування в польотах об'єднує в собі елементи структурних стратегій технічного обслуговування авіаційної техніки по стану і по рівню надійності і дозволяє обслуговувати обладнання тільки тоді, коли це дійсно необхідно при відказах і відхиленнях в роботі без використання спеціальних засобів контролю і діагностики, причому з визначеною ефективністю забезпечення безпеки польотів в еронавігаційному відношенні.

11. Економічну доцільність зміни експлуатаційних характеристик НЕК і способів їх застосування слід визначити по рішенні

довжин фактичного шляху ПС і витікаючої звідси економії льотно-го часу при заданій безпеці польотів в аеронавігаційному відношенні.

12. Основними шляхами підвищення ефективності процесу експлуатації НЕК являються : 1/ виконання польотів в режимах автоматизованого літаководіння з корекцією координат ПС в розрахованих рекурентним методом точках повітряних трас, що дозволяє забезпечити потрібну гарантійну імовірність знаходження ПС в межах допустимих бокового і поздовжнього відхилень відносно заданої просторово-часової траєкторії, наперед спланувати і забезпечити порядок роботи екіпажу по аеронавігації, зменшити кількість можливих бокових переміщень ПС відносно лінії заданого шляху, оперативно визначати відповідність фактичної точності застосовуваних засобів їх нормативним значенням; 2/ відказобезпечне /комплексне/ застосування навігаційного обладнання способами основних і контрольних ланцюгів; 3/ оцінювання стану навігаційного обладнання по якості його функціонування в польотах; 4/ зниження вантаженості екіпажів ПС веденням зв'язку з диспетчерами; 5/ підвищення точності визначення і комплексна обробка навігаційних параметрів.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В НАСТУПНИХ РОБОТАХ:

1. Денисов В.Г., Козарук В.В. Эргономические вопросы эксплуатации воздушных судов. Учебное пособие для вузов ГА. Киев : КИИГА, 1975. 164 с.

2. Денисова В.Г., Козарук В.В. Характеристики потоков речевой информации в системе внутренней и внешней связи воздушного судна. Кибернетика и вычислительная техника. Об. научн. тр. Киев: Наукова думка, 1976. 7 с.

3. Козарук В.В. Комплекс бортового оборудования самолета Ту-154 и его эксплуатация. Учебное пособие для вузов ГА. М.: Машиностроение, 1975. 328 с.

4. Козарук В.В. Общие свойства эргатических навигационных комплексов. Вопросы авиационной эргономики. Об. научн. тр. Киев: КИИГА, 1972. 5с.

5. Козарук В.В. Техническая эксплуатация навигационных комплексов. Учебное пособие для вузов ГА. Киев: КИИГА, 1975. 116 с.

6. Козарук В.В. Критерий определения и прогнозирования полетов без особ. ситуаций. Проблемы безопасности полетов. Журн. М.: ВМИИИ, 1979, № 6 с.

7. Козарук В.В. Мера качества навигационных эргатических комплексов и процесса навигации воздушных судов. Авиационная эргономика. Сб. научн. тр. Киев: КИИГА, 1979. 6 с.

8. Козарук В.В. Основы навигации воздушных судов. Учебное пособие для вузов ГА. Киев: КИИГА, 1980. 84 с.

9. Козарук В.В. Метод определения и прогнозирования влияния операторов систем экипаж-воздушное судно на безопасность полетов. Проблемы безопасности полетов. Журн. М.: ВИНТИ, 1980, № 8. 7 с.

10. Козарук В.В. Стратегия технической эксплуатации навигационного оборудования по качеству функционирования эргатических комплексов. Аппаратура и методы эргономических исследований в гражданской авиации. Сб. научн. тр. Киев: КИИГА, 1981. 6 с.

11. Козарук В.В. Соотношения между основными эксплуатационными характеристиками навигационных комплексов воздушных судов. Авиационная эргономика и летный труд. Сб. научн. тр. Киев: КИИГА, 1976. 7 с.

12. Козарук В.В. Стратегия технической эксплуатации авиационного оборудования по качеству функционирования. Проблемы безопасности полетов. Журн. М.: ВИНТИ, 1980. 11 с.

13. Козарук В.В. Достоверность визуального контроля и допуски на расхождение в показаниях навигационно-пилотажных приборов в полете. Эргономические особенности первоначального этапа освоения авиационной техники. Сб. научн. тр. Киев: КИИГА, 1989. 6 с.

14. Козарук В.В. Способ определения технического состояния навигационного оборудования. Описание изобретения №4736977 с приоритетом от 03.07.1988, решение от 11.06.1991. 10 с.

15. Козарук В.В. Отказобезопасность базовых комплексов стандартного пилотажно-навигационного оборудования. Эргономическая оценка эргатических систем. Сб. научн. тр. Киев: КИИГА, 1990. 7 с.

16. Козарук В.В. Критерии и методы определения надежности и отказобезопасности навигационно-пилотажного оборудования и оценки его влияния на безопасность полетов. В кн.: Навигационно-пилотажный комплекс самолета Ту-154 и его эксплуатация. Учебное пособие для вузов ГА. М.: Машиностроение, 1993. 290 с.

17. Козарук В.В., Котенко П.С. Алгоритм оперативного устранения некоторых отказов навигационных комплексов воздушных судов. Автоматизированные бортовые системы управления. Сб. научн. тр. Киев: КИИГА, 1975. 8 с.

18. Козарук В.В., Ребо Я.Ю. Навигационные эргатические комплексы самолетов. М.: Машиностроение, 1986. 288 с.

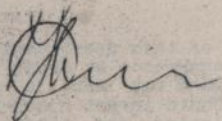
19. Козарук В.В., Хрисанов С.М. Об оценке точности выполнения задания в авиационных эргатических системах. Эргатические системы управления. Об. научн. тр. Киев: ИИ АН УССР, 1978. 7 с.

20. Техническая эксплуатация пилотажно-навигационных комплексов. Учебное пособие для вузов ГА. Авт. В.Г.Денисов, В.В.Козарук В.В., В.С.Новиков, Н.М.Савченко, А.В.Скрипец . М.: Транспорт, 1992. 296 с.

21. Эксплуатация авиационного оборудования и безопасность полетов. Учебное пособие для вузов ГА. Авт. В.Г.Денисов, В.В.Козарук, А.С.Кураев, М.И.Пальчих, И.М.Синдеев. М.: Транспорт, 1979. 240 с.

22. Грибов В.М., Козарук В.В. Основы теории надежности авиационной техники. Киев: КИИГА, 1994. 267 с.

23. Козарук В.В., Щепилов Ю.Н. Оценка эффективности применения навигационно-пилотажных приборов методом экспертного опроса. Эргономика и труд в гражданской авиации. Об. научн. тр. Киев: КИИГА, 1984. 6 с.



Диссертация на тему "Эффективность навигационного обеспечения безопасности полетов системы экипаж-воздушное судно".

В работе выполнена декомпозиция системы экипаж-воздушное судно на бортовые целевые эргатические комплексы энергетики, навигации, пилотирования и жизнеобеспечения и выделен объект исследования навигационный эргатический комплекс /НЭК/. Изложены теоретические обобщения методов определения основных эксплуатационных характеристик НЭК, влияющих на безопасность полетов: безотказности и отказобезопасности с учетом возможности и особенностей применения оператором /экипажем/ навигационного оборудования, точности систем НЭК и процесса аэронавигации на воздушных трассах и необходимой при этом работы оператора с оценкой надежности ее выполнения. Разработаны методы определения динамической загруженности операторов, дающие возможность оценивать их операционную надежность, необходимую для совершенствования технологий работы экипажей воздушных судов.

Создана единая мера качества НЭК и процесса аэронавигации, с помощью которой обоснованы способы отказобезопасности применения и оперативного определения состояния средств аэронавигации для повышения эффективности применения воздушных судов и безопасности полетов.

The topic of this dissertation is "Efficiency of navigation flight safety ensurance by means of crew-aircraft system".

In this work was made a decomposition of crew-aircraft system on the board target human-machinery complex of energetics, navigation, piloting and lifesecurity. Was distinguished the object of investigation the human-machinery navigation complex (HMNC). Here was written theoretical generalization methods of definition the basic maintenance characteristics of HMNC making influence on flight safety. To wit it is reliability and safety failure with due to regard for possibilities and features application by operator (crew) of navigation equipment, precision of HMNC system and air navigation process on airways and necessary operator working with reliability estimate of its fulfilment. Was worked out the methods of definition dynamic load operators enable to estimate its operation reliability necessary for perfection the ways of crew working.

Was created the single measure of HMNC and air navigation process by means of which was substantiated the ways of safety failure application and operative definition of state the air navigation aids for encreasing the efficiency application of aircrafts and flight safety.

Ключові слова: аеронавігація, оператор, завантаженість, ефективність, відказостійкість, відказобезпека.

Підписано до друку 13.06.96. Формат 60х84/16. Папір друкарський.
Офсетний друк. Ум.фарбовідб.9. Ум.друк.арк.1,86. Обл.вид.арк.2,0.
Тираж 100 экз. Замовлення № 128-І. Ціна . Вид. № 215/Ш.

Видавництво КМУЦА.

252068. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, І.

AB 35.600