КИЇВСЬКИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

На правах рукопису

БЄЛИХ Тамара Василівна

# МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ СИСТЕМНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВІОНІКИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

05.13.03 - Системи та процеси керування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття вченого ступеня

кандидата технічних наук

Київ 1996

АБ 35.275

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Київському міжнародному університеті цивільної авіації та в Інституті кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, чл.-корр. ТАУ
ВОРОБЙОВ В.М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ТАНЯН А.Э.

кандидат технічних наук
РИХАНІВСКИЙ О.А.

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00752252 (N)

Провідна організація: АНТК ім. О.К. Антонова (м.Київ).

Захист відбудеться "18" ВЕРЕСНЯ 1996р. о 14 30 годині на засіданні спеціалізованої ради К 01.35.05 в Київському міжнародном університеті цивільної авіації за адресою: 252058, Київ-58, пр.Космонавта Комарова, 1, КМУЦА, корпус 9, ауд. 9.308.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці КМУЦА.

Автореферат розісланий "5" серпня 1996р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук Баскакова А.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний шлях вирішення проблеми підвищення безпеки польотів і ефективності експлуатації повітряних суден (ПС) полягає в координації і автоматизації на всіх етапах життєвого циклу (ЖЦ) процесів:

<наукове обгрунтування соціального замовлення ПС> → <наукове дослідження і вибір шляху розв'язання задач> → <проектування електроніки ІВС> → <серійне виробництво> → <експлуатація> → → <утилізація> → <обгрунтування нової вимоги> і т.д.

Пріоритетність етапу проектування в реалізації вимог ефективності льотно- і експлуатаційно-технічних характеристик(ЛТХ и ЕТХ), підвищення надійності на базі широкого використання ЕОМ дозволяє обгрунтувати конструктивні підходи до автоматизації процесів проектування, виробництва, експлуатації, діагностики, прогнозування, ефективності застосування, тобто всіх етапів ЖЦ з орієнтацією при цьому на кінцевий результат. Системний підхід до проблеми підвищення ефективності авіоніки ПС в цілому дозволяє реалізувати концепцію, визначену академіком В.М.Глушковим як "привнесення із майбутнього в теперішній час з урахуванням минулого". При цьому припускається реалізувати такий потенціал у компонентах авіоніки, щоб згідно цільовим функціям безперервної економії резервів на етапах ЖЦ ["ARING-651"] забезпечити динамічний процес підвищення системної ефективності авіоніки і ПС, пристосованих до тенденцій експлуатації в майбутньому.

Під авіонікою ["ARING-651"] слід розуміти бортові радіоелектронні комплекси, які відносяться до обладнання літака і виконані на базі інтегральної модульної авіаційної електроніки, та другого обладнання.

Бортове радіоелектронне авіаційне обладнання (БРЕО) експлуатованих ПС, зокрема авіоніка перспективних ПС, являють собою складні поліергодичні системи, які безпосередньо впливають на безпеку польотів і ефективність експлуатації. За даними ІКАО 8.8% авіаційних випадків (АВ) відбувається через відмову і зіпсованість техніки, а 60-80% всіх відмов складають відмови БРЕО, що значною мірою пояснюються складністю структур, недостатньо високим рівнем відмовобезпеки. Роль "людського фактору" в теперішній час досягає 80% від загального рівня виникнення АВ, в порівнянні з "технічним", що досягає 20-25%. Створення передумов до АВ розподіляється таким чином: через помилки екіпажу - до 35% ,

"через помилки" ІАС - до 42% ПАП.

Прогрес у галузі створення мікроелектроніки і технологіях дозволив вийти на розробку нових концепцій проектування авіоніки високого ступеня інтеграції із самозабезпеченням, що об'єднує функції загальнолітакових систем. "Цей підхід... вводить методи, які призведуть до загальної економії засобів в порівнянні з введеною раніше електронікою" [ARING-651]. Уніфікація складу обладнання, виконання великого числа функцій ПС одночасно, висока продуктивність процесорів, високий ступінь відмовостій- кості, ефективність в експлуатації в той же час повинні бути поув'язані з економічною вигодою на всьому ЖЦ, а не по його етапах, тобто системною ефективністю. Вибір найбільш раціонального складу та основних технічних характеристик комплексу бортового інтегрального електронного обладнання ПС є досить складним технічним завданням. До цього часу вибір складу бортового обладнання (БО) проектованих ПС здійснюється інженерно-аналітичним шляхом, значною мірою на рівні досвіду та ерудиції.Але зростаючі вимоги до споруджуваних літаків призводять до збільшення комплексів БО, типів БО, що мають відмінності за такими характеристиками:маса точність, вартість, надійність, габарит. При цьому різко збільшується кількість сполук модифікацій різних систем літаків, що робить вибір складу БО утрудненим навіть для експертів високої кваліфікації. З цього і витікає актуальність розроблюваних математичних моделей, які дозволяють розв'язувати задачу вибору БО засобами економіко-математичного моделювання.

Пакет прикладних програм (ППП), який реалізує одержані моделі, дозволяє не тільки вибирати найбільш ефективний та надійний склад БО.Він також може бути використаний як інструмент для моделювання нових типів літаків на існуючій базі БО або випробовування конкурентної здатності нового обладнання порівнянно з існуючим.

Мета роботи - аналіз і узагальнення, розробка і формування економіко-математичних методів і моделей підвищення системної ефективності авіоніки перспективних ПС.

Наукова новизна дисертаційного дослідження:

1. Запропоновано методологію підвищення системної ефективності авіоніки перспективних ПС на етапах життєвого циклу.

2. Разроблено багатокритеріальну модель ,задачі оптимального вибору авіоніки ПС за критеріями максимізації технічної ефективності і мінімізації приведених затрат при обмеженнях на ряд параметрів;

3. Розроблено алгоритм розв'язання багатокритеріальної моделі, при умові що бортове обладнання ПС розміщене в функціонально незалежних комплексах, заснований на декомпозиції і побудові ε-сітки Парето-оптимальних розв'язків;

4. Розроблено лінійну цілочисельну багатокритеріальну економіко-математичну модель задачі оптимальної комплектації авіоніки ПС;

5. Розроблено алгоритм розв'язку лінійної моделі задачі оптимальної комплектації авіоніки літака.

На захист виносяться :

1. Методологія підвищення системної ефективності авіоніки перспективних ПС на етапах життєвого циклу.

2. Багатокритеріальну модель задачі оптимального вибору авіоніки ПС за критеріями максимізації технічної ефективності і мінімізації приведених затрат при обмеженнях на ряд параметрів;

3. Алгоритм розв'язання багатокритеріальної моделі, при умові що бортове обладнання ПС розміщено в функціонально незалежних комплексах, заснований на декомпозиції і побудові ε-сітки Парето-опти- мальних розв'язків;

4. Лінійну цілочисельну багатокритеріальну економіко-математичну модель задачі оптимальної комплектації авіоніки ПС;

5. Алгоритм розв'язку лінійної моделі задачі оптимальної комплектації авіоніки літака.

Практичне значення роботи полягає в підвищенні системної ефективності авіоніки і ПС (структура, функціонування, адаптація, розвиток) в економічних, організаційно-управлінських, льотно- і експлутуаційно-технічних аспектах на ЖЦ, через використання математико-економічних основ функціонування авіапідприємств в умовах ринкових відосин.

Методи дослідження. Для отримання основних результатів в дисертаційному дослідженні використовувались: методи системного аналізу, методи математико-економічного моделювання, методи багатокритеріальної оптимізації (за Парето), методи дискретної оптимізації.

Впровадження результатів досліджень здійснено в формі розрахункових методик, програмного продукту ППП "АРМ конструктора", експериментального устаткування в НТК ім. О.К.Антонова" та впровадженні в учбовий процес КМУЦА.

Прикладне значення отриманих методологічних і теоретичних результатів полягає в доступних для авіапідприємств методах, моделях і алгоритмах підвищення системної ефективності авіоніки за

логічно ув'язаного сукупністю етапів. До них варто віднести: системний аналіз внутрішніх якостей; структурування проблеми; формування економічних критеріїв максимізації технічної ефективності і мінімізації приведених затрат при обмеженнях по параметром; багатокритеріальну оптимізацію варіантів структур авіоніки; отримання конструктивних рішень оптимальної комплектації авіоніки засобами пакету прикладних програм (ППП) на універсальній основі як елемента програмно-методичного комплексу інтегрованої АСК (ІАСК). Прикладні результати роботи вирізняє їх універсальність, доступність реалізації та можливість тиражування в різних сферах діяльності авіапідприємств.

Достовірність результатів досліджень забезпечена використанням системного підходу до розробки математико-економічних методів і моделей підвищення системної ефективності авіоніки перспективних ПС, коректністю процедур обгрунтування і дослідження моделей, методологією оптимізації і вибором обмежень, а також адекватністю процесів моделей і структур БРЕО і авіоніки експлуатованих і перспективних ПС.

Публікації. З теми дисертації опубліковано 10 друкованих праць.

Апробація роботи. Результати теоретичних досліджень,викладені в дисертаційній роботі, доповідалися на Українській НТК "Моделювання і дослідження стійкості систем", 1993р., на науково - технічному симпозиумі "Питання оптимізації обчислень" (Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова,1994р.) і на III-ій міжнародній НТК "Управління системною ефективністю функціонування електрифікованих і пілотажно-навігаційних комплексів", Київ: КМУГА, 1995 р, а також використані у розробці ДЕРЖСТАНДАРТУ України "Системи і комплекси авіаційного обладнання. Надійність і експлуатація. Терміни і визначення." (К.: ДЕРЖСТАНДАРТ,1995р. (III редакція)).

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох глав, висновків, 3 додатків, 2 таблиць. Обсяг роботи складає 123 сторінки машинописного тексту.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі та першому розділі обгрунтовано актуальність теми; визначено мету дослідження ЖЦ; сформовано комплекс задач підвищення системної ефективності авіоніки на перспективних ПС.

У другому розділі розроблено модель багатокритеріальної задачі оптимального вибору авіоніки і запроваджено метод її розв'язку. Ця задача формулюється таким чином.

Обладнання літака розподіляється за певними фізичними комплексами, а розподіл іде за функціональноюознакою. Кожний комплекс складається з певної кількості систем. Кожна система може бути подана декількома модифікаціями обладнання, яке характеризується такими основними параметрами: надійність, точність, енергоємкість, маса, габарити, вартість. На літак, що проектується, покладено виконання певних функціональних задач (ФЗ). Кожна ФЗ повинна бути реалізована відповідним ланцюжком систем з необхідною ймовірністю безвідмовної роботи.

Необхідно з множини варіантів складу обладнання вибрати ті, які мають досить високу технічну ефективність при низьких приведених витратах на експлуатацію комплексів і задовольняють певним обмеженням на значення параметрів.

Введемо позначення:

K-множина комплексів, $k \in K$-окремий комплекс. $J$-множина систем, $j \in J$- окрема система. Для кожного $k$ задано множину $J_k$, причому, коли $k_1 \neq k_2$, то $J_{k_1} \cap J_{k_2} = \emptyset$, тобто кожна система може входити тільки в один комплекс. I- множина видів апаратури, $i \in I$ - вид апаратури. $I_j$- множина видів апаратури, що реалізує систему j. При цьому для кожної пари $j_1 \neq j_1, I_{j_1} \cap I_{j_2} = \emptyset$, тобто кожний вид апаратури може бути модифікацією тільки однієї системи. L -множина функціональних задач. Для кожного $l \in L$ задано ланцюжок систем $J_l$. Для будь-яких $j_1 \neq j_1$, $I_{j_1} \cap I_{j_2} = \emptyset$, тобто система може входити до декількох ланцюжків.

$x_i$ - ціла змінна - кількість апаратури типу $i$.

$\tau_i$ - булева змінна, яка визначає, використовується чи ні апаратура виду $i$ в розглядуваному варіанті, $\tau_i \in \{0,1\}$.

$$\sum_{i \in I_j} \tau_i = 1 , \quad j \in J_k , \quad k \in K , \qquad (1)$$

$$\tau_i \leqslant x_i \leqslant L \cdot \tau_i , \quad i \in I_j , \quad j \in J_k , \quad k \in K . \qquad (2)$$

Рівняння (1) описує положення, згідно з яким систему можна реалізувати тільки одним видом апаратури за умовою, що дана система входит до варіанту. Рівняння (2) означає, що дублювання апаратури, якщо вона вибирається, може приймати значення від 1 до L.

$CC_l$ - вимагаєма ймовірність виконання функціональної задачі ланцюжком $l$. $Q_i(x_i)$- ймовірність відмови апаратури, $Q_i(0) = 0$ .

Обмеження, що визначають вибір дублювання апаратури :

$$\sum_{j \in J_l} \sum_{i \in I_j} Q_i(x_i) \leqslant CC_l , \quad l \in L . \qquad (3)$$

$BR_k$ - обмеження у ресурсах в $k$ - му комплексу.

$R_i$ - ресурс $i$ -го виду апаратури.

$$\min_{j \in J_k} \sum_{i \in I_j} R_i \geqslant BR_k , \quad k \in K . \qquad (4)$$

Обмеження (2), (3), (4) визначають для кожного виду апаратури чи можливість його використання і величину мінімально необхідного дублювання.

Для кожного комплексу задаються два критерії і система обмежень, що дозволяє розглядати цю частину моделі як підзадачу комплексу. Зв'язуючими обмеженнями для підзадач є обмеження типу (3).

Для комплексу $k$ **математична модель** має такий вигляд:

$F_{1k}(x) \longrightarrow \max$ (критерій технічної ефективності), (5)

$F_{2k}(x) \longrightarrow \min$ (критерій приведених затрат), (6)

при обмеженнях:

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_j} M_i x_i \leqslant BM_k , \qquad \text{(маса)} \qquad (7)$$

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_j} C_i x_i \leqslant BC_k , \qquad \text{(вартість)} \qquad (8)$$

$$T_{Ok} = \frac{1}{\sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_j} 1/T_{Oi}(x_i)} \geqslant BN_k , \qquad \text{(напрацювання на несправність)} \qquad (9)$$

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_j} E_{ri} x_i \leqslant BE_{rk} , \qquad \begin{cases} \text{енергія} =, \ r=1 & (10) \\ \text{енергія} \approx, \ r=2 & (11) \end{cases}$$

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_j} w_i x_i \leqslant BO_k , \qquad \text{(охолодження)} \qquad (12)$$

де $M_i$ - маса $i$-ого виду апаратури; $C_i$ - вартість $i$-ого виду апаратури; $T_i$ - напрацювання на відмову $i$-ого виду апаратури; $E_{1i}$, $E_{2i}$ - використовувана потужність постійного і змінного струму $i$-им видом апаратури; $w_{ii}$ - витрата охолоджуючого повітря $i$-им видом апаратури; $BM_k$, $BC_k$, $BN_k$, $BE_{rk}$, $BO_k$ - значення обмежень для комплексу $k$.

Задача полягає в тому, щоб для кожного комплексу вибрати деяку множину альтернативних Парето- оптимальних варіантів складу обладнання і потім знайти множину раціональних варіантів для всього ЛА, використовуючи методи багатокритеріальної оптимізації.

Пропонується алгоритм генерації ε-сітки компромісних розв'язків для багатокритеріальної цілочисельної задачі [1,6,7], в якому спрощена модель (5)-(12) шляхом заміни змінних і наближеного обчислення значення обмеження (9), проведена декомпозиція задачі по комплексах $k$, побудовані ε-сітки наближених розв'язків для оптимізаційних підзадач,що відповідають комплексам, формується на основі розв'язків підзадач наближеного розв'язку вихідної задачі.

Теоретично обгрунтована оцінка збіжності алгоритму.

Глава 3.

Для задачі, коли авіоніку ПС не можна розбити на функціонально незалежні комплекси, поставлено і описано лінійну цілочисельну багатокритеріальну економіко-математичну модель задачі оптимальної комплектації авіоніки ПС.

Вихідним документом для вибору мінімального складу технічних характеристик авіоніки є тактико-технічне завдання на створення літака. Мінімально необхідний склад авіоніки доповнюється системами, що забезпечують виконання спеціальних функціональних задач, що покладаються на даний літак. Кожній необхідній функції відповідає певний набір систем, а система цього набору ("ланцюжки") відповідає ланці алгоритму виконання даної функції (датчики первинної інформації, пристрої перетворювання форми представлення інформації, обчислювальні елементи, виконуючі прилади і механізми, пристрої вводу, видачі чи відображення даних та ін.). Самі ланцюжки можуть містити в собі один і більше варіантів рішення залежно від кількості алгоритмів, які забезпечують виконання даної функції; складності алгоритму і поданого різноманіття систем, що характеризуються подібними функціями і вхідними/вихідними сигналами. В результаті вихідними даними для вибору складу бортового обладнання може бути набір ланцюжків,кожний з яких несе інформацію про системи, які можуть виконувати відповідну функцію. Крім того, на кожну функцію задано величину максимальної ймовірності невиконання її, а на весь комплекс в цілому - обмеження маси, енергоспоживання, кількості охолоджуючого повітря і сумарного напрацювання на відмову.

Необхідно з множини варіантів бортового обладнання вибрати те, яке має найвищу ефективність відповідно до обраного критерію і задовільняє певним обмеженням. Для цивільної авіації критеріями можуть бути: річний об'єм роботи, річні сумарні витрати, собівартість 1 т*км і річний прибуток, а для військово-транспортної авіації рекомендований критерій - точність

десантування.

Оцінка економічної ефективності нових у відношенні до базових варіантів БРЕО літака визначається на основі "Тимчасової методики N 25-87-111 оцінки порівняльної економічної ефективності пілотажно-навігаційного обладнання літаків цивільної авіації", від 20.04.87р. Ця методологія поширена на обґрунтування інших критеріїв економічної ефективності.

Основними складовими критеріями ефективності в методиці є дві величини. Це річний об'єм роботи літака

$$B = G_k \gamma_k V_p T_{нал}$$

і сумарні річні витрати, що припадають на 1 літак,

$$Z = З (P+E_н) + И' + E_k K' ,$$

де: $G_k$ - максимальна комерційна загрузка літака; $\gamma_k$-коефіцієнт комерційної загрузки; $V_p$-середня рейсова швидкість літака; $T_{нал}$- річний наліт годин; Р - приведені затрати на створення БРЕО; Р - частка амортизаційних відрахувань від балансової вартості БО на реновацію; $E_k$- нормативний коефіцієнт порівняльної ефективності капіталовкладень; И'- річні експлуатаційні витрати при використанні літака; К' - супутні капіталовкладення в галузь цивільної авіації, необхідні для впровадження в експлуатацію літака з розглядуваним варіантом БРЕО.

Зважуючи на те, що методику було розроблено в 80-і роки і запропонований в ній критерій ефективності відображає витратний механізм радянської економіки, в сучасних умовах вона може мати лише обмежене застосування, яке не дозволяє визначити ступінь ефективності використання літака в умовах ринкових відносин. В роботі пропонується розширити його через порівняльний аналіз варіантів авіоніки ЛА з використанням декількох критеріїв. Основні техніко - економічні розрахунки при цьому будуть проводитися на основі вказаної методики.

Сформульовано чотири критерії економічної ефективності:

I) Річний об'єм роботи в т*км:

$$B = B^{Б} + \frac{B^{Б}}{G_k^{Б}} \Delta G_k + \frac{B^{Б}}{\gamma_н^{Б}} \Delta \gamma_k + \frac{B^{Б}}{V_p^{Б}} \Delta V_p + \frac{B^{Б}}{T_{нал}^{Б}} \Delta T_{нал} ;$$

II) Річні сумарні витрати:

$$Z = Z^{Б} + C_{лч}^{Б} \Delta T_{нал} + \Delta Ц + T_{нал}^{Б} \Delta C_{лч} ;$$

III) Собівартість 1 т*км :

$$S = S^{Б} + \frac{-S^{Б}}{G^{Б}_{k}} \Delta G_{k} + \frac{-S^{Б}}{\gamma^{Б}_{k}} \Delta \gamma_{k} + \frac{-S^{Б}}{V^{Б}_{p}} \Delta V_{k} +$$

$$+ \frac{-\bar{Ц}^{Б}}{B^{Б} T^{Б}_{нал}} \Delta T_{нал} + \frac{1}{B^{Б}} \Delta \bar{Ц} + \frac{T^{Б}_{нал}}{B^{Б}} \Delta C_{лч};$$

IV) Річний прибуток :

$$П = П^{Б} + \frac{B^{Б} t_{s}}{G^{Б}_{k}} \Delta G_{k} + \frac{B^{Б} t_{s}}{\gamma^{Б}_{k}} \Delta \gamma_{k} + \frac{B^{Б} t_{s}}{V^{Б}_{p}} \Delta V_{k} +$$

$$+ \frac{B^{Б} t_{s} - C^{Б}_{лч} T^{Б}_{нал}}{T^{Б}} \Delta T_{нал} - \Delta \bar{Ц} - T^{Б}_{нал} \Delta C_{лч};$$

Складні технічі системи повинні виконувати певні задачі. У випадку бортового обладнання літака - це перелік функціональних задач. Для кожної ФЗ формується послідовність набору залежних систем. Кожна система може бути вибрана з цілого списку апаратури. Вони відрізняються між собою способом виконання покладеної на них функції, показниками надійності, маси, вартості і т.д. Необхідно скласти "ланцюжки", відповідні ФЗ, які несли б інформацію про необхідний склад апаратури, про можливість розв'язку кожної ФЗ. З усієї різноманітності способів рішення ФЗ вибираємо найкращий з варіантів.

Сформульовано обмеження ймовірності успішного виконання ФЗ.

Для виконання вимог безвідказності авіоніки вводиться додаткова резервна апаратура з незавантаженим резервуванням. В розробленому алгоритмі ступінь резервування не обмежений, але для ВС НТД встановлено верхню межу = 4. Зниження II зменшує кількість варіантів, що підлягають перевірці.

Розроблено алгоритм побудови "ланцюжків" для виконання функціональних задач і обчислення ймовірності їх виконання.

Ймовірність відмови системи $i$ за час польоту $t_{п}$ при ступені резервування $x_{i}$ 1 при умові, що $0 \leqslant \lambda_{i} t_{п} << 1$, де $\lambda_{i} = 1/T_{Oi}$, $T_{Oi}$ - напрацювання системи на відмову, визначається формулою

$$q_{i}(x_{i}) = (1 - e^{-\lambda_{i} t_{п}})^{x_{i}} \approx (\lambda_{i} t_{п})^{x_{i}}.$$

За цієї умови ймовірність невиконання функції $z$ з високою точністю визначається сумою ймовірностей відмов всіх мінімальних

перерізів функції. Тобто

$$q_z(x) \approx \sum_{d \in D_z} \prod_{i \in I_{dz}} q_i(x_i) \approx \sum_{d \in D_z} \prod_{i \in I_{dz}} ( \lambda_i t_n )^{x_i} ,$$

де $D_z$ – множина мінімальних перерезів для функції $z$, $I_{dz}$ – множина систем, що входять в мінімальний переріз $d$.

Якщо для функції $z$ в рішенні задачі кількість перерізів $K_z$ невелика, а вимоги до надійності високі, то обмеження $q_z(x) \geqslant Q_z$ можна замінити системою обмежень

$$\prod_{i \in I_{dz}} ( \lambda_i t_n )^{x_i} \leqslant Q_z / k_z , \quad \forall\, d \in D_z ,$$

где $k_z$ – поправочний коефіцієнт ($1 \leqslant k_z \leqslant K_z$). Прологарифмувавши кожне рівняння, отримаємо лінійну по x систему.

Використання лінійних рівнянь для задання обмежень по надійності виконання функцій дозволяє значно зменшити обчислювальну складність і дає можливість використати добре розроблений апарат лінійного цілочисленного програмування для розв'язку задач синтезу.

Економіко-математична оптимізаційна модель задачі формулюється таким чином:

$$\sum_{i \in I} c_i^{\alpha\, o} x_i + \sum_{\omega \in} \sum_{r \in R_\omega} c_{r\omega}^{\alpha\, o} y_{r\omega} \longrightarrow \text{extr}, \qquad (13)$$

$$\sum_{i \in I} s_i y_i \longrightarrow \min , \qquad (14)$$

при обмеженнях

$$\sum_{i \in I} c_i^{\alpha} x_i + \sum_{\omega \in} \sum_{r \in R_\omega} c_{r\omega}^{\alpha} y_{r\omega} \leqslant (\geqslant) \bar{Y}'_\alpha , \quad \alpha \neq \alpha^o , \qquad (15)$$

$$y_{r\omega} \leqslant x_i , \quad i \in I_{r\omega} , \; r \in R_\omega , \; \omega \in \Omega , \qquad (16)$$

$$\sum_{r \in R_\omega} y_{r\omega} = 1 , \quad \omega \in \Omega , \qquad (17)$$

$$y_i \leqslant x_i , \quad i \in I \qquad (18)$$

$$\sum_{i \in I_p} y_i = 1 , \quad p \in P , \qquad (19)$$

$$\sum_{i \in I_{dz}} \ln (\lambda_i t_\Pi) x_i \leqslant \ln (Q_z / k_z) , \quad d \in D_z , \; z \in Z , \qquad (20)$$

$$\sum_{i \in I} m_i x_i \leqslant SM , \qquad (21)$$

$$\sum_{i \in I} u_i x_i \leqslant SU , \qquad (22)$$

$$\sum_{i \in I} w_i^c x_i \leqslant SW^c , \qquad (23)$$

$$\sum_{i \in I} w_i^f x_i \leqslant SW^f , \qquad (24)$$

$$\sum_{i \in I} v_i x_i \leqslant SV , \qquad (25)$$

$$\sum_{i \in I} (1/T_{oi}) x_i \leqslant 1/ST , \qquad (26)$$

$$0 \leqslant x_i \leqslant x_i^{max} , \quad x_i - \text{цілі}, \qquad (27)$$

$$y_{r\omega} \in \{ 0, 1 \} , \quad y_i \in \{ 0, 1 \} . \qquad (28)$$

**Індекси моделі** мають такий зміст:

$\alpha$ - індекс показника - I,..,IV; $\alpha^O$ - індекс показника, взятого за критерій; $i$ - система; $w$ - характеристика літака -1,..,6; r - варіант виконання функціональної задачі, щовпливає на значення характеристик $\omega$; $P$ - індекс вхідного параметра, що приймає участь у визначенні точки десантування; $z$ - функціональна задача; $d$- номер обмеження в системі обмежень окремої функціональної задачі.

**Множини у моделі** мають такий зміст:

$I$ - технічні системи; $\Omega$ - характеристики літака, що залежать від варіантів виконання функціональних задач; $R_\omega$ - варіанти рішення функціональної задачі, що впливає на значення характеристик $\omega$; $I_{r\omega}$ - системи, що входять у варіант r виконання функціональної задачі характеристики $\omega$; P - вхідні параметри, необхідні для визначення точки десантування; $I_p$ - системи, які забезпечують видачу параметра $p$; Z - функціональні задачі, в яких задано обмеження надійності; $D_z$ - строки обмежень, згенеровані для функціональної задачі $z$; $I_{dz}$ - системи, що входять до рядка $d$-го обмеження, згенерірованого для функціональної задачі $z$.

**Параметри моделі** мають наступний зміст:

$c_i^\alpha$ - коефіцієнт показника $\alpha$ при змінній $x_i$; $c_{r\omega}^\alpha$ - коеффіцієнт показника $\alpha$, що визначає вплив варіанту $r$ виконання функціональної задачі на характеристику $\omega$; $s_i$ - погрішність, яка вноситься системою $i$ у визначення точки десантування; $\bar{Y}_\alpha$ - обмеження для показника $\alpha$; $t_\Pi$ - час польоту, для якого задаються обмеження за надійністю; $\lambda_i$ - характеристика системи $i$ за надійністю; $Q_z$ - допустима ймовірність відмови при виконанні функціональної задачі $z$ за час польоту $t_\Pi$; $k_z$ - поправочний коефіцієнт формування системи обмежень для функціональної задачі $z$; $m_i, u_i, w_i^c, w_i^f, v_i, T_{oi}$ - характеристики систем: маса, вартість, споживання електроенергії постійного і змінного струму, витрачання охолоджуючого повітря, час напрацювання на несправність; $SM$, $SЦ$, $SW$, $SW$, $SV$, $ST$ - обмеження на сумарне значення характеристик

систем; $x_i^{max}$ – максимальне значення ступеня дублювання системи $i$.

Змінні в моделі мають такий зміст:

$x_i$ – кількість систем $i$, встановлених на борту; $y_{r\omega}$ – логічна змінна, що означає вибір варіанту $r$ виконання функціональної задачі для характеристики $\omega$; $y_i$ – логічна змінна, що позначає вибір системи $i$ для визначення точки десантування.

Обмеження позначають:

(13) – критерій, що визначає економічну ефективність літака. Від екстремума залежить вид вибору конкретного показника I – IV як критерія;

(14) – вимога вибору системи, мінімізуючих середньоквадратичну похибку визначення заданої точки десантування;

(15) – обмеження на значення показників I-IV, за винятком того, який взятий як критерій;

(16) – логічні обмеження, що потребують узгодження вибору варіантів виконання функціональних задач і систем,що забезпечують реалізацію цих варіантів, для характеристик $\omega$;

(17) – логічні обмеження, що потребують вибору тільки одного варіанту виконання функціональної задачі для кожної характеристики

(18) – обмеження аналогічні (16), але задаються для ФЗ;

(19) – вимоги – для кожного вхідного параметра $p$ вибрати тільки одну систему, яка буде його генерувати;

(20) – система обмежень, що визначає виконання вимог по надійності виконання кожної функціональной задачі $z$;

(21) – (26) – обмеження на сумарні показники систем;

(27), (28) – обмеження на зміни $x_i$ , $y_{r\omega}$ , $y_i$.

Наведена задача є задачею цілочисельного лінійного програмування з двома критеріями і належить до класу NP-трудомістких задач. Враховуючи те, що вона має велику розмірність, на даний момент не існує точних ефективних алгоритмів для її розв'язку. Тому для розв'язку цієї задачі розроблено швидкий і ефективний, з прикладної точки зору, такий алгоритм.

На першому етапі розв'язується задача (13)-(28) як однокритеріальна (без урахування критерія (14)).На другому етапі без урахування критерія (13). Таким чином спочатку одержимо значення $F_1^{min}$ и $F_2^{max}$ мінімально-можливе значення при розв'язку вихідної задачі за першим критерієм і максимально можливе – за другим. На другому етапі – навпаки – $F_1^{max}$, и $F_2^{min}$. Таким чином, для кожного критерія знаходиться максимально – можливий діапазон його зміни у вихідній задачі.

Для знаходження Парето-оптимальної множини розв'язків двокритеріальної задачі запропоновано алгоритм [2,8,9,10]. Інтервал $[P_2^{min}, P_2^{max}]$ розбивається на $n_2$ рівних частин і розв'язується $n_2$ задач( 13), (15)-(28), тобто без критерія (14), з умовою:

$$\sum_{i \in I} s_i y_i \leqslant P_2^{max} - (P_2^{max} - P_2^{min}) * j / n_2 ,$$

де $j = 1, \ldots, n_2$ - відповідає номеру задачі.

В результаті отримуємо $n_2$ Парето - оптимальних рішень ( $P_2^{min}$, $P_2^{max}$ ), що містять в собі рівномірно розподілені значення критерія (14). Аналогічно, розбивши інтервал $[P_1^{min}, P_1^{max}]$ на $n_1$ частин, і розв'язавши ряд задач за критерієм (14) з обмеженням значень критерія (13), отримаємо $n_1$ Парето-оптимальних рішень $\{P_{1j}^1, P_{2j}^1\}$.

Алгоритм розв'язку однокритеріальної задачі такий.

Оскільки змінні $y_i$ і $y_{r\omega}$ приймають тільки два значення 0 та 1, а змінні $x_i$ обмежені,то для розв'язку задачі доцільно застосувати метод розгалужень і границь.

Конкретизація методу розгалужень і границь полягає у виборі способу розгалуження множини допустимих розв'язків задачі і способу обчислення оцінок для гілок. Як оцінку використаємо розв'язок однокритеріальної задачі (13)-(28) без вимоги цілочисленності змінних, але з додатковим обмеженням на їхні граничні значення, а саме: обмеження (27), (28) замінюються такими

$$0 \leqslant \underline{x}_i \leqslant x_i \leqslant \bar{x}_i \leqslant x_i^{max} , \qquad (29)$$

$$0 \leqslant \underline{y}_{r\omega} \leqslant y_{r\omega} \leqslant \bar{y}_{r\omega} \leqslant 1 , \quad 0 \leqslant \underline{y}_i \leqslant y_i \leqslant \bar{y}_i \leqslant 1 . \qquad (30)$$

Для розв'язку однокритеріальної задачі з умовами (29), (30) використовується техніка сучасного лінійного програмування роботи з розрідженими матрицями великої розмірності і варіант r-алгоритму, реалізований автором [3,4]

Процес розв'язку задачі методом розгалужень і границь закінчується, коли розглянуто обидві гілки нацвищого рівня розгалужень. Отриманий в результаті описаного процесу рекорд є оптимальним розв'язком однокритеріальної цілочисленної задачі. З метою аналізу отриманого розв'язку експертом разом з оптимальним розв'язком можуть бути видані декілька розв'язків близьких до нього.

Глава 4.

Методика розв'язку лінійної моделі задачі оптимальної комплектації авіоніки літака реалізована пакетом прикладних програм (ППП)

АРМ конструктора. Обгрунтовано алгоритм розв'язку задачі та описано основні блоки та склад програмного забезпечення ППП.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ РОБОТИ

1) Методологічний аспект роботи базується на принципі єдності функцій авіоніки ПС як цільової категорії і процесів реалізації системної ефективності (<будова> → <функціонування> →<адаптація> → <розвиток>) як категорії досягнення мети (підвищення рівней безпеки польотів). Як конструктивні методологічні розв'язки задачі підвищення системної ефективності авіоніки і ПС запропоновані системні принципи декомпозиції на логічну сукупність мети і задач, що забезпечують високу результативність з використанням моделювання і оптимізації. Обгрунтовані основні напрямки підвищення результативності виробничої діяльності авіавиробництв, у тому числі експлуатації <<ОКБ>→<серійний завод>> →<льотна експлуатація> → <АТБ і АРЗ> і якість реалізації функцій авіоніки ПС в економічних, економіко-управлінських, надійностних, льотно-експлуатаційних аспектах діяльності.

2) Розроблено багатокритеріальну модель задачі оптимального вибору авіоніки ПС за критеріями максимізації технічної ефективності і мінімізації приведених затрат при обмеженнях на ряд параметрів.

3) Запроваджено алгоритм розв'язку багатокритеріальної моделі, заснований на декомпозиції і побудові ε-сітки Парето - оптимальних розв'язків.

4) Розроблено лінійну цілочисельну багатокритеріальну економіко-математичну модель задачі оптимальної комплектації авіоніки ПС.

5) Досліджено і обгрунтовано економічні цільові функції,технічні критерії - точність десантування, обмеження за надійністю виконання обладнання ФЗ, зв'язаних з управлінням ПС,і обмеження на сумарні значення адитивних характеристик обладнання.

6) Зроблено і обгрунтовано алгоритм розв'язку лінійної цілочисельної багатокритеріальної економіко-математичної задачі.

7). Розроблено діючий ППП "Автоматизована система вибору оптимального складу авіоніки".

Перелік основних робіт, опублікованих із теми дисертації:

1. Белых Т.В., Кузьменко В.Н. Алгоритм генерации ε-сети компромиссных решений для многокритериальной целочисленной задачи. // Методы исследования экстремальных задач АН Украины. Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова, 1994.- С. 35-41.

2. Белых Т.В., Головнев Е.А., Кузьменко В.Н. Линейная модель задачи оптимальной комплектации электронного бортового оборудования самолета.// Теория оптимальных решений. Ин-т кибернетики им В.М.Глушкова НАН Украины.1995.-С.71-76

3. Белых Т.В.,Журбенко Н.Г. Метод минимизации функции, использующий операцию растяжения пространства в направлении разности двух последовательных градиентов (r - алгоритм). АН УССР, РФАП, №21,1976г., №3757.

4. Белых Т.В.,Журбенко Н.Г. Алгоритм минимизации негладких функционалов (r - алгоритм). АН УССР,РФАП, №22, 1976г., №3758.

5.Воробьев В.М., Артюшин Л.М., Белых Т.В.и др. Системы и комплексы авиационного оборудования. Надежность и эксплуатация. Термины и определения. К.: Госстандарт Украины, 1995г (III редакция).

6. Белых Т.В. Построение и исследование математической модели оптимального выбора систем бортового оборудования самолета.// Тезисы докладов конференции "Моделирование и исследование устойчивости систем". 24-28 мая 1993г.,КГУ, г. Киев.

7. Белых Т.В., Кузьменко В.Н. Разработка алгоритма решения задачи выбора модификаций бортового оборудования самолета.//Тезисы симпозіума "Питання оптимізації обчислень" 22-24 листопада,1993р. - Київ,Ін-т киб.ім.В.М.Глушкова.

8. Белых Т.В.,Кузьменко В.Н. Экономико-математическая модель повышения системной эффективности авионики.// Тезисы конф."Моделирование и исследование устойчивости систем.", 1995г,КГУ,г.Киев.

9. Белых Т.В., Головнев Е.А., Кузьменко В.Н. Автоматизированная система выбора оптимального состава бортового оборудования.// III-ья международная НТК "Управление системной эффективностью функционирования электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов. Авионика-95", КМУГА,1995г,

10. Белых Т.В., Воробьев В.М., Дагман Я., Методы и модели повышения системной эффективности авионики перспективных ВС.// III-ья международная НТК "Управление системной эффективностью функционирования электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов. Авионика-95", Киев: КМУГА,1995г.

## АННОТАЦИЯ

Белых Т.В. Математические методы и модели повышения системной эффективности авионики перспективных воздушных судов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по

специальности 05.13.03. - "Системы и процессы управления". Киевский международный университет гражданской авиации. Киев, 1996.

Разработаны две модели задачи оптимального выбора бортового радиоэлектронного оборудования самолета: первая - многокритериальная модель задачи с критериями максимизации технической эффективности и минимизации приведенных затрат при ограничениях на ряд параметров, вторая - линейная модель оптимальной комплектации БРЭО самолета с критериями экономической эффективности и "точности десантирования". Разработаны алгоритмы Парето-оптимальных решений. Описан ППП "Арм конструктора", реализующий предложенную методику и алгоритм.

ABSTRACT

Bilich T.V.Mathematical methods and models of increase of system efficiency of avionics of perspective aircrafts. Thesis presented for the degree of the Candidate of Technical Sciences, speciality 05.13.03 - Systems and Processes of Management, Kiev International University of Civil Aviation, Kiev, 1996.

Two models of a problem of an optimum choice of the on-board radioelectronic equipment for aircrafts are developed . First of them is the multicriterial model of a problem with criteria of maximization of technical efficiency and minimizationof given expences at restrictions on a set of parameters. The second one is linear of an optimum complete of the on-board radioelectronic equipment for aircrafts with criteria of an economic efficiency and "precision landing operation". Algorithms of the Pareto-optimum decisions are developed. The program systems of the designer realizing offered technique and algorithm are described.

Ключевые слова: авионика, бортовое радиоэлектронное оборудование, оптимальный выбор, многокритериальная оптимизация, линейная оптимизация, экономическая эффективность, точность десантирования, автоматизированная система выбора, системы.

---

Підписано до друку 10.07.96. Формат 60x84/16. Папір друкарський. Офсетний друк.Ум.фарбовідб.6.Ум.друк.арк.0,96.Обл.вид.арк.1,0. Тираж 100 прим. Замовлення № 142-1. Ціна . Вид. № 221/Ш.

Видавництво КМУЦА.

252058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова,1.

436345

AB 35.275