УДК 629.4.073 (045)

Бухман С.Є.

ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ПЛАНУВАННЯ РОЗКЛАДУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПРОМІСІВ ПАРЕТО

У роботі аналізуються переваги та недоліки формування розкладу руху повітряних суден на основі класичної теорії розкладів. Досліджені можливості застосування методів компромісів Парето для планування розкладу великої або середньої авіакомпанії. Вибрані та обґрунтовані найбільш придатні показники ефективності формування оптимального розкладу. Запропонований алгоритм системи планування розкладу та сформульовані типові вимоги до неї.

Постановка задачі

Основним показником ефективності роботи авіакомпанії є кількість перевезених пасажирів та динаміка росту цього показника. Значне збільшення пасажиропотоку в останні роки було досягнуте, в першу чергу, завдяки відкриттю далекомагістральних маршрутів та розвитку внутрішніх авіаперевезень. В той же час, прямі рейси (з пункту в пункт) не могли дати настільки значного росту показників, адже відомо, що попит на перевезення є похідною від добробуту населення. Крім того, існує лінійна залежність темпів збільшення об'єму перевезень від росту ВВП країни.

На відміну від прямих транзитні перевезення дають мультиплікативний ефект, адже за рахунок вигідних стикувань вдається наповнити одразу декілька маршрутів. Освоєння трансатлантичних рейсів (до США та Канади) у комбінації із розвиненою мережею європейських, близькосхідних та внутрішньоукраїнських напрямків дозволило кількісно і якісно змінити структуру пасажиропотоку. Транзитні перевезення між Заходом та Сходом почали здійснюватись із проміжною посадкою в аеропорту Бориспіль, який в цьому випадку виступає місцем (або пунктом) трансферу. Під цим поняттям розуміють проміжний пункт, вказаний в авіаквитку, в якому, у відповідності із угодою повітряного перевезення, пасажир протягом певного проміжку часу здійснює пересадку з одного рейсу на інший для подальшого слідування за маршрутом. Пасажирів, що перевозяться таким чином, називають трансферними. Час перебування пасажира у пункті трансферу повинен бути з одного боку мінімальним, а з іншого, розрахованим з урахуванням можливих затримок та достатнім для вільної пересадки між рейсами.

Перехід до роботи з трансферними перевезеннями вимагає нового підходу до планування розкладу руху повітряних суден (ПС). При роботі в основному з прямими рейсами, він був достатньо простим і базувався на декількох критеріях, основним з яких був розподіл рейсів на умовні категорії за напрямками польоту. Маршрути, на яких переважають пасажири, що подорожують у справах („бізнес-маршрути") та рейси до великих закордонних трансферних аеропортів (хабів) отримували слоти (виділені аеропортом часові проміжки для наземного обслуговування) в основному, вранці, або в першій половині дня, а туристичні маршрути розміщувались ввечері, або займали наявні вільні слоти. Іншими важливими критеріями планування були льотно-технічні характеристики (ЛТХ) ПС – дальність польоту, кількість пасажирських крісел та відповідність типу двигунів стандартам країни аеропорту призначення, тощо.

Таким чином, час вильоту більшості рейсів перевізника практично не залежав від часу прильоту його інших рейсів. Така простота дозволяла складати розклад без використання спеціальних алгоритмів або програм. Розробка виконувалось вручну, а результати подавались у вигляді графіків у форматі *Microsoft Excel*.

В умовах роботи з трансферними перевезеннями планування розкладу також базується на певних критеріях, але їх кількість значно більша, ніж для прямих. Найважливішими з них є критерії стикування, тобто параметри синхронізації слотів для рейсів, які з точки зору перевізни-

ків є найприбутковішими для організації транзиту (наприклад, Східна та Західна Європа з далеким Сходом, Близький Схід та СНД з Північною Америкою, та ін.). Такі параметри включають в себе, власне напрямки, за якими можна організувати трансферне перевезення та часові нормативи, що обмежують проміжки між рейсами, щоб з одного боку мінімізувати час очікування рейсу що відлітає, а з іншого передбачити можливі затримки рейсів, що прибувають.

Також серед критеріїв планування можна виділити критерії часу (тривалість стоянок, стикувань, польоту по певному напрямку, переважний час виконання польоту по відношенню до часу доби та до паралельних рейсів у певному напрямку), критерії, пов'язані з ЛТХ ПС (кількість пасажирських крісел, дальність польоту, обмеження по рівню шуму для двигунів певних ПС), та ін.

Очікувані переваги

Раціональне використання ресурсів - це відома проблема, з якою стикаються абсолютно всі компанії. Кількість основних ресурсів, завдяки яким компанія виконує свою діяльність, завжди знаходиться у протиріччі із витратами на утримання та прибутком, що можна отримати за їх допомогою. Запас ресурсів може призвести до їх заморожування внаслідок нераціонального використання, а їх нестача, або обмежена кількість може спричинити серйозні порушення всієї роботи внаслідок найменшого збою. Тому бажано мати оптимальну кількість ресурсів та ефективну схему їх розподілення.

При розробці розкладу авіаперевізнику доводиться стикатися з щонайменше двома типами ресурсів: повітряними судами та слотами. Зважаючи на вартість ПС, або вартість його використання у лізінг та витрати на обслуговування, утримувати значний запас такого ресурсу неможливо, особливо в наявних ринкових умовах. Це зумовлює підвищення інтенсивності його використання. Разом з цим існують певні економічно і технічно обґрунтовані показники інтенсивності експлуатації кожного типу ПС, які розраховуються по тривалості його нальоту.

Не менш цінними ресурсами є слоти, особливо якщо мова йде про закордонні аеропорти зі значним пасажиропотоком. Ними можуть накладатися обмеження на польоти в найбільш завантажені години роботи, заборона на польоти в нічний час і т. ін. Це нерідко входить у протиріччя з прагненнями перевізників використовувати вузлові закордонні аеропорти в якості пунктів трансферу на рейси партнерських авіакомпаній. Тому для польотів за такими напрямками особливо критичним є час вильоту, який як правило розміщують у ранковий час. З іншого боку, аеропорт не може відмінити слот, який видавав протягом двох років підряд. Як правило, якщо напрямок є прибутковим і час вильоту задовольняє більшість пасажирів, то діючий графік польотів намагаються зберегти як авіакомпанії, так і аеропорти, а слоти, які надаються називають історичними. При плануванні розкладу такі слоти отримують найвищий пріоритет.

В оптимальному в певному сенсі розкладі повинна передбачатися реакція на критичні ситуації, які можуть виникнути в роботі будь якої системи, в тому числі і в авіаперевезеннях. Серед ймовірних проблем найсерйозніщими є значні збої в графіку руху та виходи з ладу ПС. Економічно виправдана інтенсивність експлуатації парку ПС не дозволяє тримати весь час резервний літак в базовому аеропорті, тому в таких випадках вдаються до екстрених оперативних мір, мобілізуючи наявні ресурси. Як правило, аналізується комерційна цінність напрямків, які втрачаються внаслідок позаштатної ситуації та у відповідності до неї вдаються до відповідних дій, до яких можна віднести відміну рейсів, перенос рейсів на інший час, поєднання рейсів, оренду ПС в іншого перевізника і т.ін. Крім цього, в розкладі кожного ПС відведений час на його технічне обслуговування, окремі форми якого відбуваються з різною періодичністю. Таким чином якщо є можливість перенести частину робіт на інший час, вільне ПС використовується для заміни того, що вийшло з ладу. Разом з цим необхідно враховувати, що якість обслуговування ПС безпосередньо впливає на

безпеку польотів, тому всі необхідні роботи повинні виконуватись в повному обсязі.

Отже, планування розкладу є досить складним процесом, який виконується з урахуванням багатьох критеріїв. Для забезпечення прибутковості діяльності перевізника на розклад накладається значна кількість вимог, які часто вступають у протиріччя з наявними ресурсами. Таким чином, результат планування повинен представляти собою компромісне рішення, направлене на максимізацію прибутку від діяльності авіакомпанії з урахуванням низки зовнішніх факторів та обмеженості її потужностей. Також результат повинен передбачати можливість гнучкої реакції на позаштатні ситуації.

Наявна система планування розкладу вручну виявляється недоцільною, по-перше, через достатньо високу складність процесу, та по-друге через високу залежність такого метода від людського фактора. Рішенням цієї проблеми може стати розробка алгоритму та системи планування розкладу та оцінки його якості.

Існуючі методи планування та їх недоліки

Процес планування розкладу починається з аналізу напрямків по яким здійснюються авіаперевезення. За його результатами комерційний відділ авіакомпанії складає ряд вимог до розкладу, що проектується. Такими вимогами, наприклад є дотримання „історичних" слотів (виконання рейсів в один і той же час протягом довгого часу), підстикування часу прильоту певних рейсів до аеропортів призначення із часом вильоту закордонних партнерів авіакомпанії (для зручності трансферу транзитних пасажирів, кількість яких може сягати 30% і більше), умовне поділення напрямків за категоріями (наприклад, рейси по напрямках, на яких здійснюється перевезення транзитних пасажирів, як правило розташовуються в першій половині дня, для решти рейсів це не має принципового значення) і т. ін.

Відділ планування розкладу подає запити до аеропортів призначення і отримує формалізовані графіки їх роботи, так звані *hub pattern*. За результатами їх перегляду обираються бажані слоти обслуговування, запит на які подається до адміністрацій аеропортів. На даному етапі виконується первинне планування розкладу з урахуванням можливостей власного парку ПС та обмежень обслуговування в аеропортах, зведених до спеціальних документів, так званих *NOTAM*. Серед таких обмежень можна виділити, наприклад, заборону на польоти в нічний час в європейських аеропортах, нормативи шуму та вибросів двигунів і т. ін. Подальша доробка розкладу відбувається на конференціях *IATA*, за участі слот-координаторів аеропортів та спеціалістів відділів планування авіакомпаній.

Кожне ПС з певною періодичністю повинно проходити планове технічне обслуговування, протягом якого воно не виконує польотів. Як правило це викликає заплановані зміни в розкладі протягом часу відсутності ПС в парку авіакомпанії. У випадку позапланових змін в розкладі, або позаштатних ситуацій, відділ планування вдається до оперативних заходів. Як правило до таких заходів відносяться позапланові зміни в розкладі, або оренда ПС в інших авіакомпаній, в залежності від комерційної цінності напрямків, в розкладі яких відбуваються зміни, та намірів керівництва.

Методи теорії розкладів

В найбільш загальному формулюванні задачі складання розкладу полягають у наступному – за допомогою деякої множини ресурсів або обслуговуючих пристроїв повинна бути виконана деяка фіксована система завдань. Мета полягає в тому, щоб при заданих властивостях завдань і ресурсів та обмеженнях, що накладені на них, знайти ефективний алгоритм упорядкування завдань, що оптимізує або прагне оптимізувати бажану міру ефективності [1].

В теорії розкладів основна увага приділяється питанням оптимального розподілення кінцевої множини вимог, що обслуговуються детермінованими системами з одним чи декількома приладами, при різних припущеннях щодо характеру їх обслуговування [2]. Вся інформа-

ція, на основі якої приймаються рішення про впорядкування завдань системи планування розкладу руху повітряних судів (час, вартість, обмеження у виконанні, необхідні ресурси) відома заздалегідь, тому модель такої системи є детермінованою. Модель процесу побудови розкладу є сукупністю моделей, що описують ресурси, системи завдань, обмежень побудови ті критеріїв оцінки [1].

В якості ресурсів в більшості систем виступають прилади, які в даному випадку є повітряними суднами (ПС), а у якості завдань або вимог – рейси, що ними виконуються.

Обслуговуюча система називається одностадійною (з одним або декількома паралельними приладами), якщо кожна вимога може бути повністю обслугованою кожним із приладів. Тривалості t_{iL} обслуговування кожної вимоги $i \in N$ кожним приладом $1 \le L \le M$ передбачаються заданими [2].

У багатостадійних системах процес обслуговування вимоги i включає $r_i \ge 1$ послідовних стадій. При цьому кожній вимозі $i \in N$ кожної стадії $1 \le q \le r_i$ його обслуговування зіставляється деяка множина $M_q^{(i)} \subseteq \{1,2,...,M\}$ приладів. Вимога i на стадії q може бути обслугована будь-яким приладом $L \in M_q^{(i)}$ [2].

Незважаючи на те, що обслуговування авіарейсу можна розглядати як певну послідовність процесів (наземне обслуговування ПС, посадка пасажирів, зліт, політ, посадка і т. ін.), в межах планування розкладу варто представляти його як одне ціле. Отже, виконання однієї вимоги здійснюється в цьому випадку одним приладом, і, таким чином, можна стверджувати, що система планування авіаційного розкладу є одностадійною.

В залежності від характеру обслуговуючої системи процес обслуговування вимоги приладом повинен або протікати безупинно, або можуть допускатися переривання з наступним до обслуговуванням вимоги [2]. При складанні розкладів без переривань виконання завдання, раз почавшись, не може бути перервано, тобто виконання завдання завжди доходить до кінця. В іншому випадку - при складанні розкладів з перериваннями - дозволяється переривати завдання і знімати їх із приладу, при цьому вважається, що загальний час, необхідний для виконання завдання, залишається незмінним і при перериваннях відсутні втрати часу обслуговування (тобто виконання перерваного завдання відновляється з того місця, у якому відбулося переривання) [1]. Очевидно, що розклад руху є системою без переривань, тому що кожний конкретний рейс в певний момент часу виконується тільки одним ПС.

Існує ще один підхід до формування розкладу – складання його за допомогою списку. Такий спосіб передбачає, підготовку впорядкованого список з N завдань. Цей список часто називають списком пріоритетів [1]. Послідовність, відповідно до якої завдання призначаються на прилади, складається шляхом багаторазового перегляду списку. Зокрема, якщо з'являється прилад, що звільнився, то список починає проглядатися спочатку і проглядається доти, поки не знайдеться перше невиконане завдання i, що готове до виконання. Завдання вважається готовим до виконання на даному приладі, якщо виконання всіх попередників i завершене і наявної кількості ресурсів досить для того, щоб забезпечити необхідний об'єм ресурсів для виконання. Це завдання призначається для виконання на вільний процесор. При перегляді списку переривання не розглядаються. Таким чином, розклади, складені за допомогою списку, формують підмножину розкладів без переривань [1].

Формування розкладу за допомогою списку виявляється дуже цікавим засобом у випадку розкладу руху ПС, адже ефективність його функціонування базується на багатьох критеріях, які легко представити у вигляді списку пріоритетів. Серед таких критеріїв є параметри часу (час стоянок і стикувань, час польоту по певному напрямку, переважний час виконання польоту по відношенню до часу доби та до паралельних рейсів у певному напрямі), параметри, пов'язані з типом ПС (кількість пасажирських крісел, дальність

польоту, обмеження по рівню шуму для двигунів певних ПС), та ін. Списком таких критеріїв широко оперують комерційні служби авіакомпаній при плануванні рейсів та оцінці їх якості.

Крім дозволу або заборони переривань, до розкладу можуть пред'являтися й інші вимоги, що випливають з постановки конкретної розглянутої задачі. Для кожної вимоги $i \in N$ може бути заданий момент часу $d_i \geq 0$) її надходження в систему (у чергу на обслуговування), починаючи з якого воно може обслуговуватися, і директивний термін $D_i \geq 0$, до якого необхідно або бажано завершити його обслуговування [2]. Існують задачі, в яких директивні задачі не повинні порушуватись. Тоді вони називаються крайніми термінами [1].

В межах системи планування розкладу, директивними і крайніми термінами позначаються часові нормативи стоянок ПС. Наприклад в базовому аеропорті між рейсами час стоянки повинен складати 50 хв. – 1 год. 15 хв. Таким чином, директивний термін в цьому випадку дорівнює 50 хв., а крайній – 1 год. 15 хв.

Кожна вимога не може одночасно обслуговуватися двома і більше приладами і кожен прилад не може одночасно обслуговувати більш однієї вимоги. При цьому припущенні розклад можна розглядати як сукупність

$$s = \{s_1(t), s_2(t), ..., s_M(t)\}$$

кусочно-постійних неперервних зліва функцій $s_L(t), L = \overline{1, M}$, кожна з яких задана на інтервалі $0 \leq t \leq \infty$ і приймає значення 0, 1, ... n. Якщо $s_L(t') = i \neq 0$, то в момент часу $t = t'$ прилад L обслуговує вимогу i. Якщо $s_L(t') = 0$, то в момент часу $t = t'$ прилад L простоює. Іноді замість функцій $s_L(t), L = \overline{1, M}$, що описують функціонування кожного приладу, використовують аналогічні функції $s_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, що описують процес обслуговування кожної вимоги ($s_i(t') = 0$, якщо в момент часу $t = t'$ вимога i не обслуговується, і $s_i(t') = L$, якщо в момент часу $t = t'$ вимога i обслуговується приладом L) [2].

Найбільш розповсюджений спосіб оцінки якості розкладів для детермінованих систем обслуговування полягає в наступному. Кожному розкладові s відповідає вектор

$$\bar{t}(s) = \left(\bar{t}_1(s), \bar{t}_2(s), ..., \bar{t}_n(s)\right)$$

моментів завершення обслуговування вимог при цьому розкладі. Задається дійсна неубуваюча функція n змінних $F(x) = F(x_1, x_2, ..., x_n)$. Якість розкладу s характеризується значенням цієї функції при $x = \bar{t}(s)$. З двох розкладів кращим вважається той, якому відповідає менше значення $F(x)$. Розклад, якому відповідає найменше значення $F(x)$ (серед усіх припустимих розкладів), називається оптимальним [2].

При завданні функції $F(x)$ кожній вимозі i, як правило, зіставляють деяку монотонно зростаючу цільову функцію $\varphi(t)$, що виражає в кількісному відношенні збиток, якщо обслуговування цієї вимоги завершиться в момент часу t. Якість розкладу s характеризується сумарними або максимальними витратами, які необхідно зробити при обслуговуванні вимог за цим розкладом.

$$F_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i\left(\bar{t}_i(s)\right)$$

або

$$F_{\max}(s) = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{\varphi_i(\bar{t}_i(s))\right\}.$$

Зокрема, якщо $\varphi_i(t) = t$, $i = \overline{1, n}$, тобто $F_{\max}(s) = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{\bar{t}_i(s)\right\}$ — момент завершення обслуговування усіх вимог (загальний час обслуговування). У цьому випадку $F_{\max}(s)$ позначають через $\bar{t}_{\max}(s)$, і розклад s^*, що доставляє найменше значення $\bar{t}_{\max}(s)$, називають оптимальним по швидкодії розкладом [2]. Часто в якості показників ефективності розкладу виступають довжина розкладу або максимальний (чи середній) час його проходження [1]. У випадку конструювання розкладу руху повітряних суден, критерієм його якості не може бути його довжина, або час проходження, адже його оптимальність досягається, в першу чергу, не через

швидке виконання або коротший шлях. Ефективність такого розкладу зумовлена, скоріше, певним розподілом рейсів протягом доби, відповідністю ПС тим задачам, які він повинен виконувати, маніпулюванням часом прильоту та вильоту транзитних рейсів та ін.

Таким чином, оцінка якості розкладу, яка базується на його довжині, чи на часі проходження розкладу не є доцільною, якщо мова йде про розклад руху повітряних суден.

Структура моделі

Задачі побудови розкладу виникають кожного разу, коли існує можливість вибору того чи іншого порядку виконання робіт. Часто такі задачі вирішуються простим розташуванням робіт в порядку їх надходження до системи, а інколи випадково або інтуїтивно. Якщо мова йде про побудову оптимального в тому чи іншому сенсі розкладу, задачі його розробки виявляються достатньо складними.

Створення розкладу руху повітряних суден для середньої чи великої авіакомпанії вимагає розробки системи планування та оцінки його якості.

Планування розкладу базується на певних критеріях, серед яких є параметри часу (час стоянок і стикувань, час польоту по певному напрямку, переважний час виконання польоту по відношенню до часу доби та до паралельних рейсів у певному напрямі), параметри, пов'язані з ЛТХ ПС (кількість пасажирських крісел, дальність польоту, обмеження по рівню шуму для двигунів певних ПС), та ін.

Критерії планування можна об'єднати в групи та побудувати список їх пріоритетів.

В якості першої групи критеріїв планування розкладу руху ПС, можна виділити кількість рейсів за тиждень. Якщо рейси відбуваються менш, ніж 7 разів на тиждень, або навпаки, в такому разі вони повинні бути рівномірно розподілені протягом тижня, або протягом доби. Цей критерій складає першу групу – „критерії тижня".

Друга група критеріїв – критерії доби. Політика майже всіх сучасних авіакомпаній щодо розташування рейсів протягом доби, полягає в тому, що перевага віддається польотам в денний час. Крім того, необхідно врахувати той факт, що більшість європейських аеропортів не надають слоти в нічний час. Отже першим критерієм цієї групи є вищий пріоритет денних рейсів, ніж нічних. Наступним параметром є розподілення за умовними категоріями – ділові рейси, виліт яких повинен припадати на ранок чи день, або туристичні рейси, час вильоту є менш важливим. Дальні (трансконтинентальні) перельоти плануються таким чином, щоб їхнє прибуття приходилося на ранок або день за місцевим часом аеропорту призначення. Окремим критерієм є фіксований час вильоту певних рейсів. Це, як правило, рейси, що виконуються протягом кількох років у той самий час і їх зсув у розкладі є небажаним. Останнім параметром регулюється періодичність технічного обслуговування ПС. Для цього передбачається його повернення один раз на добу не менш, ніж на три години, до базового аеропорту.

Третя група критеріїв – географічні. Тут враховується той факт, що рейси у певному напрямку відбуваються з аеропортів різних міст України, і тому можуть виконуватися по черзі, без повернення в базовий аеропорт.

Четвертою групою критеріїв є залежність часу вильоту ПС від розкладу інших авіакомпаній. Цим критерієм враховується недоцільність одночасного виконання рейсів в одному напрямі різними перевізниками.

У групі „транзитних критеріїв" відображається залежність конкретного рейсу від інших транзитних рейсів. Час між прильотом одного і вильотом іншого транзитного рейса (час стикування) знаходиться в межах від 30 до 180 хв. Більші проміжки не вважаються стикуванням, а менші неприпустимі. Окрім того, в залежності від того, до якого умовного типу належить певний рейс (міжнародні рейси, міжнародні рейси, що мають стикування, внутрішні рейси та внутрішні рейси, що мають стикування) йому надається відповідний пріоритет при плануванні.

У групі технічних критеріїв відображуються основні характеристики ПС - дальність польоту, кількість пасажирських крісел і тип двигунів. Останній фактор накладає обмеження на використання певних типів ПС у деяких аеропортах. Два перших параметри визначають конфігурацію літака, який планується використовувати по певному маршруту.

Група критеріїв оперативного контролю відповідає за дотримання часових норм наземного обслуговування ПС., які складають – в базовому аеропорті від 75 до 90 хв., а в транзитному від 50 до 60 хв.

Всі наведені критерії, по-перше, є умовними, а по-друге – можуть вміщувати протиріччя одне одному. Вони залежать від економічної стратегії авіакомпанії та можуть змінюватись в залежності від кроків конкурентів, ситуації на ринку та намірів керівництва. Тому в системі планування розкладу повинна передбачатись можливість зміни ваги пріоритетів та їх порядку

Приблизна структурна схема моделі представлена на схемі 1.

Рішення багатокритеріальних задач може бути знайдене шляхом зведеня їх до звичайних задач з одним критерієм, оскільки для них існують достатньо прості та добре відпрацьовані методи рішення. Серед таких способів можна виділити, наприклад, згортання критеріїв, зміст якого полягає в заміні однієї задачі іншою. Але к аналізу багатокритеріальних задач можна підійти також з інших позицій – спробувати скоротити множину вихідних варіантів, тобто виключити з неформального аналізу ті варіанти рішень, що свідомо будуть поганими. Один з подібних шляхів був запропонований італійським економістом В. Парето в 1904 р [3].

Припустимо, що зроблений деякий вибір. Позначимо його через x^* і припустимо, що існує деякий інший вибір x такий, що для всіх критеріїв $f_i(x)$ мають місце нерівності

$$f_i(x) \geq f_i(x^*),\ i=1,\ldots,n \qquad (1)$$

причому хоча б одне з, нерівностей – сувора [3].

Очевидно, що вибір x переважніше x^*. Тому всі вектори x^*, що задовольняють (1), варто відразу виключити з розгляду. Має сенс займатися зіставленням та піддавати неформальному аналізу тільки ті вектори x^*, для яких не існує x такого, що для всіх критеріїв задовольняються нерівності (1). Множину усіх таких значень x^* називають множиною Парето, а вектор x^* називають вектором результатів, що не покращується (вектором Парето) [3].

Припустимо, що цілі суб'єкта визначаються двома однозначними функціями:

$$f_1(x) \to \max, \quad f_2(x) \to \max .$$

Тоді кожному припустимому значенню точки x відповідає одна точка на площині (f_1,f_2) (рис. 2) а рівності

$$f_1 = f_1(x), \quad f_2 = f_2(x),$$

визначають параметричне завдання деякої кривої *abcd* в цій площині [3].

Але до множини Парето можна віднести не всю криву. Так, ділянка *bc*, напевно, не належить до множини Парето, оскільки разом із зростом f_1 відбувається також зріст f_2. Таким чином, на цій ділянці зміні змінної x відповідає одночасне збільшення обох цільових функцій, і, отже, такі варіанти повинні бути одразу виключені з подальшого розгляду [3].

З тих же міркувань повинна бути виключена ділянка *a'b*, оскільки для кожної його точки *e* знайдеться точка, що належить ділянці *cd*, в якій значення обох функцій f_1 та f_2 більше, ніж у точці *e*. Отже, претендувати на приналежність до множини Парето можуть тільки ділянки *aa'* і *cd*, причому точка *a'* також повинна бути виключена [3].

В теорії прийняття рішень існує термін „принцип Парето", який полягає в тому, що вибирати в якості рішення слід тільки той вектор x, що належить множині Парето. Принцип Парето не виділяє єдиного рішення, він тільки звужує множину альтернатив. Остаточний вибір залишається за особою, що приймає рішення.

Таким чином, в системі планування розкладу, за допомогою компромісів Парето можна значно звузити множину наявних слотів і полегшити задачу розміщення конкретного рейсу в часі.

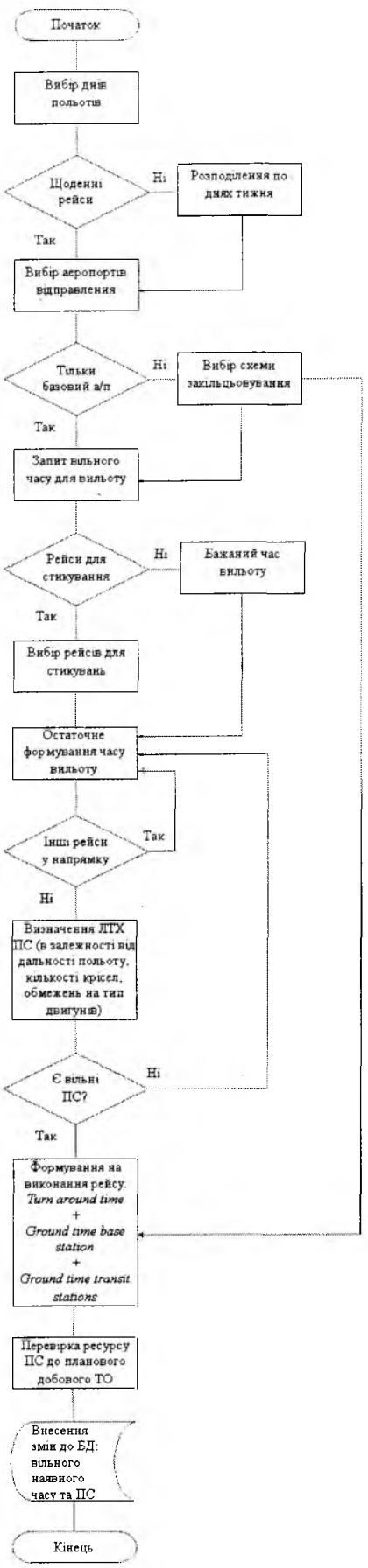

Рис. 1. Структурна схема моделі

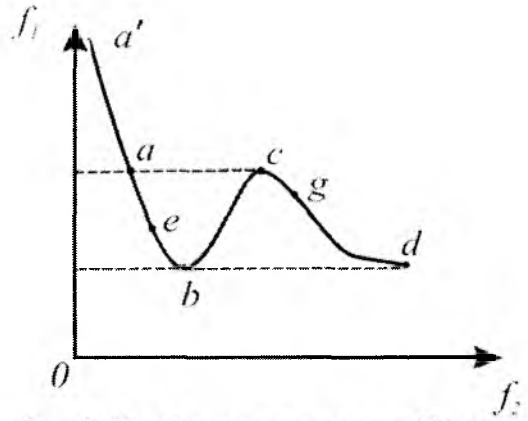

Рис. 2. Відображення множини Парето

Висновки

Зважаючи на складність проектування розкладу та важливість цього процесу, програмне забезпечення автоматизованої системи планування повинно відповідати певним вимогам, до яких можна віднести:

– Можливість оперативної зміни вхідних даних (зміна пріоритетів та їх ваги, вилучення або додавання обмежень планування, редагування нормативів роботи, і т. ін).

– Можливість швидкої модифікації записів в базі даних (відомості про наявні ресурси, напрямки польоту і т. ін).

– Надання вихідних даних у форматах, що є прийнятними в усіх підрозділах авіакомпанії, які їх використовують.

– Обмеження доступу до інструментів внесення змін в систему та дотримання заходів безпеки щодо вихідних даних.

– Можливість оперативного реагування або ручного втручання при виникненні надзвичайної ситуації (наприклад, перебудова розкладу на певний час при виході з ладу одного чи декількох ПС).

– Гнучкість програмного забезпечення, його зручність та легкість користування.

Список літератури

1. *Коффман Э. Г.* Теория расписаний и вычислительные машины. - М.: Наука, 1984. – 366 с.

2. *Танаев В. С.* Теория расписаний. - М.: Знание, 1988. – 385 с.

3. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981. – 488 с.