

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ АЕРОВУЗЛА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯНОГО РУХУ

© Водоп'янов С. В., 2015

Виконано аналіз системи ключових показників ефективності для оцінки стану і управління якістю сервісу складеної мережі аеровузла. Розроблено методіку поточного оцінювання параметрів і стану мережі, впливу їх на кінцеву ефективність обслуговування повітряного руху. Наведено результати розрахунків кореляційної матриці ключових показників ефективності й проаналізовано статистичні зв'язки між основними параметрами, від яких залежить продуктивність мережі та якість сервісу, підтримання яких забезпечує оптимальну організацію повітряного руху.

Ключові слова: організація повітряного руху, цілочислова оптимізація, інформаційно-обчислювальна мережа, ключові показники ефективності

S. V. Vodop'yanov
National Aviation University

IMPACT OF AIR CLUSTER COMMUNICATION NETWORK STRUCTURE ON AIR TRAFFIC SERVICE EFFICIENCY

© Vodop'yanov S. V., 2015

Today the basic criteria of estimation quality of functioning of computerized air traffic control systems don't exist. Dissolving of the problem of multi-objective optimisation is achieved due to scalar approach to a vector optimisation through Saaty analytic hierarchies process. The analysis of features of a system of key performance indicators for the estimation the state and control quality of service of air cluster composite network are executed. The methodology of current estimation of network parameters and state, and their impact on final efficiency of air traffic service is developed with application step-by-step regression. The results of calculations of correlation matrix of key performance indicators are resulted and statistical dependence between basic parameters are analysed, which a network performance and quality of service depend on and provide optimal air traffic management. An ad hoc assumption about errors of relative priorities of partial criteria allows excluding risk of singularity of priority matrix in applied method. Moreover, the presence of mentioned errors decreases risk of optimisation algorithm looping on local extremes.

Nowadays, application of modern technical means ensures implementation of flexible air space management structure, which provides immediate changes of air traffic control sector edges depending on current air environment. Thus, air traffic optimization occurs ensuring the required air traffic safety rate, "apron-to-apron" air traffic service method and application of area navigation technology, which is known as "free-flight" method.

Application of the computerized control network key parameters as a complex system with signaling information delay can afford its state forecast and real-time service quality control problem solving.

Key performance indicators are selected in a way ensuring comparative performance evaluation of different hub networks, and most significantly, providing guaranteed service

quality, which is the highest priority task for the air traffic management systems as critical application systems. This article stipulates separated network performance indicators and scale types for their evaluation.

Key words: air traffic management, integer optimisation, information, calculation and control network, key performance indicators.

Вступ. Постановка задачі

В наш час на основі використання сучасних технічних засобів реалізується концепція гнучкої організаційної структури повітряного простору, що дає змогу оперативно змінювати межі секторів управління повітряним рухом залежно від повітряної обстановки, що складається. Здійснюється оптимізація повітряного простору, що забезпечує заданий рівень безпеки повітряного руху, метод обслуговування повітряного руху “від перону до перону” і використання технології зональної навігації (так званий метод “вільних польотів”).

Розглянемо сучасні тенденції і перспективи розвитку систем організації повітряного руху (ОрПР) до 2025 р. [1].

1. Очікуване трикратне підвищення інтенсивності польотів у повітряному просторі Європи.
2. Десятикратне поліпшення чинника безпеки польотів.
3. Зменшення впливу кліматичних умов на безпеку польотів не менше ніж на 10 %.
4. Зменшення вартості операцій з управління повітряним рухом не менше ніж у два рази.
5. Розширення номенклатури сервісів, від послуг управління повітряними суднами до послуг зв'язку пасажирів повітряних суден.
6. Управління повітряними суднами повністю ґрунтуватиметься на обміні даними (мається на увазі максимальне можливе застосування мережевої організації обміну даними; голосовий зв'язок використовуватиметься в нестандартних і аварійних ситуаціях).
7. Розширення смуги частот для задач польотів за маршрутами і для допоміжних задач.
8. Розвиток ринку обслуговування пасажирів.
9. Нові радіосистеми.
10. Зниження витрат на перевезення великих і негабаритних вантажів.
11. Еволюція комплексної мережевої архітектури у напрямі сервіс-орієнтованої архітектури (SOA).

12. Насичення каналів зв'язку внаслідок зростання інтенсивності повітряного руху.

З урахуванням наведених міркувань щодо перспектив розвитку Європейської системи повітряного транспорту можна обґрунтувати вимоги до інформаційно-обчислювальних і управляючих систем (ІУС) ОрПР:

- покращення інформаційного забезпечення екіпажів ПС, зокрема підвищення якості обміну інформацією між ПС, між ПС і системами управління ПС, візуалізація навігаційної інформації з використанням цифрових карт, діаграм тощо;
- підвищення пропускної спроможності ІУС аеропортів для задоволення потреб перевізників у використанні ресурсів аеропорту, які зростають;
- обслуговування повітряного руху ґрунтується на надійних системах комунікацій;
- збільшення об'єму трафіку даних для ефективного управління на маршрутах (авіатрасах);
- подальший розвиток комунікаційних сервісів для пасажирів у напрямках підвищення стабільності, надійності та можливої реконфігурації;
- бортова мережева архітектура для підключення кожного пасажирського крісла і пілотських терміналів повинна відповідати стандартним протоколам та інтерфейсам;
- стовідсоткова ізоляція бортових розважальних центрів від комунікаційних, навігаційних і управляючих систем літака в межах загальної стратегії захисту мережевої та комунікаційної інфраструктури від несанкціонованих вторгнень;
- інформація про нештатні ситуації, авіаційні події, передумови льотних подій повинна передаватися на наземні пункти управління по спеціально виділених надійних, багато разів резервованих каналах з такою високою пропускною спроможністю, за якої забезпечуються зв'язок і управління в реальному часі. Це необхідно для гарантій того, що інформація буде своєчасно отримана і правильно інтерпретована.

Звідси випливає однозначний і цілком очікуваний висновок, що завдання оптимізації ОоПР ґрунтується, зокрема, на оптимізації ІУС аеропортів і аеровузлів. Для побудови математичних моделей і методів кількісного обґрунтування взаємозв'язку завдань ОрПР і ІУС аеровузла пропонується використовувати систему так званих ключових показників ефективності (*Key Performance Indicators– KPIs*) [2, 3].

Загальна кількість показників ефективності й результативності роботи системи ОрПР дуже велика, тому необхідно відібрати такі ключові показники [4], які безпосередньо пов'язані з якістю роботи інформаційно-обчислювальної мережі як невід'ємного елемента системи ОрПР. Крім того, необхідно враховувати, що в процесі поточної ОрПР пріоритети тих або інших ключових показників ефективності (КПЕ) можуть змінюватися, отже, необхідно передбачити можливості їх поточної пріоритезації. Нарешті, для забезпечення безпеки польотів, недопущення перевантажень окремих аеровузлів або трас польотів у виділених регіональних зонах необхідно вирішувати завдання поточного прогнозу стану цих аеровузлів (трас, регіональних зон).

У статті детально проаналізовано методи вирішення цих завдань.

Основні напрями розвитку мережевої авіаційної інфраструктури

Відповідно до розглянутих вище тенденцій розвитку систем ОрПР можна припустити, що перспективна інформаційно-комунікаційна мережа державної авіаційної адміністрації (ІКОМ ДАА) ґрунтуватиметься на багатоплановій структурі з декількома рівнями ієрархії. Основним автономним елементом авіатранспортної інфраструктури є аеровузел – близько розташовані аеродроми, організація і виконання польотів з яких потребують спеціального узгодження і координування. Тобто обслуговування і управління повітряним рухом у зоні аеровузла, надання пасажирських сервісів тощо повинні виконуватися спільно в межах єдиної задачі ОрПР. Найважливішою і невід'ємною частиною ОрПР є забезпечення безпеки польотів (БП).

Основною ланкою мережевої інфраструктури є сукупність мереж авіаційного електрозв'язку, локальних комп'ютерних мереж центрів управління ПС, інших мереж, об'єднаних у корпоративну мережу системи ОрПР.

Найвищим рівнем в ієрархії є рівень обміну даними державної авіаційної адміністрації із зональними аеровузлами, які розташовані на трасах польотів у виділених регіональних зонах. Обмін даними здійснюється в межах країни загалом. На цьому рівні збираються дані про загальний стан параметрів завантаженості повітряного простору, безпеку польотів, узгодження повітряного руху цивільної, військової, спеціальної, малої авіації тощо. За поточними даними, які доставляються безперервно в реальному часі, вирішуються завдання ОрПР в аеровузлових зонах.

На другому рівні ієрархії – інформаційно-комунікаційні та обчислювальні сегменти окремих аеровузлів. У кожному з таких сегментів здійснюється обмін даними між окремими аеродромами й авіакомпаніями. По суті, другий рівень мережевої ієрархії є рівнем ОрПР у межах окремого аеровузла.

Наступні рівні ієрархії будуються відповідно до багаторівневої структури, наведеної на рис. 1.

Задача організації польотів в зоні великого аеровузла є сукупністю процесів управління в системі організації повітряного руху і формально зводиться до цілочислової оптимізації в реальному часі [5]. Розглянемо математичне формулювання задачі.

Задача оптимальної організації повітряного руху з обмеженнями

Основою моделі цілочислового комбінаторного програмування, яка застосовується для маршруту польоту, є класична задача мінімізації, яка належить до класу стандартних задач розміщення з обмеженнями:

$$\min \left(\sum_{j=1}^m c_j y_j + m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i \frac{1}{r_{ij}} x_{ij} \right) \quad (1)$$

за умови нормування

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i \in I \quad (2)$$

і додаткових обмежень

$$x_{ij} \leq y_j; \quad x_{ij}, y_j \in \{0;1\}; \quad i \in I, \quad j \in M. \quad (3)$$

Перший доданок у цільовій функції відповідає загальній вартості польоту від аеропорту вильоту до аеропорту прибуття або кінцевого пункту маршруту (КПМ) через m суміжних секторів маршруту.

c_j – вагові коефіцієнти, що вибирають з урахуванням конкретних характеристик і умов роботи аероузла;

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{якщо ППМ установлений в } j\text{-й точці;} \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad \text{для всіх } j \in M;$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{Якщо } i\text{-й ППМ зв'язаний з } j\text{-м КПМ;} \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad \text{для всіх } i \in I \text{ і } j \in M$$

(ППМ – проміжний пункт маршруту).

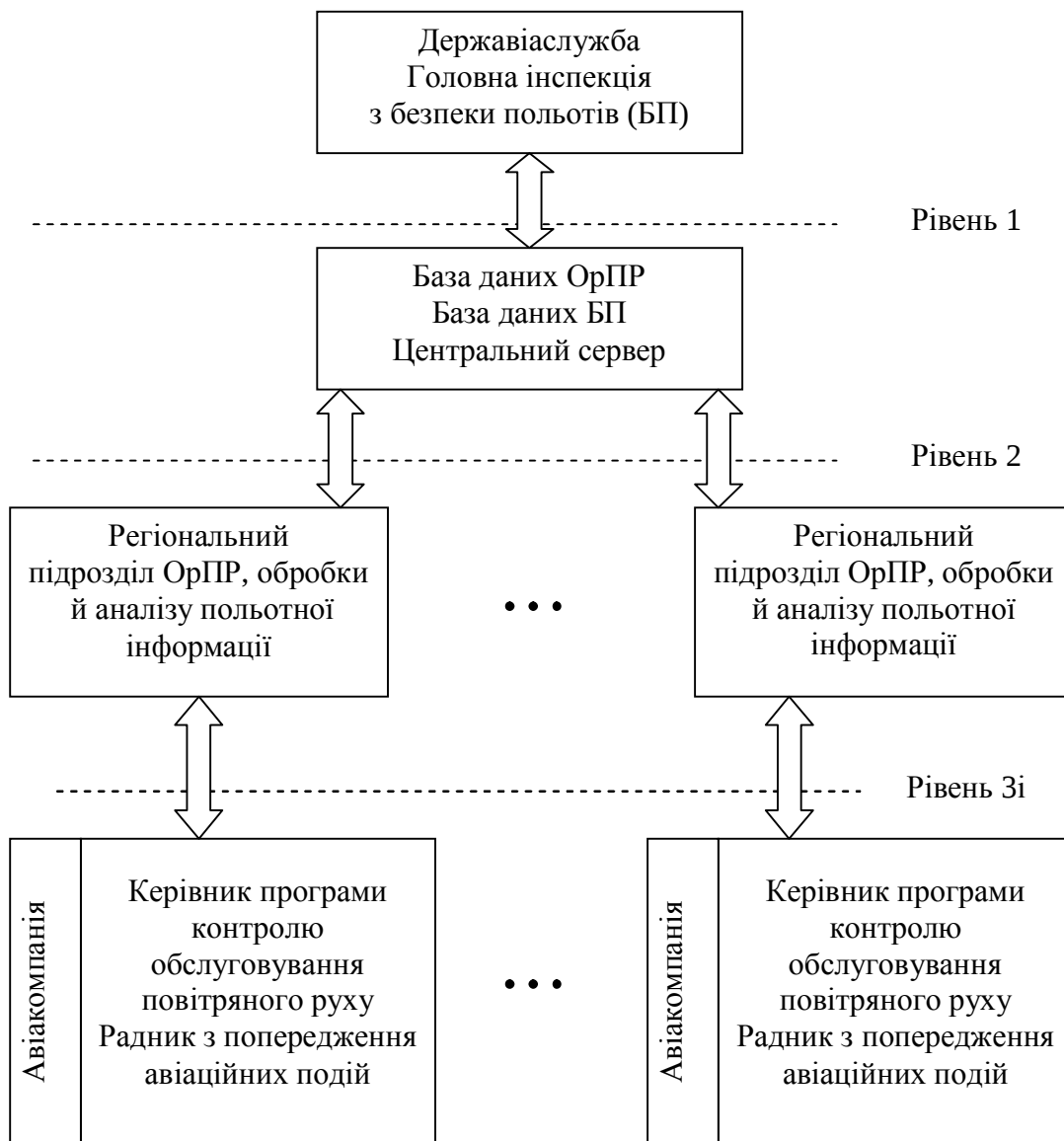


Рис. 1. Структура перспективної системи інформаційно-комунікаційного забезпечення авіаційної адміністрації державного масштабу

Оскільки $1/r_{ij}$ пропорційна до вартості польоту від i -го сектора, зв'язаного з j -м аеропортом прибуття, другим доданком описується шуканий ППМ, для якого загальна затримка польоту мінімальна. Оскільки критерії пошуку мінімуму обох доданків суперечливі, вводиться деякий коефіцієнт компромісу $m \geq 0$. Умова (2) є гарантією, що кожен i -й ППМ асоціюється з єдиним КПМ. Обмежувальна умова (3) означає, що ППМ задані тільки для тих пунктів, від яких гарантовано прибуття у КПМ. Зазначимо, що, оскільки змінні x_{ij} є бінарними, в кожному допустимому рішенні всі активні рейси можуть бути віднесені тільки до одного ППМ.

Введемо додаткові бінарні змінні, якими визначаються проміжні рішення:

$$w_{j,t}^f = \begin{cases} 1, & \text{якщо рейс } f \text{ прибуває в сектор } j \text{ до моменту часу } t; \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Це визначення вирішальних змінних з використанням терміна “до моменту” замість терміна “в момент” є критичним для розуміння формулювання. Змінні визначаються лише для того набору секторів, через які може пролітати повітряне судно за маршрутом до аеропорту призначення. Додатково, змінні використовують для аеропортів вильоту і призначення, щоб визначити оптимальні моменти часу для вильоту і прибуття, відповідно. Оскільки ми не розглядаємо відміни польотів, для кожного рейсу можна апіорі зафіксувати, принаймні, дві змінні: кожен літак повинен вилетіти в кінці відведеного інтервалу (часового слоту) i , відповідно, приземлитися протягом відведеного часового слоту, який визначається часом вильоту.

Модифікуємо складові цільової функції відповідно до введення додаткових вирішальних змінних. Додатковий адитивний компонент цільової функції – комбінація поточних вартостей затримки у польоті d_{AH} (*airborne-holding delay*) і затримки на землі d_{GH} (*ground-holding delay*). Тут під вартістю розуміють не тільки фінансові витрати, але і в ширшому сенсі – іміджеві втрати авіакомпаній, зниження довіри пасажирів тощо, і, насамперед – зниження рівня безпеки польотів (збільшення ризиків авіаційних подій).

Очевидно, що середня затримка в повітрі $\bar{d}_{AH}$ за одиницю часу має вищу вартість, ніж середня затримка на землі $\bar{d}_{GH}$: $\bar{d}_{AH} > \bar{d}_{GH}$.

Для об'єктивного встановлення вартостей використовуємо вагові коефіцієнти, що є т. зв. ультралінійними функціями затримки польоту d^{1+e} , $e > 0$. У роботі [5] запропоновано брати функцію виду $(t - a_f)^{1+e}$ для e , близького до нуля.

Проте сьогодні в організації інтенсивного повітряного руху в зоні великих аеровузлів, як правило, оперують дискретними інтервалами часу (слотами). Якщо при цьому, окрім цілої кількості слотів, зайнята тільки частина слоту, навіть як завгодно мала, цей слот розглядається як повністю використаний. Наприклад, якщо рейс затримується на землі протягом $n-1$ слотів плюс деяка частка n -го слоту, звідси впливає вартість n^{1+e_1} , $e_1 > 0$. Тому замість функції виду $(t - a_f)^{1+e}$ пропонується брати функцію виду

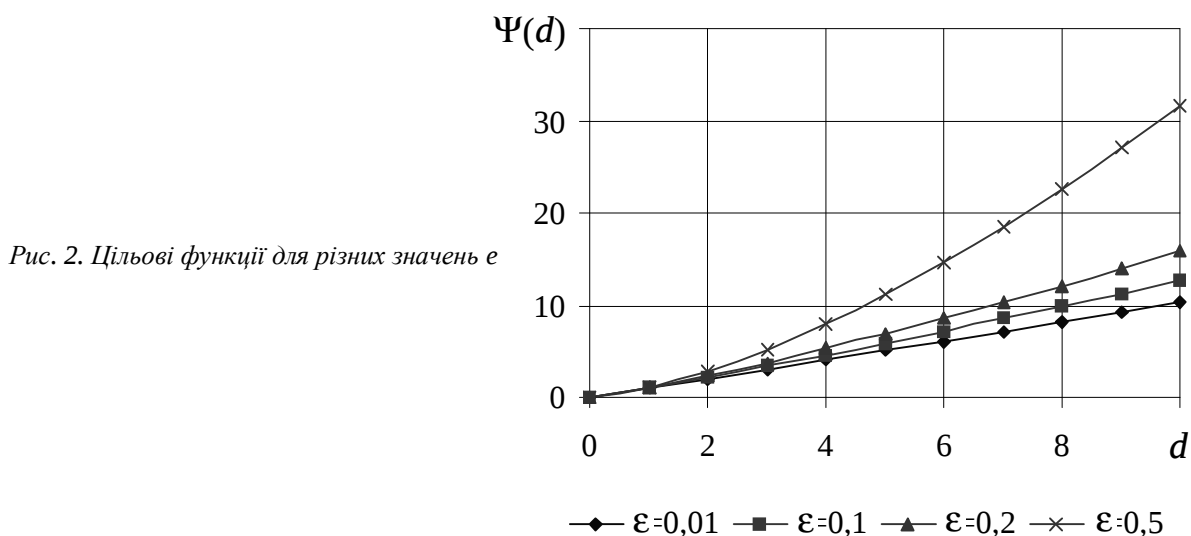
$$\Psi_{add}(d) = \lceil (t - a_f) \rceil^{1+e}, \quad (4)$$

де $\lceil x \rceil$ – найближче (більше) до x ціле число.

На рис. 2 зображені графіки цільових функцій виду (4) для різних значень ϵ . Зазначимо, що за $\epsilon=0$ цільова функція (4) є лінійною, а за $\epsilon=1$ – квадратичною. Завдяки такій гнучкості вибраної цільової функції можна регулювати як швидкість збіжності алгоритму оптимізації, так і ризик зациклення на локальних екстремумах.

Використовуючи запропоновані вагові коефіцієнти вартості, доцільніше брати усереднену суму значень затримки на землі кожного рейсу, ніж мале значення однієї затримки і велике значення іншої. Такі самі коефіцієнти вартості використовуються у разі затримок у повітрі. Однак

для виконання умови $\bar{d}_{AH} > \bar{d}_{GH}$ необхідно вибирати для затримки в повітрі коефіцієнт $e_2 > e_1$. В результаті в моделі віддаватиметься перевага затримці на землі, а не дорожчій затримці в повітрі.



Отже, цільова функція є сумою величиною $d_{AH,f}^{1+e_2} + d_{GH,f}^{1+e_1}$, де $d_{AH,f}$ і $d_{GH,f}$ – затримки в повітрі й на землі для випадку рейсу f . Якщо e_1 і e_2 близькі до нуля, тобто складові цільової функції слабо ультралінійні, допустима така апроксимація [5]:

$$\Psi(d_{\Sigma}) = d_{AH,f}^{1+e_2} + d_{GH,f}^{1+e_1} \cong d_{\Sigma}^{1+e_2} - (d_{AH,f}^{1+e_2} - d_{GH,f}^{1+e_1}), \quad (5)$$

де $d_{\Sigma} = \bar{d}_{AH} + \bar{d}_{GH}$ – сума середніх затримок рейсу на землі й у повітрі.

Якщо ж e_1 й e_2 не можна вважати близькими до нуля, для апроксимації функції $\Psi(d_{\Sigma}) = d_{AH,f}^{1+e_2} + d_{GH,f}^{1+e_1}$ необхідно застосовувати точніші методи (наприклад, розкладання у ряд Тейлора, апроксимацію поліномом або апроксимацію Паде). Вираз (2) ускладнюється, але суть задачі мінімізації не змінюється. Вона залишається задачею цілочислового програмування з неполіноміальною складністю.

Для оцінки впливу характеристик інформаційно-комунікаційної мережі на загальні характеристики організації повітряного руху розглянемо ключові показники ефективності мережі.

Вибір і обґрунтування показників ефективності інформаційно-обчислювальної мережі аеровузла

Загальні показники ефективності повинні вибиратися так, щоб можна було отримувати порівняльні оцінки якості роботи мереж різних аеровузлів, а головне – щоб можна було забезпечувати гарантовану якість сервісу, що для систем ОрПР як систем критичного застосування є першочерговим завданням. У табл. 1 наведено виокремлені показники ефективності роботи мережі й види шкал, за якими їх оцінюють.

Таблиця 1

Ефективність (результативність) функціонування мережі

Продуктивність мережі	←	Якість результатів роботи	←
Інтервальна оцінка	←	Інтервальна оцінка	←
Номінальна оцінка	←	Порядкова оцінка	←
Порядкова оцінка	←		

Розглянемо тепер показники ефективності мережі та якості надаваних послуг (табл. 2).

Таблиця 2

Показники ефективності мережі та якості надаваних послуг

№	Показник	Виокремлені параметри
1	Загальний показник якості мережі	
1.1	Показники якості джерел динамічної інформації	- кількість каналів обміну даними; - темп надходження інформації; - точність вимірювань; - розміри зони огляду; - роздільна здатність; - імовірнісні характеристики (помилки першого і другого родів); - інші.
1.2	Показник якості сервісу	- точність і достовірність передаваної інформації; - розбірливість мови, затримки, джитер; - кількість втрачених і спотворених пакетів даних; - зручність користування системою.
1.3	Показники продуктивності мережі	- кількість одночасно обслуговуваних повітряних суден у зоні дії; - кількість одночасно обслуговуваних повітряних суден за одиницю часу; - максимальна і середня пропускна спроможність системи ОрПР.
1.4	Економічна ефективність	- ставки тарифів і аеронавігаційних платежів; - експлуатаційні витрати і рентабельність; - термін окупності тощо

Загальна кількість показників ефективності й результативності роботи мережі як елемента системи ОрПР, строго кажучи, значно більша. Тут відібрані деякі ключові показники (*Key Performance Indicators – KPIs*) [3], які безпосередньо пов'язані з якістю роботи інформаційно-обчислювальної мережі як невід'ємного елемента системи ОрПР.

Під час оптимізації характеристик мережі необхідно враховувати параметри, від яких залежить якість сервісу, і взаємозв'язок між цими параметрами. Оскільки параметри окремих мережевих вузлів і елементів змінюються у процесі функціонування мережі випадково, необхідно застосовувати методи математичної статистики. Далі розглянемо деякі імовірнісні характеристики системи, за якими обґрунтовують вимоги до якості сервісу.

Процеси зміни ключових показників ефективності (КПЕ), з одного боку, є суттєво нестаціонарними, а, з іншої – тенденції їх змін дуже схожі. Тому викликає інтерес дослідження характеристик їх стохастичного взаємозв'язку. Цей інтерес не лише теоретичний, але і практичний. Для автоматизації вимірювань і розрахунків необхідно вибрати метод апроксимації кривих повторюваності змін КПЕ. Найбільш гнучким і точним методом є апроксимація поліномами за мінімумом середнього квадрата помилки [6]. Як основні характеристики стохастичного взаємозв'язку використовують коефіцієнт множинної кореляції та множинну регресію [7].

У цій роботі розглядається система КПЕ для мережі аеровузла як великої системи із затримками сигнальної управляючої інформації [8]. Мережа складена, тобто є сукупністю автономних сегментів різного масштабу і призначення [9].

Оскільки параметри окремих мережевих вузлів і елементів змінюються у процесі функціонування мережі випадково, під час оптимізації характеристик мережі необхідно враховувати параметри, від яких залежить якість сервісу, і взаємозв'язок між цими параметрами. Ключовими параметрами є затримка передачі, пропускна спроможність, втрати пакетів і рівень безпеки. Ці параметри найбільше впливають на результуючу якість сервісу і наявні у всіх наборах КПЕ автономних мережевих сегментів аеровузлової мережі.

Крім того, як оптимізаційні параметри задачі можуть вводитися і деякі додаткові показники [4]. Вони можуть входити в системи показників одних автономних сегментів і бути відсутніми в інших.

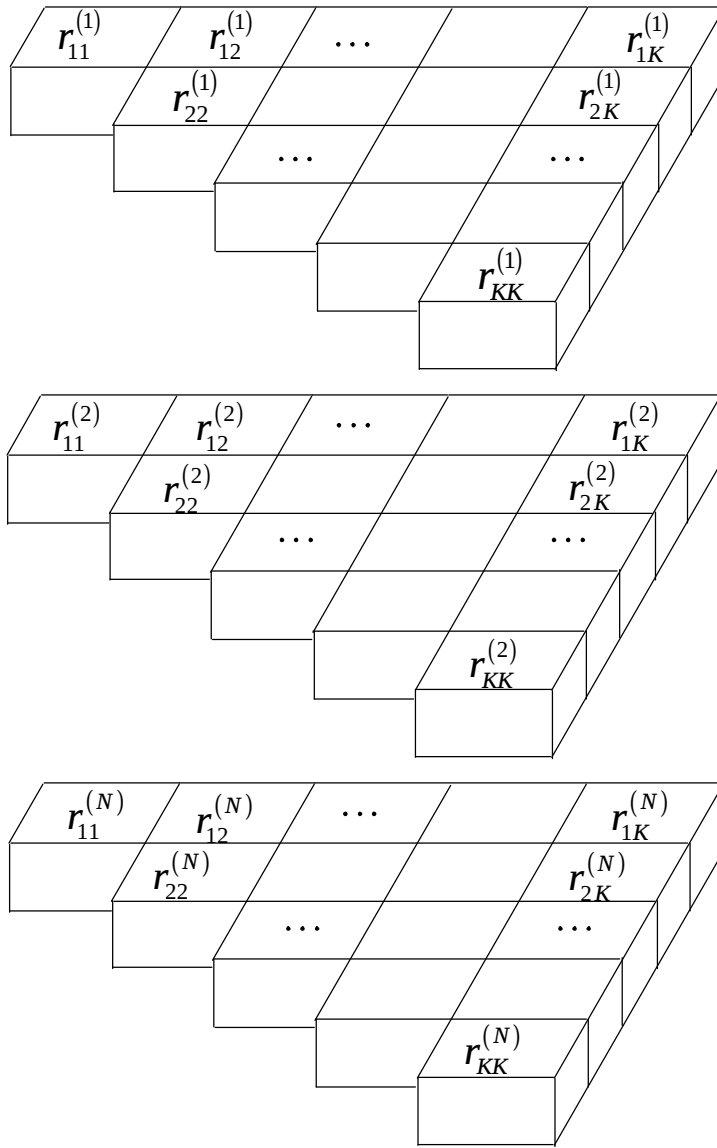


Рис. 3. Матриця коефіцієнтів кореляції КПЕ складеної мережі вузла

З урахуванням викладених міркувань кореляційна матриця КПЕ такої складеної мережі аеровузла є тривимірною матрицею “рядок – стовпець – шар” такого вигляду:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \|\mathbf{R}_{ij1}\| & & & & \\ & \|\mathbf{R}_{ij2}\| & & & \\ & & \mathbf{O} & & \\ & & & \|\mathbf{R}_{ijk}\| & \\ & & & & \mathbf{O} \\ & & & & & \|\mathbf{R}_{ijN}\| \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $\mathbf{R}_{ijk} = \begin{pmatrix} r_{11k} & r_{12k} & \mathbf{L} & r_{1Kk} \\ r_{21k} & r_{22k} & \mathbf{L} & r_{2Kk} \\ \mathbb{M} & \mathbb{M} & \mathbf{O} & \mathbb{M} \\ r_{k1k} & r_{k2k} & \mathbf{L} & r_{KkK} \end{pmatrix}$ – k -й шар матриці $\mathbf{R}$.

Без втрати спільності можна вважати, що матриця $\mathbf{R}$ має розмірність $N \times N \times N$. Крім того, припустимо, що параметри процесів залишаються стаціонарними на інтервалах спостереження і управління. Тоді матриці $\mathbf{R}_{ijk}$ є симетричними. На рис. 3 зображені верхні трикутні частини шарів тривимірної матриці коефіцієнтів кореляції $\mathbf{R}$.

Як зазначено вище, найважливішими КПЕ є затримка передачі, пропускна спроможність, втрати пакетів і рівень безпеки. Ці параметри найбільше впливають на результуючу якість сервісу і, зрештою, на ефективність системи ОрПР загалом.

Найважливішими КПЕ для задач організації, обслуговування і управління повітряним рухом є затримки рейсів на землі та в повітрі.

З урахуванням наведених міркувань як оптимізаційні параметри задачі вибрано такі:

- затримка передачі τ ;
- пропускна здатність C_p ;
- втрати пакетів під час передачі даних L_p ;
- рівень безпеки і захисту даних під час передачі по мережі D_{sp} ;
- середня затримка в повітрі $\bar{d}_{AH}$;
- середня затримка на землі $\bar{d}_{GH}$.

У табл. 3 наведені виокремлені коефіцієнти кореляції оптимізаційних параметрів, за якими надалі можна розраховувати виокремлені коефіцієнти регресії. Числові дані узято з робіт [3, 4].

Таблиця 3

Коефіцієнти взаємної кореляції оптимізаційних параметрів

Параметр							
τ	Коефіцієнти кореляції	1,0					
C_p		0,98	1,0				
L_p		0,69	0,68	1,0			
D_{sp}		0,89	0,86	0,69	1,0		
$\bar{d}_{AH}$		0,75	0,76	0,46	0,77	1,0	
$\bar{d}_{GH}$		0,85	0,88	0,62	0,86	0,50	1,0
		τ	C_p	L_p	D_{sp}	$\bar{d}_{AH}$	$\bar{d}_{GH}$

Між основними ключовими параметрами проявляється сильна кореляція. Це пояснюється тим, що вони істотно впливають на вимоги до якості сервісу. Параметр D_{sp} – рівень безпеки і захисту даних є критичним практично для всіх представлених застосувань, оскільки навіть для таких видів еластичного трафіку, як електронна пошта, захист даних є невід’ємною вимогою забезпечення якості сервісу QoS.

Результати кореляційного аналізу слугують також ключовим індикатором моніторингу і регулювання поточних даних і Web-сервісу. Це необхідно для забезпечення безпечного передавання інформації по мережі, прогнозування і запобігання перевантаженням контрольованого мережевого фрагмента. Отже, поточний моніторинг і управління рівнем безпеки в мережі, які є невід’ємною частиною задачі загального управління якістю сервісу, можна успішно здійснювати статистичними методами, зокрема, методом кореляційно-регресійного аналізу.

Крім того, як показано в роботах [3, 4], повністю скомпільована програма розрахунків займає в пам’яті обчислювального пристрою від 80 до 500 кілобайт залежно від масштабу мережі та об’єму оброблюваної вибірки. Оскільки тепер практично будь-яким мережевим вузлом, по суті, є спеціалізований обчислювач або навіть багатопроцесорна система, задача апаратурної реалізації запропонованого методу може розв’язуватися порівняно просто.

Висновки

У роботі проаналізовано систему ключових параметрів ефективності й особливості їх застосування для управління якістю сервісу інформаційно-обчислювальної управляючої мережі великого аеровузла. Показано, що можна виділити залежності між ключовими параметрами мережі системи ОрПР загалом, що уможливорює побудову системи управління якістю сервісу і, зрештою, оптимізації завдання організації повітряного руху.

Використовуючи ключові параметри ефективності інформаційно-обчислювальної управляючої мережі як складної системи із затримками сигнальної інформації, можна забезпечити прогнозування її стану і вирішувати завдання управління якістю сервісу в реальному часі.

Надалі плануємо продовжити дослідження в цьому науковому напрямі, зокрема, провести порівняльний аналіз точності прогнозу ключових параметрів ефективності методами покрокової регресії, швидкості збіжності алгоритмів корекції та пріоритезації ключових параметрів ефективності залежно від умов роботи аеровузла, наприклад, у штатному режимі і під час виникнення нештатних ситуацій.

1. *Future Aeronautical Communications / Edited by Simon Plass. – Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center (DLR), Germany. – Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. – InTech, 2011. – 378 pp.*
2. *Vodopianov S. Optimisation of Network Structures of Air Traffic Control Systems // Proceedings of the 6th International Conference “Advanced Computer Systems and Networks: Design an Application” (ACSN-2013). – Sept. 16 – 18, 2013. – Lviv, Ukraine. – P. 84–85.*
3. *Водопьянов С. В. Ключевые показатели управления качеством сервиса в информационно-вычислительной сети аэроузла / С. В. Водопьянов. – Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2012. – № 3(23). – С. 71–75.*
4. *Амирханов Э. А. Применение системы ключевых показателей эффективности для оценивания параметров компьютерных сетей / Э. А. Амирханов, С. В. Водопьянов, В. А. Заруцкий, Е. А. Зубарева // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т.10, № 4, – С. 82–87.*
5. *Bertsimas D. An Integer Optimization Approach to Large-Scale Air Traffic Flow Management // Dimitris Bertsimas, Guglielmo Lulli, Amedeo Odoni. Operational Research, Vol. 58, No. 1, January-February 2011, P. 211–227.*
6. *Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Бендат Дж., Пирсол А.; пер. с англ. – Москва : Мир, 1974. – 463 с.*
7. *Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.*
8. *Maral G. Satellite communications systems: Systems, Techniques and Technology / G. Maral, M. Bousquet. – 5th ed. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2009. – 742 p.*
9. *Cheng Y. A Realization of Integrated Satellite-Terrestrial Communication Networks for Aeronautical Services via Joint Radio Resource Management // Yongqiang Cheng, Kai J. Xu, Anju Pillai, Prashant Pillai, Yim Fun Hu, Muhammad Ali, and Adeel Ahmed. 5th International Conference on Personal Satellite Services (PSATS 2013). – P. 26-37. – Toulouse, France, June 27–28, 2013. – 211 p.*