

**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ВОДОП'ЯНОВ СЕРГІЙ В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ**

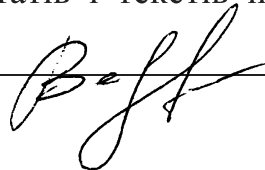
УДК 004.738 (043.5)

**ДИСЕРТАЦІЯ  
МЕТОДИ ПОБУДОВИ АВТОНОМНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ  
СЕГМЕНТІВ АЕРОВОЗЛОВОЇ МЕРЕЖІ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ С.В. Водоп'янов



Науковий керівник  
**Дровозов Володимир Іванович**,  
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Водоп'янов С.В.* Методи побудови автономних комп'ютерних сегментів аеровузлової мережі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

Метою дисертаційної роботи є дослідження та розробка мережного сегменту системи організації повітряного руху (ОрПР), управління повітряним рухом (УПР), зв'язку та навігації повітряних суден.

Для успішного розвитку національної авіатранспортної системи України необхідно орієнтуватися на світові, у першу чергу, на європейські стратегії.

За результатами зарубіжних експертів, у 2025 році у сфері організації повітряного руху в Європі (при порівнянні з сучасним станом) прогнозується:

1. Очікуване до 3-х разів збільшення інтенсивності польотів у повітряному просторі Європи.
2. Десятикратне покращання фактору безпеки польотів.
3. Розширення номенклатури сервісів, від послуг повітряного руху до послуг зв'язку пасажирів повітряних суден (ПС).
4. Управління повітряним рухом буде повністю базуватися на обміні даними.
5. Еволюція комплексної мережної архітектури у напрямку сервіс-орієнтованої архітектури (SOA).
6. Насичення каналів зв'язку внаслідок зростання інтенсивності повітряного руху.

Показники безпеки виражаються у вигляді частоти будь-якої події, що спричиняє шкоду. Підвищенню фактору безпеки польотів у  $N$  разів

відповідає зниження також у  $N$  разів середньої кількості авіаційних подій на 1 млн. годин польотів.

Система УПР будь-якого масштабу і призначення повинна задовольняти багатьом вимогам і, в першу чергу, вимозі інтеграції в міжнародні системи обслуговування повітряного руху.

Основним завданням дисертаційної роботи є підвищення якості сервісу автономного мережного сегменту інформаційно-обчислювальної системи реального часу для роботи в умовах критичного застосування, значних коливань навантаження та виникнення екстремальних ситуацій в аеровузлових мережах складеного типу з високим ступенем гетерогенності.

У дисертаційній роботі розроблено модель ієрархічної багаторівневої структури аеровузлової мережі. Для реалізації безшовної технології при побудові інтегрованої мережі аеровузла, перш за все, необхідно визначитися з комутаційними пристроями – їх принципами побудови, мережними протоколами та специфікою обробки даних. При застосуванні супутникових сегментів у складі інформаційно-обчислювальної мережі необхідно враховувати затримки доставки даних. Тому в інтегрованих комутаційних вузлах, побудованих на базі маршрутизаторів, комутаторів звичайних (*Switch*) і програмних (*Softswitch*), систем передавання даних через *IP*-мережі (*IP Multimedia Subsystem – IMS*) набори протоколів доставки даних мають бути доповнені протоколами тривалого зберігання та гарантованої доставки даних (по типу протоколів мереж з толерантністю до затримок – *Delay-Tolerant Networks – DTN*). У дисертації розроблена модель архітектури інтегрованої мережі аеровузла. Для забезпечення заданого рівня безпеки польотів та якості організації повітряного руху розроблено архітектуру системи авіаційної комунікаційної інфраструктури на базі безшовного об'єднання сегментів не тільки наземного та бортового розташування, але й супутникових сегментів, зокрема, так званих персональних супутникових сервісів (*PSATS*).

У роботі приведені часткові показники ефективності роботи системи ОрПР і види шкал, по яких вони оцінюються. Відібрані ключові показники (*Key Performance Indicators – KPIs*), які безпосередньо пов'язані з якістю роботи інформаційно-обчислювальної мережі як невід'ємного елементу системи ОрПР. Розглянуті імовірнісні характеристики системи, по яких обґрунтовуються вимоги до якості сервісу. Одним з основних показників якості сервісу інформаційно-обчислювальної мережі системи ОрПР є імовірність успішного виконання польоту за час між моментами зльоту і посадки. Для отримання коректного результату також враховані імовірність відмови мережних та/або термінальних вузлів, перепади обчислювального навантаження при виникненні ЛП або передумов до них і т.п. Ці параметри оцінюються в процесі реальної експлуатації мережі і вводяться у функціонал якості роботи інформаційно-обчислювальної мережі для пошуку оптимального рішення.

Для вирішення задач поточного управління інформаційно-обчислювальною мережею крупного аеровузла у роботі застосований системний підхід. Критерії оптимізації ключових параметрів функціонування мережі і поточного управління мережею є неоднозначними і суперечливими. Урахування цих суперечностей і пошук компромісних рішень можливий при використуванні статистичних методів, узгодження достовірності і детальності початкових даних з фізичним сенсом вирішуваних задач. Досліджені характеристики стохастичного взаємозв'язку ключових показників ефективності.

У роботі розроблено модель гіпотетичної мережі *WiMAX*, а для розрахунків використано програму множинного кореляційного аналізу, модифіковану для даної задачі. Для поточного оцінювання за умов нестационарності розроблено методи, які мають можливість адаптації до змін параметрів та стану системи КПЕ, зокрема, метод покрокової регресії.

У дисертаційній роботі:

– розроблено модифікований метод покрокової регресії з включенням і виключенням значущих змінних. Включення і видалення змінних здійснюються за допомогою критерію для перевірки рівності нулю частинного коефіцієнта кореляції або квадрата цієї статистики (критерію). Правило зупинки засноване на завданні допустимого рівня значимості  $t$ -критерію. Повністю скомпільована програма займає в пам'яті обчислювального пристрою від 80 до 500 кілобайт в залежності від масштабу мережі і обсягу оброблюваної вибірки. Оскільки в даний час практично будь-який мережний вузол, по суті, являє собою спеціалізований обчислювач або навіть багатопроцесорну систему, завдання апаратною реалізацією запропонованого методу може вирішуватися порівняно просто;

– розроблено методи оцінювання та забезпечення ефективності автономних сегментів аеровузлової мережі;

– розроблено математичну модель бортової локальної мережі з мобільними вузлами та спорадичною зміною структури, коли одні вузли виходять з зони дії мережі, а нові вузли з'являються;

– виведено розрахункові формули для середнього часу очікування заявок у пам'яті, середньої довжини черги тощо для змішаного – еластичного та нееластичного трафіку;

– розраховані можливі розміри черг у буферній пам'яті мережних вузлів за наявності заявок (сигнальних пакетів) з необмеженим часом очікування та заявок з обмеженим часом очікування у чергах. За результатами розрахунків можна обирати максимально можливий коефіцієнт використання мережі, при якому зростання черги у буферній пам'яті є припустимим;

– відповідно до поставленої мети роботи отримані рівняння і структурні схеми систем управління безпекою мережних структур. Для досягнення поставленої мети застосовано математичний апарат методів теорії марковських процесів та теорії систем зі змінною структурою. Нелінійності в

перемикаючих чарунках пропонується апроксимувати методом статистичної лінеаризації.

За результатами дисертаційних досліджень надано обґрунтовані рекомендації з вибору структури та параметрів аеровузлової інформаційно-обчислювальної та комунікаційної системи. Проаналізовано характеристики очікуваного навантаження на інформаційно-обчислювальну мережу АС УПР, яка входить як невід'ємна складова крупної корпоративної мережі аеровузла, повинна працювати у реальному часі і в умовах можливого виникнення екстремальних ситуацій, тобто в умовах критичного застосування. На основі проведеного аналізу розроблено метод і побудовані алгоритми адаптації сегментів мережі до змін об'ємів інформації, що переробляється, і режимів роботи системи в цілому. Проаналізовано методи обміну різнорідним та різнопriorитетним мережним трафіком. Показано, що в рамках моделі OSI побудова корпоративної мережі АС ОрПР є найбільш ефективною і наочною. Розроблено багатопшарову (багаторівневу) модель мережі АС ОрПР, з багатократним використанням технології «клієнт-сервер». Всі ці процедури спрощуються, а ефективність їх виконання і надійність системи в цілому підвищуються.

Для контролю надійності та визначення нештатних ситуацій в аеровузлових мережах розроблено метод поточного моніторингу, аналізу мереж та діагностування мережних сегментів, вузлів та елементів.

Для складеної мережі крупного аеровузла розроблено метод самодіагностування з взаємними перевірками та змінною логічною структурою перевірочних зв'язків. Для розв'язання практичних проблем накопичення діагностичної інформації, вибору та обґрунтування параметрів обчислювального модуля, призначеного для аналізу діагностичної інформації тощо, модифіковано метод самодіагностування з блукаючим діагностичним ядром. Вершини графа відповідають таким елементам об'єкту діагностики, що здатні виконувати перевірку технічного стану всіх інших його частин. Ці елементи є обчислювальними модулями (ОМ). Показано, що алгоритми

діагностики, організовані за такими структурами, здатні виявити  $m_d = M - 1$  несправностей та виявити й локалізувати  $m_{dl} = (M - 1)/2$  несправностей, якщо система включає  $M$  обчислювальних модулів. Оскільки з інтенсивним впровадженням обчислювальних потужностей у сучасне мережне обладнання мережні та термінальні вузли, по суті, представляють собою багатопроцесорні обчислювальні системи, вони можуть успішно розв'язувати завдання самодіагностування для забезпечення надійності та працездатності інформаційно-обчислювальних систем різного масштабу та призначення.

У процесі дисертаційних досліджень отримані такі наукові результати.

Удосконалено метод визначення ключових показників ефективності та оцінки їх статистичного взаємозв'язку в мережних структурах різних рівнів ієрархії. Це дає можливість підвищення швидкодії мережі аж до роботи в реальному часі при значних коливаннях інтенсивності трафіку та обсягів обчислень

Вперше розроблено моделі управління мережною структурою та метод стохастичної реконфігурації мережі з мобільними абонентами. Завдяки цьому прискорюється процес обміну даними між автономними сегментами мережі за умов дефіциту часу, мережних та обчислювальних ресурсів.

Знайшли подальший розвиток методи забезпечення потрібної якості сервісу, зокрема, якості передачі різнорідного трафіку та самодіагностування автономних мережних сегментів з неоднорідною структурою, що, за експертними оцінками, дає можливість підвищити надійність та відмовостійкість мережі приблизно до 10%. Це дозволяє, з одного боку, знизити затримки доставки даних, а з іншого боку – забезпечити їх доставку за умов великих затримок на розповсюдження сигналів – носіїв користувальницької інформації.

Удосконалено моделі стеку супутниково-незалежних та супутниково-орієнтованих протоколів для застосування широкосмугової мультимедійної

супутникової мережі у завданнях обміну даними в аеровузловій мережі, завдяки чому можна очікувати підвищення продуктивності мережі порядку на 10%.

При рішенні поставлених задач одержані нові практичні результати, до яких можна віднести наступні:

- основні результати теоретичного характеру доведені до розрахункових формул, алгоритмів та програм, які можна використовувати при практичному розгортанні спеціалізованих мереж критичного застосування, зокрема, складених аеровузлових мереж;

- виведені вирази для оцінювання навантаження на окремі мережні сегменти та контролю їх технічного стану будуть корисні при практичній експлуатації мереж різного масштабу та призначення;

- результати системного аналізу взаємного впливу ключових параметрів ефективності функціонування мережі і розробки методу оцінювання статистичного зв'язку цих параметрів методом множинної кореляції і покрокової регресії дають можливість виділити зі всієї сукупності параметрів ключові параметри для вирішення оптимізаційної задачі організації мережі.

Таким чином, запропоновані структури сегментів аеровузлової мережі і локальних обчислювальних мереж для систем критичного застосування можуть служити в основі побудови інформаційно-обчислювальної підсистеми АС ОрПР, тобто розгалуженої аеровузлової мережі з автономними супутниковими та авіаційними бортовими мережними сегментами.

**Ключові слова:** аеровузол, автономний сегмент, комп'ютерна мережа, самоподібний трафік, параметр Херста, система управління комутаційним вузлом.



## SUMMARY

*Vodopyanov S. V.* Methods of construction of autonomous computer segments of the air cluster network. – Qualification scientific work printed as manuscript.

The Dissertation work for the Candidate's Degree of Technical Sciences on Specialty 05.13.05 - Computer systems and components. Educational and Scientific Institute of Computer Information Technologies of the National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The purpose of the Dissertation is network segment research and development of the Air Traffic Organization Systems (ATO), Air Traffic Management (ATM), communication and navigation of an aircraft.

Successful development of the national air transport system of Ukraine is possible after focusing on the world, first of all, on European strategies.

According to the outlook of foreign experts, in 2025, the situation in the field of air traffic management in Europe (when compared with the current state) may look like this.

1. 3× more flights in the EU skies.
2. 10× improved safety factor.
3. More services, from ATS to Air Passenger Communications (APC).
4. ATM will totally rely on data exchange.
5. Complex network architecture evolution tending to service-oriented architecture (SOA).
6. Raising of communication due to air traffic growth.

Safety indicators are expressed as the frequency of any event that causes damage. An increase in safety factor in N times corresponds to the decrease also in N times the average number of aviation events per 1 million hours of flights.

The system of ATM of any size and purpose must satisfy many requirements and, above all, the requirement of integration into international air traffic services systems.

The purpose of the dissertation work is to improve the quality of the service

of an autonomous network segment of the real - time information and computing system for work in the conditions of critical application, significant load fluctuations and the emergence of extreme situations in air cluster networks of composite type with a high degree of heterogeneity.

To achieve this goal, the following scientific and technical tasks have been solved.

1. The characteristics of information flows in specialized computer-based computing systems of critical application are analysed.

2. Improved methods for determining the key parameters of the effectiveness of information and computer systems of aviation in terms of changing priorities of emerging tasks and large variations in computing volumes.

3. Methods of data exchange in on-board computer networks with variable structure are developed.

4. The method of self-diagnostics of autonomous network segments with heterogeneous structure is developed.

5. Models of stack of satellite-independent and satellite-oriented protocols for application of the broadband multimedia satellite network in the tasks of data exchange in the air-phone network have been improved.

In the Dissertation work the model of the hierarchical multilevel structure of the aeronautical network is developed. In order to implement seamless technology, when constructing an integrated network of air clusters, it is first to determine switching devices, their construction principles, network protocols, and data processing specifics. When applying the satellite segments within the information and computer network, it is necessary to take into account delays in the delivery of data. Therefore, in integrated switching nodes built on the basis of routers, switches of the usual (Switch) and software (Softswitch), IP multimedia subsystems (IMS), data delivery protocol sets must be supplemented with protocols for long-term storage and guaranteed data delivery (Delay-Tolerant Networks - DTN) protocols. The dissertation developed the model of the architecture of the integrated network of the airship. To provide the required level

of flight safety and the quality of the air traffic organization, the architecture of the aviation communication infrastructure system has been developed on the basis of the seamless unification of segments of not only terrestrial and on-board, but also satellite segments, in particular so-called personal satellite services (PSATS).

The Thesis presents partial indicators of the efficiency of the work of the Ordway system and the types of scales on which they are evaluated. Selected key indicators (Key Performance Indicators - KPIs) that are directly related to the quality of the information and computer network as an integral part of the Ordinary System. The probabilistic characteristics of the system, which justify the requirements to the quality of service, are considered. One of the main indicators of the quality of the service of the Information and Computing Network of the Ordway system is the probability of successful flight performance during the time between take-off and landing times. To obtain the correct result, the probability of rejection of network and / or terminal nodes, the differences in computational load in the event of LP or prerequisites for them, etc., is also taken into account. These parameters are evaluated in the process of real network operation and introduced into the functionality of the quality of the information and computer network to find the optimal solution.

In order to solve the problems of the current management of the information and computer network of a large aerospace, a systematic approach is used in the work. The criteria for optimizing the key parameters of network operation and current network management are ambiguous and controversial. Taking into account these contradictions and finding compromise solutions is possible by using statistical methods, reconciling the authenticity and detail of the initial data with the physical meaning of solvable problems. The characteristics of the stochastic interconnection of key performance indicators are studied.

As optimal task parameters, the following are usually selected:

- transmission delay  $\tau$ ;
- bandwidth  $C_P$ ;

- packet loss during data transfer  $L_P$ ;
- the level of security and data protection when transmitting over the network;
- the quality of the Web-service;
- quality of audio transmission (audio files, ordinary and IP-telephony);
- Speed and reliability of file sharing via FTP protocol;
- speed and reliability of e-mail (E-mail);
- video quality.

The model of the hypothetical WiMAX network is developed in the work, and for the calculations a multi-correlation analysis program modified for this task was used. For the current evaluation in non-stationary conditions, methods have been developed that have the ability to adapt to changes in the parameters and state of the KP system, in particular, the method of stepwise regression.

Taking into account the following considerations, the optimised parameters of the task are as follows:

- transmission delay  $\tau$ ;
- bandwidth  $C_P$ ;
- packet loss during data transfer  $L_P$ ;
- security and data protection when transmitting over a network  $D_{sp}$ ;
- medium delay in air  $\bar{d}_{AH}$ ;
- the average delay on the ground  $\bar{d}_{GH}$ .

In the work the modified method of stepwise regression with the inclusion and exclusion of meaningful variables is developed. Inclusion and deletion of variables are carried out using the criterion for checking the equality of zero of the partial correlation coefficient or the square of this statistic (criterion). The rule of stop is based on the task of an acceptable level of significance-a criterion. A fully compiled program takes up 80 to 500 kilobytes of memory in a computing device, depending on the scale of the network and the volume of the processed sample. Since virtually any network node, in fact, is a specialized calculator or even a

multiprocessor system, the task of apparatus implementation of the proposed method can be solved relatively simply.

The methods of estimating and ensuring the efficiency of autonomous segments of the aeronautical network are also developed.

The mathematical model of the on-board LAN with mobile nodes and the sporadic change of the structure are developed, when some nodes leave the zone of the network, new nodes appear.

Calculated possible queues sizes in the buffer memory of network nodes in the presence of applications (signal packets) with unlimited waiting time and applications with a limited waiting time in queues. As a result of calculations, you can choose the maximum possible use of the network, in which the growth of the queue in buffer memory is acceptable.

In accordance with the goal of the work the equations and structural schemes of security management systems of network structures are obtained. To achieve this goal, the mathematical apparatus of the methods of the theory of Markov processes and the theory of systems with variable structure is used. Non-linearities in switching cells are proposed to be approximated by the method of statistical linearization.

Based on the results of the dissertation research, these are substantiated recommendations for choosing the structure and parameters of the aeronautical information-computing and communication system. The characteristics of the expected load on the information and computer network AS ATC, which is included as an integral part of a large corporate network of the airbus, must be analysed in real time and in the conditions of possible emergence of extreme situations, that is, in the conditions of critical application. On the basis of the conducted analysis, a method was developed and algorithms for adapting the network segments to changes in the volumes of processed information and the operating modes of the system as a whole were constructed. The methods of exchange of heterogeneous and diverse network traffic are analysed. It is shown that within the framework of the OSI model, the construction of the corporate

network of the AS ATM is the most effective and obvious. A multilayer (multi-level) model of the network of the AS ATM, with multiple use of the "client-server" technology, was developed. All these procedures are simplified, and the effectiveness of their execution and reliability of the system as a whole increase.

In order to control the reliability and identification of abnormal situations in the aerodrome networks, the method of current monitoring, network analysis and diagnostics of network segments, nodes and elements has been developed.

For a composite network of a large air cluster as a distributed computing system built on the modular principle, high-speed data exchange channels have developed a method of self-diagnosis with mutual checks and a variable logical structure of verification links. To solve practical problems of accumulation of diagnostic information, to select and justify the parameters of the computing module intended for the analysis of diagnostic information, etc., the method of self-diagnostics with a roaming diagnostic kernel has been modified. The vertices of the graph correspond to the elements of the object of diagnostics that are capable of performing a check of the technical condition of all its other parts. These elements are computational modules (CM). It is shown that diagnostic algorithms organized according to such structures can detect  $m_d = M - 1$  malfunctions and detect and locate  $m_{dl} = (M - 1)/2$  malfunctions if the system includes  $M$  computational modules. Since the intensive implementation of computing power in today's network equipment, network and terminal nodes are, in essence, multiprocessor computing systems, they can successfully solve the problems of self-diagnosis to ensure the reliability and performance of information and computing systems of various sizes and purposes.

In conclusion, we note that in the dissertation the actual scientific and practical task of working out of methods of constructing segments of the aviation information and computer system for work in conditions of significant load fluctuations and occurrence of extreme situations is solved.

In the process of dissertation research the following scientific results were

obtained.

The method for determining key performance indicators and assessing their statistical interconnection in network structures of different levels of the hierarchy has been improved. This gives the opportunity to increase the network speed up to work in real time with significant fluctuations in the intensity of traffic and computing volumes.

For the first time, models of network structure management and the method of stochastic reconfiguration of the network with mobile subscribers were developed. This accelerates the process of data exchange between standalone segments of the network in the face of a shortage of time, network and computing resources.

Further development methods have been found to ensure the required quality of service, in particular, the quality of the transmission of heterogeneous traffic and the self-diagnosis of autonomous network segments with a heterogeneous structure, which, according to expert estimates, makes it possible to increase the reliability and fault tolerance of the network to about 10%. This allows, on the one hand, reducing delays in the delivery of data, and on the other hand - to ensure their delivery in the event of large delays in the dissemination of signals - the carrier of user information.

Models of stack of satellite-independent and satellite-oriented protocols for the application of a broadband multimedia satellite network in the data exchange tasks in the air cluster network have been improved, which can be expected to increase the efficiency of the network order by 10%.

In solving the tasks, new practical results were obtained, which include the following:

- the main results of the theoretical nature are brought to the calculation formulas, algorithms and programs that can be used in the practical deployment of specialized networks of critical application, in particular, the composite air cluster networks;

- the derived expressions for estimating the load on individual network segments and monitoring their technical state will be useful in the practical

operation of networks of different scale and purpose;

- the results of the system analysis of the mutual influence of the key parameters of the efficiency of network operation and the development of a method for estimating the statistical connection of these parameters by the method of multiple correlation and stepwise regression enable to distinguish from the whole set of parameters key parameters for solving the optimisation task of network organization.

Thus, the proposed structures of the air cluster network segments and local area networks for critical applications can serve as the basis for the construction of the information and computing subsystem of the AS ATM, that is, the branched air cluster network with autonomous satellite and aviation on-board network segments.

**Key words:** air cluster, autonomous segment, computer network, self-similar traffic, Hurst parameter, switching node control system.



## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Водоп'янов С.В. Вплив параметрів комунікаційної мережі аеровузла на ефективність організації повітряного руху. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2015. № 818. С. 110-119.

2. Водопьянов С.В., Дрововозов В.И. Применение моделей трафика данных для мониторинга компьютерных сетей системы управления воздушным движением. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. пр. Київ, 2012. Вип. 1(37). С. 30 - 35.

3. Водопьянов С.В. Ключевые показатели управления качеством сервиса в информационно-вычислительной сети аэроузла. *Наукові записки УНДІЗ: Науково-виробничий збірник*. Київ, 2012. №3(23). С. 71-75.

4. Водопьянов С.В., Харлай Л.О., Толстікова О.В., Боровик В.М. Управление безопасностью бортовой локальной сети в информационно-вычислительной системе аэроузла. *Захист інформації*. 2015. Т. 17. № 4. С. 292 - 297.

5. Водопьянов С.В., Кренц П.А. Оценка надежности обмена данными в перспективной аэроузловой информационно-телекоммуникационной сети. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. Київ, 2013. № 4. С. 79-85.

6. Водопьянов С.В., Дрововозов В.И., Толстикова Е.В. Защита авиационных бортовых сетей от атак методами теории конфликта с применением медовых ловушек. *Захист інформації*. 2015. Т. 17. №3. С. 255 - 263.

7. Амирханов Э.А., Водопьянов С.В., Заруцкий В.А., Зубарева Е.А. Применение системы ключевых показателей эффективности для оценивания параметров компьютерных сетей. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. Київ, 2012. Т.10. №4. С. 82-86.

8. Водопьянов С.В. Алгоритм выбора оптимальной топологии компьютерной сети для автоматизированной системы управления

воздушным движением. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. пр. Київ, 2012. Вип. 3(39). С. 35 - 38.

9. Водопьянов С.В. Корреляционно-регрессионный анализ ключевых параметров эффективности коммуникационной сети аэроузла в задаче организации воздушного движения. *Наукові записки УНДІЗ*: Науково-виробничий збірник. Київ: УНДІЗ, 2015. №4. С. 55 - 66.

10. Водоп'янов С.В., Дрововозов В.І., Журавель Н.В. Моделі й методи оцінювання характеристик та управління автономними сегментами інформаційно-керуючої системи крупного аероузла. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. пр. Київ, 2016. Вип.1 (53). С. 27 - 33.

11. Водопьянов С.В., Мартынова О.П. Автоматизированное управление компьютерной сетью системой с гибридной многокомпонентной структурой. *Avia-2004*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 26-28 квітня 2004 р. Київ, 2004. С. 13.53 - 13.56.

12. Konin V.V., Sushich O.P., Babeychuk D., Vodopianov S.V. Computer-aided system of navigation systems accessibility. «*Aviation in XXI-st century*»: Proceedings of the second world congress. Kyiv, Ukraine, September 19-21, 2005. Kyiv, 2005. PP. 3.57 - 3.61.

13. Vodopianov S.V. Optimisation of Network Structures of Air Traffic Control Systems. «*Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application*»: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference (ASCN – 2013). Lviv, Ukraine, September 16 –18, 2013. Lviv, 2013. PP. 84 - 85.

14. Водопьянов С.В. Оптимизация параметров системы организации воздушного движения. «*Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу*»: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 23 – 24 жовтня 2012 р. Київ, 2012. С. 38 - 39.

15. Водопьянов С.В. Стабилизация процесса выбора оптимальной топологии сети методом анализа иерархий. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2013)*: матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 11 – 13 червня 2013 р. Київ, 2013. С. 24.

16. Водоп'янов С.В. Зв'язок параметрів функціонування інформаційно-керуючих систем аероузлів та ефективності авіаційних комп'ютерних і телекомунікаційних мереж. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2016)*: матеріали ІХ Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 21 – 23 квітня 2016 р. Київ, 2016. С. 17-18.

17. Водоп'янов С.В., Заруцкий В.А., Дрововозов В.И. Перспективы развития кооперативного подхода в аэронавигационных системах крупных аэроузлов. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2017)*: матеріали Х міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 20 – 22 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 19-20.

## ЗМІСТ

|   |           |
|---|-----------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....  | 22        |
| ВСТУП.....  | 23        |
| <b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ</b>  |           |
| <b>ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>   | <b>30</b> |
| 1.1 Терміни та визначення.....  | 30        |
| 1.2 Перспективи вдосконалення національної системи організації<br>повітряного руху.....                                       | 33        |
| 1.3 Сучасний стан та перспективи розвитку авіаційних управляючих<br>та інформаційно-обчислювальних систем.....                | 44        |
| 1.4 Стан проблеми побудови автономних мережних сегментів для<br>перспективних інформаційно-обчислювальних систем авіації..... | 46        |
| Висновки до розділу 1.....  | 57        |
| <b>РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ІЄРАРХІЧНОЇ БАГАТОРІВНЕВОЇ</b>  |           |
| <b>СТРУКТУРИ АЕРОВУЗЛОВОЇ МЕРЕЖІ.....</b>   | <b>58</b> |
| 2.1 Принципи побудови та функціонування сучасної<br>інформаційно-обчислювальної мережі аеровузла.....                         | 58        |
| 2.2 Ключові показники управління якістю сервісу в<br>інформаційно-обчислювальній мережі аеровузла.....                        | 64        |
| 2.3 Кореляційно-регресійна модель системи ключових<br>показників ефективності ієрархічної мережі аеровузла.....               | 69        |
| Висновки до розділу 2.....  | 79        |
| <b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ</b>  |           |
| <b>ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ СЕГМЕНТІВ АЕРОВУЗЛОВОЇ</b>   |           |
| <b>МЕРЕЖІ.....</b>  | <b>80</b> |
| 3.1 Специфіка авіаційних бортових комп'ютерних мереж.....   | 80        |
| 3.2 Методи взаємодії мобільних мережних вузлів.....   | 87        |
| 3.3 Розробка моделі та методу забезпечення якості сервісу в мережі з<br>мобільними вузлами.....                               | 92        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.4 Моделі й методи оцінювання характеристик та управління автономними сегментами інформаційно-керуючої системи крупного аеровузла..... | 104        |
| Висновки до розділу 3.....  | 114        |
| <b>РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИБОРУ СТРУКТУРИ ТА ПАРАМЕТРІВ АЕРОВУЗЛОВОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ.....</b>                    | <b>115</b> |
| 4.1 Загальні вимоги до аеровузлової мережі.....   | 115        |
| 4.2 Аналіз методів обміну різнорідним та різнопріоритетним мережним трафіком.....   | 118        |
| 4.3 Розробка методу діагностування автономних сегментів аеровузлової мережі.....  | 123        |
| 4.4 Вибір та обґрунтування варіантів побудови аеровузлової мережі.....  | 137        |
| Висновки до розділу 4.....  | 143        |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>  | <b>145</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>  | <b>147</b> |
| <b>ДОДАТОК А. АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>  | <b>159</b> |
| <b>ДОДАТОК Б. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....</b>                | <b>162</b> |

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

|        |  |
|--------|--|
| ААЗ    | авіаційний адміністративний зв'язок                |
| АЗС    | автоматичне залежне спостереження                  |
| АОК    | авіаційний оперативний контроль                    |
| АПЗ    | авіаційний зв'язок для пасажирів                   |
| АРМ    | автоматизоване робоче місце                        |
| АС     | автономний мережний сегмент                        |
| АС УПР | автоматизована система управління повітряним рухом |
| БПСМ   | безпроводові сенсорні мережі                       |
| ЕОМ    | електронна обчислювальна машина                    |
| ІКВ    | інтегрований комутаційний вузол                    |
| ЛОМ    | локальна обчислювальна мережа                      |
| МТМЗ   | мережі транкінгового та мобільного зв'язку         |
| ОПР    | обслуговування повітряного руху                    |
| ОрПР   | організація повітряного руху                       |
| ПК     | персональний комп'ютер                             |
| ПП     | повітряний простір                                 |
| ПР     | повітряний рух                                     |
| ПС     | повітряне судно                                    |
| ССЗ    | складена система зв'язку                           |
| ТМЗК   | телефонна мережа загального користування           |
| УПР    | управління повітряним рухом                        |

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Інтенсивний прогрес інформаційних та телекомунікаційних технологій, їх впровадження в усі галузі людської діяльності пов'язані з розробкою та побудовою складних та розвинених інформаційно-обчислювальних систем. Вони стали невід'ємною частиною інформаційно-управляючих систем будь-якого призначення. Це стосується, насамперед, розподілених систем обробки інформації та управління складними об'єктами. Водночас з розширенням меж застосування технологій взаємодії відкритих систем і міжнародних стандартів функціонування інформаційно-обчислювальних структур зростають і вимоги до їх швидкодії та надійності, особливо за умовами використання в системах критичного застосування. До таких систем належать, наприклад, авіаційні, ракетно-космічні, транспортні, енергетичні та інші системи спеціального призначення. Вони, як правило, працюють в умовах безперервного цілодобового застосування у реальному часі.

До таких систем слід віднести і системи організації повітряного руху (ОрПР), управління повітряним рухом (УПР), зв'язку та навігації повітряних суден. Інтенсивність повітряного руху зростає в усьому світі і особливо у регіонах, через які проходять транзитні траси повітряного руху. Повітряний простір України дуже інтенсивно використовується для транзитних рейсів між Європою, Південно-Східною Азією, Близьким Сходом тощо. Тому, вимоги до пропускної спроможності вітчизняних автоматизованих систем ОрПР (АС ОрПР) зростають практично за показовим законом. Це, природно, потребує відповідного зростання ефективності інформаційно-обчислювальних систем, які використовуються для розрахунків та обміну інформацією між наземними та повітряними об'єктами. Тому, задачі підвищення продуктивності обчислювальних структур, комп'ютерних та телекомунікаційних мереж для АС ОрПР як для систем критичного застосування, безумовно, є актуальними.

Значний внесок у розвиток цих наукових напрямів зробили такі вітчизняні

та зарубіжні вчені, як Т.Г. Анодіна, Г.С. Бюшгенс, А.И. Волевач, В.С. Дем'янчук, В.І. Дрововозов, Г.А. Крижановський, Е.Д. Маркович, Г.С. Пяткін, С.Г. Пятко, С.Г. Унгурян, Simon Plass, Ronald E. Morgan, Paul E. Illman, Jonathan M. Stern, T.S. Perr та ін.

Задача дисертаційних досліджень сформульована у такому вигляді: спираючись на результати, одержані цими та іншими науковцями, розробити моделі та методи підвищення якості сервісу автономного мережного сегменту інформаційно - обчислювальної системи реального часу для роботи в умовах критичного застосування, значних коливань навантаження та виникнення екстремальних ситуацій в аеровузлових мережах складеного типу з високим ступенем гетерогенності.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі комп'ютерних систем та мереж Національного авіаційного університету (НАУ) в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи № 682-ДБ13 «Розроблення теорії, методів та технологій оптимального управління гарантоздатною комп'ютерною мережею» (номер державної реєстрації 0113U000028) та кафедральної НДР № 15/09.02.01 «Дослідження перспективних напрямків розвитку комп'ютерних технологій».

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення якості сервісу автономного мережного сегменту інформаційно-обчислювальної системи реального часу для роботи в умовах критичного застосування, значних коливань навантаження та виникнення екстремальних ситуацій в аеровузлових мережах складеного типу з високим ступенем гетерогенності. Для досягнення поставленої мети були вирішені такі науково-технічні задачі:

- проаналізовано характеристики інформаційних потоків у спеціалізованих обчислювальних комп'ютерних системах критичного застосування;

- вдосконалені методи визначення ключових параметрів ефективності інформаційно-обчислювальних систем авіації в умовах зміни пріоритетів



виникаючих завдань та великих перепадів обсягів обчислень;

- розроблено методи обміну даними у бортових комп'ютерних мережах зі змінною структурою;

- розроблено метод самодіагностування автономних мережних сегментів з неоднорідною структурою;

- вдосконалено моделі стеку супутниково-незалежних та супутниково-орієнтованих протоколів для застосування широкосмугової мультимедійної супутникової мережі у завданнях обміну даними в аеровузловій мережі.

*Об'єктом дослідження* є процес обміну даними в автономних сегментах спеціалізованих мереж критичного застосування з різномірним трафіком.

*Предмет дослідження* – моделі й методи побудови автономних сегментів складених мереж гетерогенного типу для авіаційних інформаційно-обчислювальних та керуючих систем.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі застосовувалися наступні методи:

- теорія ймовірностей та математична статистика – використана для статистичного оцінювання параметрів мереж;

- теорія масового обслуговування – використана для аналізу черг та затримок доставки даних;

- системний аналіз – використаний для пошуку компромісів при виборі ключових показників ефективності авіаційних інформаційно-обчислювальних мереж;

- теорія оптимізації – використана для пошуку екстремумів функціоналів ефективності авіаційної мережі;

- теорія диференціальних рівнянь з аргументом, що відхиляється – використана для синтезу моделей комп'ютерних мереж із затримками управляючих та інформаційних сигналів;

- комп'ютерне моделювання – використане для отримання кількісних порівняльних оцінок ефективності авіаційних інформаційно-обчислювальних мереж.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі отримані наступні нові наукові результати.

1. Удосконалено метод визначення ключових показників ефективності (КПЕ) та оцінки їх статистичного взаємозв'язку в мережних структурах різних рівнів ієрархії, який, на відміну від існуючих, дозволяє обирати поточні пріоритети КПЕ. Це дає можливість підвищення швидкодії мережі аж до роботи в реальному часі при значних коливаннях інтенсивності трафіку та обсягів обчислень.

2. Вперше розроблено моделі управління структурою мереж та метод динамічної реконфігурації мережі з мобільними абонентами. Завдяки цьому прискорюється процес обміну даними між автономними сегментами мережі за умов дефіциту часу, мережних та обчислювальних ресурсів.

3. Знайшов подальший розвиток метод забезпечення потрібної якості сервісу (*QoS*), зокрема, якості передачі різнорідного трафіку, шляхом поточного узгодження ключових показників якості *QoS* та самодіагностування автономних мережних сегментів, що, за експертними оцінками, дає можливість підвищити надійність та відмовостійкість мережі приблизно до 10%. Це дозволяє, з одного боку, знизити затримки доставки даних в складених гетерогенних мережах критичного застосування, а з іншого боку – забезпечити їх доставку за умов великих затримок на розповсюдження сигналів – носіїв користувальницької інформації.

**Практичне значення одержаних результатів** визначається їхньою спрямованістю на наступне.

Нові науково-технічні рішення доведені до конкретних функціональних та алгоритмічних схем. Надані рекомендації з побудови ієрархічної мережної структури автономних комп'ютерних сегментів супроводжуються кількісними оцінками потрібних експлуатаційних характеристик.

Результати можуть бути використані для практичних розробок інформаційно-обчислювальних систем критичного застосування зі змінною та стохастичною структурою.

Одержані результати дисертаційної роботи впроваджені на Державному підприємстві повітряного руху України «Украерорух», представляють практичний інтерес і успішно застосовуються в інформаційно-обчислювальних системах розкладу літаків та плануванні польотів в управляючих системах з високим ступенем гетерогенності та технологічних процесах підприємства. Результати роботи використовуються у навчальному процесі Навчально-наукового інституту комп'ютерних інформаційних технологій НАУ при викладанні навчальних дисциплін «Проектування та дослідження комп'ютерних мереж», «Мережні інформаційні технології» та «Гарантоздатні комп'ютерні системи та технології» на кафедрі комп'ютерних систем та мереж НАУ, що підтверджено відповідними актами про впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, написаних у співавторстві, автору належать:

[2] – метод урахування затримок мережних даних та забезпечення толерантності до затримок;

[4] – виведено систему рівнянь Колмогорова – Чепмена для нестационарних станів мережі та запропоновано метод гаусової апроксимації розподілу координат системи у просторі станів;

[5] – проведено розрахунки надійності методу обміну даними в аеровузловій мережі крупного аеровузла;

[6] – розроблено концептуальну модель побудови комбінованої системи захисту з впровадженим додатковим рівнем захисту – мережної медової пастки;

[7] – методика вибору ключових параметрів ефективності та порівняльного аналізу критеріїв оптимальності проектування складених комп'ютерних мереж;

[10] – розроблено моделі процесів стохастичної реконфігурації мережі з мобільними абонентами;

[11] – запропоновано новий метод та мультиструктурну систему управління комп'ютерною мережею гетерогенного типу;

[12] – методика комплексування мережних сегментів ОпПР та АС УПР, побудованої за концепцією CNS/ATM.о

[17] – проведено аналіз графіків залежності ймовірності настання авіаційної події.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конгресах та конференціях:

1. VI Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2004», 26-28 квітня 2004 р., м. Київ.

2. Другий всесвітній конгрес «Авіація в XXI столітті», 19-21 вересня 2005 р., м. Київ.

3. Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу», 23-24 жовтня 2012 р., м. Київ.

4. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології, CSNT-2013», 11-13 червня 2013 р. м. Київ.

5. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: проектування та застосування, ASCN-2013», 16-18 вересня 2013 р., м. Львів.

6. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології, CSNT-2016», 21-23 квітня 2016 р., м. Київ.

7. X Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології, CSNT-2017», 20-22 квітня 2017 р., м. Київ.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковані в 17 наукових працях, серед яких 9 – у наукових фахових виданнях України [1-9] (з них 3 статті у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз [1,4,6]), 1 стаття у збірнику наукових праць [10] та 7 – у матеріалах конференцій [11 – 17].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків по розділам та роботі в цілому, списку використаних джерел із 124 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 164 сторінки і містить 17 рисунків та 7 таблиць. Основний текст дисертаційної роботи викладено на 118 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Терміни та визначення

Для подальшого тлумачення підходів до аналізу та проектування систем організації повітряного руху (ОрПР) дамо визначення основних термінів.

Універсальним підходом до аналізу, проектування та оптимізації систем ОрПР є системний підхід [1]. Базуючись на системному підході, визначимо систему ОрПР як велику та складну систему [2].

Відповідно до визначення великої системи її розмірність є надто великою для повного опису та побудови адекватної аналітичної моделі. Складна система – це така, у моделі якої не вистачає інформації для ефективного управління.

Для подолання проблем опису (розробки адекватної аналітичної моделі) та управління за умов апріорної невизначеності можна задіяти наступні методи:

- розробка аналітичних моделей, максимально наближених до реальної системи;
- декомпозиція багатомірної задачі на сукупність пов'язаних між собою задач меншої розмірності.

Для реалізації першого методу можуть потребуватися невинувато великий об'єм аналітичного опису, кількість та потужність обчислювальних засобів. Спроба досягти повної адекватності моделі може привести практично до реплікації реальної системи.

При використанні другого методу необхідно добувати додаткову інформацію щодо функціональних або хоча б статистичних зв'язків між автономними компонентами системи, відокремленими у результаті декомпозиції. Це потребує побудови багатомірних матриць кореляції між параметрами відокремленого компоненту та кореляції між параметрами

різних мережних компонентів. Виникає додаткове завдання виділення ключових параметрів, від яких найбільше залежать характеристики системи – так звані ключові показники ефективності або *Key Performance Indicators (KPIs)* [3-6].

Для проведення ефективних, економічних і безпечних авіаційних перевезень необхідно в терміни експлуатації систем ОрПР та окремих їх компонентів створити доцільну структуру повітряного простору (ПП).

Обслуговування повітряного руху (ОПР) у рамках загального процесу ОрПР – це планування та координація використання ПП, розподіл зон ПП з урахуванням інтересів інших користувачів, дотримання профілів польотів, часового розкладу тощо [7, 8]; за потреби мінімізувати обмеження на виконання польотів, природно, без зниження прийнятного рівня безпеки польотів.

Безпосередньо управління повітряним рухом (УПР) – це сукупність інженерних задач зв'язку, навігації та спостереження невід'ємних складових загальної задачі ОрПР. Часткові задачі УПР та ОрПР об'єднуються в глобальну задачу *CNS/ATM*.

Автоматизована система УПР (АС УПР) – це мережа розподілених обчислювальних систем загального та спеціального призначення, здатна приймати дані від різних джерел, обробляти їх в реальному часі та надавати необхідну інформацію користувачам (на робочі місця диспетчерам, пілотам і системі управління польотом на борту). Перед АС УПР ставляться наступні основні задачі:

- вибір для кожного ПС найбільш придатного у поточний час режиму польоту з урахуванням завантаженості повітряного простору, стану аеровузла, повітряних трас, наявності нештатних ситуацій, метеорологічних умов та інших факторів;

- визначення чотирьохкоординатної траєкторії запланованого профілю польотів ПС;

- визначення, чи є профіль безконфліктним і, якщо ні, розрахунок характеристик конфліктів, пов'язаних з даним польотом;
- модифікація і оновлення профілів польоту;
- постійне відстеження повітряної обстановки;
- надання систематично або за запитом польотних даних, необхідних диспетчерам і екіпажам ВС.

Нова концепція повністю змінить роль диспетчерів і розподіл їх обов'язків. Більше функцій виконуватиметься безпосередньо системою відповідно до нового визначення відповідальності диспетчера. Всі безконфліктні польоти вимагатимуть мінімуму уваги диспетчера.

Система УПР повинна проектуватися з урахуванням нормального і пікового навантаження і піддаватися розширенню (модульний принцип) з урахуванням очікуваного в майбутньому збільшення об'єму повітряного руху.

Основним автономним елементом авіатранспортної інфраструктури є **аеровузол** (англ. *Air Cluster*) – сукупність близько розташованих аеродромів, організація і виконання польотів, з яких вимагають спеціального узгодження і координування.

**Складена мережа** – сукупність мереж з різними принципами передачі інформації між кінцевими вузлами. Для визначення складеної мережі в англійській літературі служить термін інтермережа (*internetwork*). Компонентами складеної мережі можуть бути як локальні, так і глобальні мережі.

Неоднорідні (**гетерогенні**) мережі, які складаються з різних робочих станцій, операційних систем і додатків, а для реалізації взаємодії між комп'ютерами використовують різні протоколи. Різноманітність всіх компонентів, з яких будується мережа, породжує ще більшу різноманітність структур мереж, які утворюються з цих компонентів.

**Мережний сегмент** (автономний мережний сегмент) – логічно або фізично відокремлена частина мережі. Розбиття мережі на сегменти



здійснюється з метою оптимізації мережного трафіку та/або підвищення безпеки мережі в цілому.

**Інформаційно-керуюча** (іноді – інформаційно-управляюча) **система критичного застосування** – це система з жорсткими вимогами до живучості, надійності, безпеки та дотримання найбільш важливих принципів побудови (наприклад, нейтралізації наслідків відмови будь-якого елемента програмно-апаратних засобів).

Такі терміни, як "складена мережа", "гетерогенна мережа" або "автономний мережний сегмент" є загально вживаними і уповні зрозумілими для спеціалістів.

## **1.2 Перспективи вдосконалення національної системи організації повітряного руху**

Для успішного розвитку національної авіатранспортної системи України, як й інших транспортних систем, з урахуванням її географічного положення необхідно орієнтуватися на світові, перш за все, на європейські стратегії [9,10]. Стосовно повітряного транспорту Україною підписане «Рішення про концепцію гармонізації національних систем організації повітряного руху», яке набуло чинності 19 вересня 2003 року. Рішення доповнює розпорядження КМУ від 5 березня 2009 р. № 273-р «Про схвалення Концепції Державної цільової програми безпеки польотів на період до 2015 року». Згадані документи у всіх аспектах тісно пов'язані з підходами європейських організацій, відповідальних за організацію повітряного руху на міжнародному рівні.

Погляди і походи Європейської конференції цивільної авіації (ЕКЦА) і Європейської організації по безпеці аеронавігації («Євроконтроль») до вдосконалення і гармонізації систем організації повітряного руху (ОрПР) в Європі висловлені в документі «Стратегія ОрПР 2000+», яка повинна збільшити можливості повітряного простору (ПП) та його ефективного використання. Однією з основних областей змін, сформульованої в новій

стратегії Євроконтролю, була організація і використання ПП з метою створення континууму в ПП для УПР.

Основною метою стратегії є розробка задач і необхідних заходів до 2015 р. і далі для планування використання ПП країнами Європейської конференції цивільної авіації (*ECAC*), визначити стратегічні задачі і необхідні заходи для створення гармонізованої основи змін в структурі ПП в країнах *ECAC* до 2015 року і далі. Розвиток стратегії використання ПП повинен здійснюватися за такими основними принципами:

- оцінка потреб і пріоритетів як для тих, хто користується ПП, так і для тих, хто його надає;

- застосування стратегічних принципів нової стратегії в операціях "від дверей до дверей";

- виконання плану глобальної аеронавігації *ICAO* для систем *CNS/ATM* країнами *ECAC* і вироблення основних кроків, описаних в стратегії Євроконтролю, для підтримки реалізації майбутньої системи європейського УПР.

Відповідно до цієї стратегії європейський повітряний простір представляється у вигляді єдиного сегменту світового повітряного простору. Європейський повітряний простір включає: повітряні траси, зони підходу, аеровузли, аеропорти та авіакомпанії. При цьому наголошується необхідність одночасного розвитку зональних систем ОрПР, повітряних трас і аеропортів. Продовжуватиметься об'єднання центрів ОрПР, а також перехід до приватного володіння, обслуговування і управління аеропортами. На основі використання сучасних технічних засобів до 2025 року намічається реалізація гнучкої організаційної структури повітряного простору, що дозволить оперативно змінювати межі секторів управління повітряним рухом (УПР) залежно від повітряної обстановки, що складається.

Держави Європи приступили до реалізації вказаної концепції на основі виконання програми *EATCHIP*, направленої на гармонізацію і інтеграцію національних систем ОрПР, що входять в Євроконтроль. Завдяки

завершенню та впровадженню програми *EATSHIP* пропускна спроможність повітряного простору Євроконтролю збільшилась.

За результатами прогнозу зарубіжних експертів [10] у 2025 році ситуація у сфері організації повітряного руху в Європі (при порівнянні з сучасним станом) може виглядати наступним чином.

1. Очікуване до 3-х разів збільшення інтенсивності польотів у повітряному просторі Європи.
2. Десятикратне покращання фактору безпеки польотів.
3. Зменшення впливу кліматичних умов на безпеку польотів не менш як на 10%.
4. Зменшення вартості операцій по управлінню повітряним рухом (УПР) не менш як у два рази.
5. Розширення номенклатури сервісів, від послуг повітряного руху до послуг зв'язку пасажирів повітряних суден (ПС).
6. Управління повітряним рухом буде повністю базуватися на обміні даними.
7. Розширення смуги частот для задач польотів за маршрутами та для допоміжних задач.
8. Розвиток ринку обслуговування пасажирів.
9. Нові радіосистеми.
10. Зниження витрат на перевезення великих та негабаритних вантажів.
11. Еволюція комплексної мережної архітектури у напрямку сервіс-орієнтованої архітектури (*SOA*).
12. Насичення каналів зв'язку внаслідок зростання інтенсивності повітряного руху.

Розв'язання завдань 1, 2 та 4 можливе завдяки інтеграції авіаційних систем аеронавігації, зв'язку та спостереження на підґрунті впровадження сервіс-орієнтованої архітектури [10]. Крім того, завдяки удосконаленню сервіс-орієнтованої архітектури, і, як наслідок, оптимізації процесів УПР,

очікується зниження викидів двоокису вуглецю не менш як на 10% упродовж польоту.

Система УПР будь-якого масштабу і призначення – аеродромна, аеродромно-районна, трасова, районна, аеровузлова та інші, аж до єдиної національної системи – повинна задовольняти багатьом вимогам і, перш за все, вимозі інтеграції в міжнародні системи обслуговування повітряного руху. Під інтеграцією розуміють електромагнітну сумісність, узгодження точності елементів системи – вимірників, пристроїв обробки і передачі даних, стандартизацію і уніфікацію устаткування [12].

Єдина архітектура національних аеронавігаційних систем є сукупністю основних технічних засобів, об'єднаних єдиною ідеологією побудови і управління. Вона визначається концепцією зв'язку, навігації, спостереження для вирішення задач організації повітряного руху (*Communication, Navigation and Searching for Air Traffic Management – CNS/ATM*). Метою розробки технічної архітектури є координований розвиток окремих елементів систем, взаємодії цих елементів в автоматизованому режимі і створення передумов для інтеграції національних аеронавігаційних систем в Європейську і світову аеронавігаційну інфраструктуру.

Парадигма ОрПР, що розробляється, еволюціонує в напрямку вдосконалення стратегічного та тактичного планування. Це потребує додаткових обчислювальних ресурсів, які зараз не забезпечуються підсистемами комунікацій систем УПР та ОрПР [10].

Концепцією аеронавігаційної системи Євроконтролю передбачаються такі заходи.

1. Управління повітряним судном на всіх етапах польоту: від моменту початку його руху на зліт до моменту зарулювання на стоянку при посадці ("від перону до перону").

2. Оперативний вибір траєкторії руху ПС (маршруту польоту) на основі визначення раціонального балансу між споживачами використання повітряного простору і фактичною ситуацією, що виникла

при рішенні задач УПР.

3. Сумісне (диспетчер-пілот) ухвалення рішень по УПР на основі діалогу між ними і оцінки інформації у реальному часі на всіх етапах польоту.

4. Організація секторів УПР з гнучкою структурою та вільно змінюваними розмірами, що необхідно для поточного управління пропускнуою спроможністю.

5. Сумісне використання повітряного простору і управління повітряним рухом з боку представників військової і цивільної авіації.

6. Підвищення рівня автоматизації рішення задач УПР.

У стратегічному плані найважливішими проектами є розробка і упровадження концепції заданого рівня безпеки повітряного руху, методу обслуговування повітряного руху "від перону до перону" і методу "вільних польотів".

Планування і управління "від перону до перону" пов'язане із забезпеченням маневрування ПС на площі аеродрому і організації навантажувально-розвантажувальних робіт безпосередньо на пероні.

Основна ідея концепції "вільних польотів" полягає в тому, щоб надати можливість всім користувачам повітряного простору виконувати польоти по оптимальних (динамічним) траєкторіях з використанням відповідних технічних засобів (*CNS/ATM*) і процедур УПР, які забезпечують максимальну гнучкість виробництва польотів і високий рівень безпеки. Ці польоти обмежуватимуться з боку системи УПР тільки в наступних випадках:

- якщо передбачувані маршрути польоту і маневри одного ПС заважатимуть польотам інших ПС;
- якщо щільність повітряного руху в певному районі перешкоджатиме виконанню "вільного польоту";
- якщо ПС при виконанні "вільного польоту" може потрапити в зону обмежень;
- якщо диспетчерський склад вважає, що "вільний політ" може

понизити рівень безпеки.

Реалізація методів "зональної навігації" здійснюватиметься еволюційним шляхом і зажадає проведення відповідних заходів щодо гармонізації цих процесів.

Головною метою оптимізації ПП є надання максимальної свободи пересування для всіх користувачів, а також створення умов для ефективного управління пропускнуою спроможністю в автономних секторах (зонах) польотів ПС. Передбачаються спеціальні заходи на загальноєвропейському, а також на національних рівнях, пов'язані з переглядом відповідальності за використання ПП деяких існуючих центрів УПР. При оптимізації ПП враховуватимуться наступні чинники: скорочення мінімумів вертикального ешелонування, гнучке його використання, вдосконалення бортового навігаційного устаткування, а також використання зональної навігації.

За сучасними поглядами, розв'язання поточних та майбутніх проблем розвитку авіаційного транспорту можливо на шляхах розвитку наступних основних організаційних та технічних рішень:

- поєднання наземних, повітряних та космічних систем у рамках загальної концепції *CNS/ATM*;
- розробки цифрових систем обробки та передачі даних, адаптованих під потреби авіатранспортних систем: *AeroMACS*, *NEWSKY*, *SESAR* та *SANDRA*, *LDACS* тощо.

Перспективна аеронавігаційна система базуватиметься на сучасних системах зв'язку, навігації і спостереження, зокрема космічних [11,12], а також на застосуванні засобів автоматизації рішення задач УПР [8].

Нові системи зв'язку, навігація і спостереження зможуть забезпечити істотне розширення можливостей, підвищення пропускнуої спроможності і якість вирішуваних задач в перспективних системах організації повітряного руху тільки при використуванні високопродуктивних засобів обробки, передавання, зберігання і відображення інформації.

Ці системи дозволять значно підвищити рівень безпеки польотів і

пропускну спроможність повітряного простору, раціональний розподіл і використання пропускної спроможності аеропортів, скорочення затримок ПС в повітрі та на землі. Очікується також скорочення експлуатаційних витрат на виробництво і обслуговування польотів, ефективне і гнучке використання повітряного простору за рахунок скорочення інтервалів ешелонування, динамічне планування і використання оптимальних профілів польотів, зниження робочого навантаження диспетчерів і підвищення їх продуктивності.

Рішення вказаних задач здійснюватиметься шляхом автоматизації та комп'ютеризації процесів обслуговування польотів, що включає їх планування і безпосереднє управління, а також організацію потоків руху ПС. Важливою складовою обслуговування повітряного руху є організація аварійного сповіщення і польотно-інформаційного обслуговування.

Система УПР може бути представлена у вигляді багаторівневої ієрархічної структури. Можлива побудова різних ієрархій, що відображають рівні абстрактного опису, складності ухваленого рішення або організаційної і функціональної структур [13].

При аналізі функціонування системи УПР за основну приймається багаторівнева структура, зображена на рис. 1.1. Вона охоплює всі задачі сучасної УПР: від стратегічного прогнозу повітряних перевезень до оперативного управління ПС у реальному часі. Від структури, наведеної в роботі [9], вона відрізняється розподілом зон відповідальності та наявністю не тільки прямих, а й зворотних зв'язків між наявними рівнями.

Задачі, вирішувані на різних рівнях, відрізняються критеріями функціонування відповідних підсистем, складністю і вимогами до швидкості ухвалення рішення.

Об'єктом управління системи УПР є повітряний рух  $P_{AT}$ , оперативне управління яким здійснює підсистема поточного планування з матричною передатною характеристикою  $\mathbf{H}(\mathbf{S}_3) = \mathbf{H}(\mathbf{U}_3, \mathbf{V}_3)$ , де  $\mathbf{U}_3$  – вектор

управляючих дій,  $V_3$  – вектор інформаційних сигналів про координати та швидкості ПС в зоні управління. Оперативне управління направлене на підтримку безпечних інтервалів між ними. Одним із основних критеріїв функціонування системи УПР є кількість порушень норм ешелонування ВС.

Основною метою функціонування підсистеми ОПР є раннє усунення потенційних конфліктних ситуацій, що полягають в можливих порушеннях норм ешелонування між ВС. Підсистема ОПР описується матричною передатною характеристикою  $H(S_2) = H(U_2, V_2)$ , де  $U_2$  – вектор прогнозованих дій управління,  $V_2$  – вектор поточних корегуючи дій. Ця мета реалізується шляхом впорядкування планованого потоку ПС з урахуванням змін, що вносяться в план руху ПС підсистемою оперативного управління  $S_4$ . Критерієм функціонування цієї підсистеми є точність прогнозу конфліктних ситуацій і економічний критерій, що характеризує близькість безконфліктних планів до оптимальних траєкторій руху ВС.

Підсистема ОрПР управління потоками ПС вирішує задачі вищого рівня: координує роботу підсистем, що підпорядковані до неї. Дії підсистеми ОрПР полягають в розподілі потоків ПС між складовими з метою усунення можливих перевантажень потоками ПС елементів авіаційної інфраструктури (аеровузлів, аеропортів, секторів УПР, трас тощо).

Основними критеріями функціонування цієї системи в цілому є імовірність виникнення перевантажень, безпека польотів і економічні показники, що полягають в точному виконанні заявок на польоти.

Система ОрПР в цілому здійснює загальну координацію решти підсистем і первинне впорядкування повітряного руху. Дії цієї системи на інші носять неперервний характер і можуть бути враховані при аналізі процесів ОПР у вигляді початкових умов і обмежень.



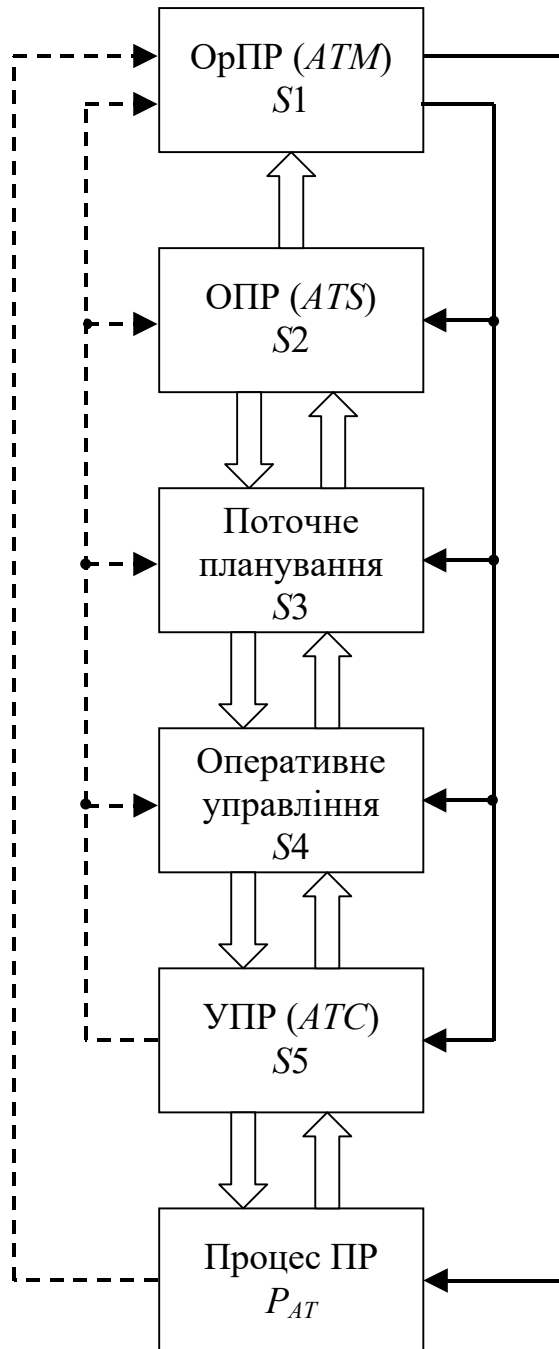


Рис. 1.1. Багаторівнева структура системи УПР

Для практичної реалізації розглянутого алгоритму функціонування системи УПР необхідне виконання великого числа арифметичних і логічних операцій. При високій інтенсивності повітряного руху і великих перепадах обчислювального навантаження цього неможливо добитися без застосування високопродуктивних універсальних і особливо спеціалізованих

обчислювачів. Відповідно до обміну даними у реальному часі між різними учасниками процесу УПР необхідно розробляти високошвидкісні інфокомунікаційні мережі, здатні передавати трафік будь-якого вигляду – мова, документальні і довідкові дані, результати розрахунків і планування тощо. Однак цього буде недостатньо у всіх випадках.

АС УПР, по-перше, є системою реального часу, а по-друге – системою критичного застосування. Для таких систем розробляються державні та галузеві нормативні документи, в яких визначаються жорсткі вимоги до надійності, стійкості до зовнішніх дій, стабільності характеристик в умовах великих перепадів навантаження і при виникненні будь-яких нештатних ситуацій, як передбачених заздалегідь, так і таких, що виникають знову. Особливістю роботи АС УПР як системи критичного застосування є наступне.

При функціонуванні в штатному режимі навіть при порівняно високій інтенсивності потоків обслуговуваних ВС обчислювальне навантаження на систему є хоча і велике, але стабільне. Проте при виникненні нештатної ситуації умови роботи обчислювальної системи різко міняються. До нештатних ситуацій АС УПР, передусім, слідує віднести конфлікти типу “ПС – ПС” або “ПС – земля”. Існує безліч різновидів конфліктів, наприклад, порушення меж ешелону, перетин чужого ешелону, небезпечне зближення ПС на зустрічно-перетинних або догонних курсах тощо. При всіх своїх відмінностях по ступеню небезпеки, часу розв’язання і ін. всі вони мають одну особливість: навантаження на обчислювачі та мережі передачі даних зростають практично миттєво, є у край нестабільними і переходять з одного сегменту обчислювальної системи на іншій абсолютно некоординований. Перепади навантаження можуть складати декілька порядків.

У таких умовах просте підвищення продуктивності обчислювачів і пропускної спроможності мереж передачі даних буде неефективним.

Як обчислювачі, так і мережі повинні мати нагоду адаптації до коливань навантаження на окремі сегменти і перерозподілу мережних

ресурсів між сегментами. Тільки при гармонізації характеристик обчислювальної частини і мережного устаткування можна забезпечити необхідну швидкодію і пропускну спроможність системи в умовах критичного застосування.

Слід зазначити [13], що описаній ієрархії найбільшою мірою відповідає система, що використовує сучасні принципи управління, технічні засоби і здатна ефективно вирішувати задачі оперативного УПР в умовах високої інтенсивності руху (рис. 1.2).

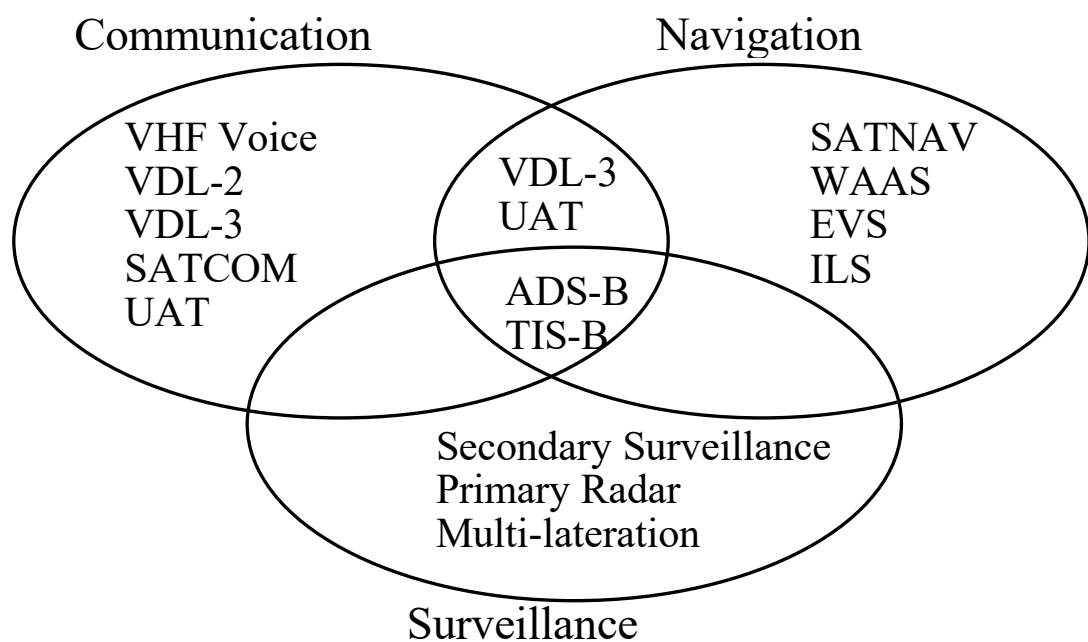


Рис. 1.2. Концепція багаторівневої *CNS*-архітектури

Скорочення:

- *ADS-B*: автоматичне залежне спостереження та розподіл даних;
- *CNS*: зв'язок, навігація та спостереження;
- *EVS*: удосконалена система візуалізації;
- *ILS*: інструментальна система посадки;
- *SATCOM*: супутниковий зв'язок;
- *SATNAV*: супутникова навігація;
- *TIS-B*: служби розповсюдження даних про авіаційний трафік;

- *UAT*: універсальний приймач-передавач системи доступу до даних;
- *VDL*: надвисокочастотний цифровий канал передачі;
- *VHF Voice*: мовний зв'язок через надвисокочастотний канал;
- *WAAS*: глобальна навігаційна система.

Обмін даними та координація роботи усіх рівнів *CNS*-архітектури здійснюється через складену інформаційно-обчислювальну мережу.

При проектуванні мережі головною задачею є виконання основної функції мережі – забезпечення спільного використання ресурсів в реальному часі. Для виконання цієї задачі мережа повинна відповідати вимогам продуктивності, надійності, сумісності, керованості, захищеності, розширюваності та масштабованості [14, 15]. Більш докладно ці та інші вимоги до інформаційно-обчислювальної мережі аеровузла розглянуті нижче.

Типовими абонентами глобальної авіаційної комп'ютерної мережі є корпоративні мережі аеровузлів, локальні мережі авіапідприємств тощо.

### **1.3 Сучасний стан та перспективи розвитку авіаційних управляючих та інформаційно-обчислювальних систем**

Сучасні, а тим більше перспективні структури систем управління повітряним рухом, обміну даними та інформаційно-обчислювальних систем, безумовно, базуватимуться на складених гетерогенних мережах, сегменти яких мають різний масштаб, технічно-експлуатаційні характеристики та цільове призначення.

Залежно від виду даних, що циркулюють у мережі (мова, графіка, цифрові і аналогові дані), вимоги до характеристик інформаційно-обчислювальної системи будуть мінятися в широких межах.

Найкритичнішою характеристикою деяких видів трафіку є чутливість до затримок [16]. Перерахуємо основні типи трафіку комп'ютерних і

телекомунікаційних мереж, циркулюючого в системах УПР [9].

1. Асинхронні прикладні додатки (так званий "еластичний" трафік). Обмеження на час затримки вельми м'які. Приклади – електронна пошта, розсилка польотно-інформаційних і планових матеріалів наступного дня (тиждень, місяць).

2. Синхронні додатки (обмежено еластичний трафік). Допускаються затримки, які непомітні для операторів УПР, наприклад, оновлення метеоданих з інтервалом 10-15 хвилин. Декілька секунд затримки цілком припустимі.

3. Інтерактивні додатки, затримки в роботі яких можуть бути помічені користувачем, але не погіршують функціональність. Приклад – відправка і прийом текстових повідомлень в режимі *on-line*.

4. Ізохронні додатки з пороговою чутливістю до затримок. Приклад – голосовий зв'язок "диспетчер-пілот" по комп'ютерній мережі типу IP-телефонії. Чіткість голосу падає нижче допустимих меж, обумовлених надмірністю, при перевищенні порогу варіації затримок 100-150 мс.

5. Додатки критичного характеру (трафік реального часу, нееластичний трафік). Приклади – режим "вільного польоту" і часткова передача відповідальності за ешелонування екіпажу з контролем, а при необхідності – з корекцією з боку органів системи УПР; виявлення і вирішення конфлікту між двома повітряними судами. Все це вимагає безперервного обміну інформацією між відповідальними виконавцями в реальному масштабі часу.

Важливими характеристиками трафіку даних в системах УПР є також ступінь пульсацій і чутливість до втрат і спотворень даних. До трафіку з малими коефіцієнтами пульсації (потоківому) можна віднести дані спостереження систем радіолокації, навігаційних систем, діагности стану системи УПР і деякі інші. Відповідно, такі види трафіку, як передача даних в системах зв'язку, метеоінформації, планова інформація, дані про критичні та конфліктні ситуації в повітряному просторі, є пульсуючими з коефіцієнтами

пульсацій від 2 до 200.

Чутливість трафіку до втрат і спотворень даних (пакетів, кадрів) також визначається видом трафіку. Наприклад, алфавітно-цифрові дані вельми чутливі до втрат навіть невеликих фрагментів. Це справедливо і для обміну даними в розподілених базах даних, для файлового сервісу, електронної пошти. З другого боку, оцифровані дані траєкторних вимірювань для екстраполяції траєкторії повітряного судна або мовний трафік менш чутливі до втрат, якщо вони не перевищують допустимих меж (звично до величини другого порядку малості, тобто до 10%).

Отже, вибір принципів побудови, апаратного і програмного забезпечення інформаційно-обчислювального комплексу для систем УПР повинні здійснюватися з урахуванням викладених вище результатів аналізу даних, які циркулюють в системі.

Розглянуті завдання завжди були вельми актуальними, а особливо нагальними вони стали у поточний час, коли вимоги до рівня сервісу, безпеки польотів, економічності авіаційних перевезень неухильно зростають на фоні також неухильного зростання інтенсивності польотів. Для розв'язання поставлених завдань виконується великий обсяг досліджень теоретичного (науково-дослідного) та прикладного (дослідницько-конструкторського) характеру. Розглянемо деякі результати досліджень у даному науково-технічному напрямку.

#### **1.4 Стан проблеми побудови автономних мережних сегментів для перспективних інформаційно-обчислювальних систем авіації**

Проблемам вдосконалення систем організації повітряного руху присвячена велика кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених. Розглянемо найбільш відомі роботи та проаналізуємо досягнуті результати.

У роботах [19-21] були закладені основи теорії автоматизації процесів УПР, розроблені принципи побудови автоматизованих систем УПР (АС УПР). Методологічним засадами даних розробок служили застосування

обчислювальних засобів спеціального призначення та інтеграція термінальних елементів – засобів індикації, зв'язку та управління у єдину структуру – автоматизоване робоче місце. Це дозволило значно підвищити пропускну спроможність систем УПР та рівень безпеки польотів.

У роботі [22] окрім розгляду завдань удосконалення систем УПР шляхом автоматизації та комп'ютеризації було запропоновано впроваджувати нові інформаційні технології, зокрема, спеціалізовані інформаційно-обчислювальні та управляючі системи. Завдяки застосуванню таких оновлених систем УПР знизилася навантаження на спеціалістів з управління повітряним рухом – диспетчерів та інших осіб, що приймають рішення. Вони були вивільнені від виконання одноманітних, рутинних операцій і могли зосередитися на вирішенні неординарних завдань, що виникали, та на розв'язанні нештатних ситуацій.

Робота В.І. Дрововозова [9], на нашу думку, є однією з перших робіт з комплексних мережних рішень для систем УПР з високим ступенем автоматизації і комп'ютеризації. Були запропоновані оригінальні підходи та розроблені нові методи перерозподілу обчислювальних ресурсів у тих сегментах розподілених АС УПР, де виникали нештатні ситуації або передпосилання до них. Крім того, В.І. Дрововозов зі співавторами активно займається проблемами побудови моделей мережного трафіку в спеціалізованих мережах, зокрема, в мережах авіаційних систем УПР [23-25].

У роботі [26] та інших роботах Г.С. Пяткіна й Т.В. Холявкіної розглядалися питання автоматизації та комп'ютеризації обробки польотних даних для розв'язання завдань підвищення безпеки польотів, організації регіональних та глобальних систем збору та аналізу статистики льотних пригод та передпосилань до них.

У ряді робіт, виконаних під науково-методичним керівництвом В.С. Дем'янчука [8, 27], розглянуті питання організації повітряного руху на основі концепції *CNS/ATM*, розробки мереж авіаційного зв'язку (*ATN*).

Проаналізовані принципи побудови та характеристики складених мереж *ATN*, організації взаємодії прикладних процесів *ATN* на базі мережене залежних протоколів верхніх рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем (*OSI ISO*). Обґрунтовані перші підходи до об'єднання процесів зв'язку "повітря – земля", "земля – земля", служб зв'язку на основі концепції якості обслуговування та багатокритеріальної оптимізації функціонування системи ОрПП. Проаналізовано вплив автоматизованих та комп'ютеризованих систем ОрПП на регулярність та безпеку повітряного руху за умов реалізації концепції єдиного європейського неба. Результати цих досліджень служать хорошим підґрунтям для побудови повністю автоматизованих та комп'ютеризованих систем ОрПП для аеровузлів різного масштабу, регіональних, зональних та трасових засобів УПР.

У роботах [10-12, 28-50] та ін. розглянуті нагальні питання розробки нових сегментів корпоративних інформаційно-керуючих систем крупного аеровузла та вдосконалення існуючих авіаційних інформаційно-обчислювальних систем в цілому:

- сполучення наземних, повітряних та супутникових систем у рамках загальної концепції *CNS/ATM*, авіаційних цифрових систем обробки та передачі даних (*AeroMACS*, *NEWSKY*, *SESAR* та *SANDRA*, *LDACS* тощо);
- використання персональних супутникових сервісів для інформаційного забезпечення систем ОрПП;
- вивчення можливостей застосування складних мереж з гетерогенною структурою для обслуговування аеровузлів в цілому та окремих складових їх інфраструктури таких, як аеродром, аеропорт, авіакомпанії, допоміжні служби тощо;
- розробка та впровадження автономних мережних сегментів типу безпроводових локальних мереж з мобільними мережними вузлами – так званого "авіаційного бортового Інтернету".

Однак завдання модернізації інформаційно-обчислювальних мереж для сучасних автоматизованих та комп'ютеризованих систем ОрПП, які



працюють у комплексі з інформаційними та комунікаційними системами аеропорту, аеродромного обслуговування, авіакомпаній тощо, поки цілком не розв'язані. Недостатньо вичерпно розв'язані також питання оптимального розподілу обчислювального навантаження на обчислювальні підсистеми окремих сегментів авіаційних транспортних систем, що пов'язані між собою.

По сучасних концепціях автоматизації системи ОПП задача побудови обчислювальної системи зводиться до розробки децентралізованої (розподіленої) багатопроцесорної і багатомашинної структури. Ця структура включає:

- "острови" – локальні мережі робочих груп, пов'язані один з одним через мережу доступу, а із зовнішніми абонентами або джерелами інформації через базові (опорні) мережі;

- сервери або мейнфрейми – потужні обчислювальні машини для вирішення задач глобального контролю і управління автоматизованою системою;

- термінальні процесори (комп'ютери), безпосередньо підключені до систем зв'язку, навігації, спостереження тощо;

- комутаційне обладнання – концентратори, мости, маршрутизатори, комутатори звичайні (*Switch*) і програмні (*Softswitch*), системи передавання різномірних даних через IP-мережі (*IP Multimedia Subsystem – IMS*) тощо – необхідне для розподілу трафіку, конвергенції різномірного трафіку і транспорту трафіку між серверами (мейнфреймами) і термінальними користувачами.

Децентралізація обчислювальної структури дозволяє реалізувати модульний принцип побудови. Це дає можливість модернізації апаратури та/або програмного забезпечення окремих вузлів, локальних мереж конкретних робочих груп, автоматизованих робочих місць тощо з мінімальним втручанням в роботу інших вузлів.

Для уніфікації процесів обміну інформацією з бортовими системами повітряних судів або з іншими центрами управління повітряним рухом

доцільно використовувати стандартні процедури взаємодії. Як зазначалося вище, сама стандартна процедура планує використовувати семирівневу еталонну модель взаємодії відкритих систем і відповідні стеки протоколів локальних і глобальних мереж. Перевагою багаторівневої моделі взаємодії відкритих систем, насамперед, є відокремлення технологічних проблем конвергенції мереж від організаційних задач надання послуг доставки даних, підтримка гарантованої (*guarantee*) або максимально досяжної (*best effort*) якості обслуговування – *Quality of Service, QoS*.

Крім того, необхідно враховувати, що хоча ідеологія побудови і управління національних аеронавігаційних систем, загалом, є єдиною, проте технічна архітектура – сукупність основних технічних засобів – принципово різна для аеродромно-районних, районних, аеровузлових, аеродромних систем УПР. Очевидно, навіть для однотипних систем, розгорнутих в різних регіонах, технічна архітектура ніколи не буде абсолютно ідентичною [30]. Тому, тільки при використуванні єдиної моделі взаємодії типа *OSI* і стандартних стеків протоколів обміну інформацією можна виключити вплив відмінностей в технічних рішеннях.

Нарешті, при використуванні моделі *OSI* можна реалізувати багат шарові структури транспортної мережі самого різного вигляду: мультисервісна мережа поверх *IP*, або цифрова ієрархія *E1* поверх *IP*, або *IP* поверх *ATM*, *IP* поверх *Frame Relay*, *IP* поверх *FDDI* або прямо поверх *SDH*, або прямо поверх *DWDM*. Кінцевий користувач не відчує ніяких особливостей даних технічних рішень. Це дає більше свободи вибору для замовника з урахуванням його фінансових та інших можливостей, прагнення поступової модернізації устаткування і інших чинників.

Нині серйозною проблемою є надмірне навантаження на диспетчерів. Ще в 1999 році наголошувалося [17], що при обслуговуванні так званого Клектонського коридору – найбільш завантаженого сектора повітряного простору в світі, через який рейси з Північної Європи слідує до Лондона – деяким диспетчерам доводилося одночасно керувати 40 літаками. Ясно, що

диспетчери працюють на межі своїх можливостей і при таких перевантаженнях втрачають контроль ситуації на ввірених їм ділянках повітряного простору. Одним із перспективних шляхом зниження навантаження на диспетчерів до прийнятних рівнів є розробка так званих автоматизованих робочих місць (АРМ) з максимально можливим ступенем автоматизації і комп'ютеризації рішення стандартних, рутинних, постійно повторюваних завдань.

Автоматизоване робоче місце, по суті, є апаратно-програмним комплексом на основі окремої ЕОМ або локальної мережі робочої групи. Ключовою вимогою до сучасних автоматизованих систем організації і управління повітряним рухом є необхідність забезпечення безперебійної роботи як при штатних, так і при пікових навантаженнях. При цьому повинні зберігатися необхідний рівень безпеки польотів і забезпечуватися максимальне наближення просторово-часових траєкторій руху ПС до оптимальних. Тому, АС УПР відносять до систем критичного застосування. Відповідно до цього можна сформулювати основні вимоги до обчислювальної системи АС УПР, а саме:

- обробка і передача в режимі реального часу всіх даних, які необхідні для безперебійного обслуговування повітряного руху;
- висока надійність і безпека, високий рівень захисту від несанкціонованого вторгнення, відвертість і прозорість алгоритмів і програм, стандартизація і уніфікація протоколів обміну інформацією;
- розширюваність і масштабованість, можливості модернізації апаратури і модифікації програмного забезпечення без зупинки системи УПР або обмеження її функціональних можливостей.

Для задоволення поставленим (багато в чому суперечливим) вимогам доцільно реалізувати обчислювальну систему у вигляді розподіленої структури – обчислювальної мережі реального часу по типу великої корпоративної мережі [14].

Відповідно до рекомендацій Євроконтролю доцільно використовувати

*UNIX*-подібну операційну систему реального часу *OS-9000*. Перевагою ОС типа *UNIX* є, насамперед, відкритість вихідного коду (на відміну від *Windows*-подібних систем). Крім того, ОС *UNIX* менш уразлива для вірусів.

Обчислювальна мережа з ОС *UNIX* і ним подібними, як мережа реального часу, достатньо природним чином сполучається як з цифровими, так і з аналоговими елементами системи УПР.

Оскільки АС УПР, як правило, є розподіленою, у тому числі і в географічному значенні, її інформаційно-обчислювальна підсистема буде сукупністю фрагментів – локальних мереж, зв'язаних по самих різних телекомунікаційних каналах. Така мережа, як і будь-яка корпоративна мережа, є гетерогенною у принципі – по складу обчислювальних систем, призначених для вирішення різноманітних задач, по комутаційній апаратурі, по топології кожного фрагмента мережі, по характеристиках фізичних каналів передачі даних тощо [14,18]. Тому, для забезпечення сумісності та узгодженої роботи мережі у край важливо використовувати стандартні моделі взаємодії і стеки протоколів. Цілком природною є рекомендація використовувати еталонну модель взаємодії відкритих систем *OSI* для організації функціонування розподілених інформаційно-обчислювальних комплексів, які забезпечують роботу АС УПР.

При використуванні моделі *OSI* процедури узгодження протоколів доступу, обміну інформацією в мережі, адресації тощо реалізуються природним чином. Вони не пов'язані з параметрами конкретних додатків і пристроїв, вживаних в системі, зокрема, в системі УПР.

Розбиття загальної структури на локальні мережі дає можливість враховувати специфічні особливості підсистем зв'язку, навігації, спостереження тощо і відповідним чином підстроювати під них локальну обчислювальну мережу (ЛОМ). З урахуванням специфіки роботи персоналу системи УПР апаратно-програмні комплекси, що входять в її склад, будуються на основі концепції автоматизованих робочих місць (АРМ), що дозволяє істотно понизити завантаження диспетчерів рутинними,

одноманітними процедурами і вивільнити їх для інтелектуальної, творчої діяльності – вироблення і ухваленню швидких, оптимальних і правильних рішень по управлінню технологічним процесом.

Будь-яке АРМ системи УПР будується з використанням обчислювальної техніки, а нині, як правило, або на основі ЛОМ, або з безпосереднім підключенням до ЛОМ, до якої може бути підключено декілька АРМ.

Комп'ютери, що входять до складу АРМ, локальної і корпоративної мережі, можуть істотно відрізнятись по своїх обчислювальних можливостях, структурі, наборі периферійного устаткування тощо від стандартних персональних комп'ютерів (ПК) до робочих станцій, серверів і мейнфреймів з унікальними можливостями.

У комп'ютерах і ЛОМ автоматизованих робочих місць можуть використовуватися ОС *Windows* і мережні бази даних типа *MS SQL Server*. У великих аеровузлових або аеродромно-районних системах УПР використовуються, як правило, потужні обчислювальні системи (робочі станції і сервери) провідних виробників: *IBM, DEC, HP, SUN*. Завдяки використанню стандартних відкритих *UNIX*-подібних ОС і моделі *OSI* відкриваються можливості перенесення розробленого програмного забезпечення для АС УПР на будь-яку з перерахованих вище платформ.

Як системи управління базами даних для великих аеровузлів, мабуть, доцільно використовувати програмні продукти так званої «великої трійки»: *Oracle, Informix, MS SQL Server*. Їх достоїнствами є високий ступінь опрацювання деталей, надійність, відпрацьовані методики написання клієнтських додатків, постійний супровід виробниками цього програмного забезпечення.

Як наголошувалося вище, корпоративні мережі будуються за «острівним» принципом, тобто у вигляді сукупності більш-менш незалежних фрагментів, між якими відбувається обмін даними через мережі доступу і транспортну мережу. Останні є багатошаровою інфраструктурою, на

нижньому (фізичному) рівні якої можуть використовуватися канали передачі даних, побудовані з використанням самих різних фізичних принципів:

- проводові;
- кабельні коаксіальні і на витій парі;
- волоконно-оптичні;
- радіоканали наземного, авіаційного і космічного зв'язку;
- радіорелейні лінії;
- змішані.

Крім гетерогенності корпоративних мереж (у тому числі і мереж систем УПР), про яку мовилося вище, їх характерною властивістю нині є конвергованість – об'єднання різнорідного трафіку – голос, дані, відео – і передача по одних і тих же каналах безпосередньо кінцевому користувачу.

Як відомо, трафік конвертованих мереж вже не можна із задовільною точністю описувати, використовуючи класичні моделі (поток Пуассона, Пальма, Ерланга, марківські моделі). Специфікою різнорідного трафіку є фрактальний або самоподібний характер. Неврахування такої специфіки приводитиме до завищених оцінок продуктивності мережі і, відповідно, до недооцінки вимог до швидкодії і об'ємів необхідної буферної пам'яті комутаційного устаткування.

Другою важливою особливістю гетерогенної мережі системи УПР, особливо актуальною у світлі забезпечення режиму реального часу, є режим запобігання колізій (одночасної передачі кадрів двома станціями) в "острівцях" безпроводових локальних мереж з технологією *WLAN 802.11*. Режим виявлення і запобігання колізій (*CA – collision avoidance*) – це штатний режим технологій *WLAN 802.11* – платня за простоту методу доступу до середовища передачі даних, що розділяється. Метод доступу *CSMA/CA (carrier sense multiply access with collision avoidance)* у принципі не гарантує доступу до середовища. Користувач (робоча станція) може дістати доступ тільки випадковим чином, після прослуховування фізичного середовища, з імовірністю меншою 1 і залежно від коефіцієнта

використовування мережі – відношення середнього завантаження мережі до потенційної пропускної спроможності. При зростанні інтенсивності трафіку імовірність виникнення колізій збільшується, і мережа все велику частину часу починає працювати "на себе", обробляючи колізії. Частка корисної інформації в загальному потоці зменшується. При деякій гранично допустимій інтенсивності трафіку, коли імовірність колізій близька до 1, коефіцієнт використання мережі теж прагне до 1, проте реальна пропускна спроможність (у значенні передачі корисної інформації) падає до нуля. У мережі циркулюють тільки сигнали про наявність колізій.

Ясно, що дана ситуація неприпустима для таких систем реального часу, як система УПР і навігації. Тому, однією із задач дисертаційних досліджень є розробка методики оцінки гранично допустимого коефіцієнта використання локальних мереж у складі корпоративної мережі АС УПР, методів структурної адаптації окремих сегментів ЛОМ і виробітку рекомендацій по коректній конфігурації мереж.

Отже, за результатами аналізу сучасного стану та перспектив розвитку мережної інфраструктури великих систем ОрПР, нагальних наукових проблем проектування, розробки та оптимізації складених мереж з суттєво гетерогенною структурою, не вирішених на цей час, можна стверджувати, що вельми актуальним є дослідження та розробки у таких напрямках:

- організація сумісної роботи телекомунікаційних та комп'ютерних мереж з обміном даними у різних фізичних середовищах;
- узгодження базових характеристик мереж або автономних сегментів мережі для забезпечення наскрізної (*End-to-End*) якості обслуговування;
- забезпечення толерантності до затримок даних та гарантованої доставки даних у мережах зі змінною структурою, раптовими розривами з'єднань, зникненнями та появами мережних комутаційних вузлів;
- організація маршрутів доставки даних за умов неконтрольованих перепадів мережного та обчислювального навантаження (наприклад, при виникненні нештатних ситуацій або передпосилань до льотних пригод).

Всі ці та інші додаткові задачі організації інформаційно-комунікаційних, зокрема, комп'ютерних мереж як невід'ємної складової авіаційної транспортної інфраструктури є вельми нагальними й потребують розв'язання у досить короткі терміни за умов певних обмежень на матеріальні та технічні ресурси.



## Висновки до розділу 1

1. В результаті аналізу вимог до мережних та обчислювальних структур, що входять до складу систем критичного застосування, встановлено, що перепади інтенсивності обчислювального навантаження і об'ємів трафіку даних можуть складати декілька порядків.

2. Для забезпечення ефективного функціонування систем критичного застосування з гетерогенною структурою, типовими прикладами яких є системи ОрПР, ОПР та АС УПР, необхідно, по-перше, мати резерв продуктивності обчислювачів, по-друге – резерв пропускної спроможності мереж обміну даними, а, по-третє – забезпечувати обмін інформацією між споживачами у реальному часі.

3. Показано, що забезпечити високу продуктивність інформаційно-обчислювальних мереж авіаційних систем ОрПР можна шляхом децентралізації і перерозподілу обчислювального навантаження, розробки методів оптимальної прокладки маршрутів доставки комп'ютерного трафіку до різних сегментів мереж, що забезпечують роботу систем управління повітряним рухом.

4. Для обміну даними між ланками АС УПР в умовах різноманітного трафіку зі змінною інтенсивністю необхідно розробити методи раціонального перерозподілу навантаження на елементи корпоративної мережі АС УПР.

5. Поставлені основні задачі дослідження:

- розробити методи підвищення продуктивності автономних сегментів крупної корпоративної мережі аеровузла;
- розробити методи забезпечення потрібної якості сервісу, зокрема, якості передачі різноманітного трафіку в складених гетерогенних мережах критичного застосування з урахуванням специфіки авіаційного транспорту;
- розробити методи раціонального перерозподілу мережного та обчислювального навантаження в автономних сегментах мережі аеровузла;
- розробити моделі безпроводових локальних мереж з мобільними абонентами – вузлами мережі – та зі змінною структурою;
- розробити метод визначення ключових показників ефективності та оцінки їх статистичного взаємозв'язку в мережних структурах різних рівнів ієрархії.

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЬ ІЄРАРХІЧНОЇ БАГАТОРІВНЕВОЇ СТРУКТУРИ АЕРОВУЗЛОВОЇ МЕРЕЖІ

#### 2.1 Принципи побудови та функціонування сучасної інформаційно-обчислювальної мережі аеровузла

Одним із наріжних каменів удосконалення авіаційної комунікаційної інфраструктури є інтеграція існуючих, а особливо майбутніх засобів ОпПР у так звану "систему систем" [10], яка базується на безшовній організації авіаційних мереж та стиковці мережних сегментів. До таких проектів відноситься, наприклад, дослідницький проект *SANDRA* (*Seamless Aeronautical Networking through integration of Data-links, Radios and Antennas*). Система систем авіаційної комунікаційної інфраструктури базується на безшовному об'єднанні сегментів не тільки наземного та бортового розташування, але й супутникових сегментів, зокрема, так званих персональних супутникових сервісів (*PSATS*) [11-13].

Як відмічалось раніше, основним автономним елементом авіатранспортної інфраструктури є аеровузол – близько розташовані аеродроми, організація і виконання польотів з яких вимагають спеціального узгодження і координування. Для реалізації безшовної технології при побудові інтегрованої мережі аеровузла, перш за все, необхідно визначитися з комутаційними пристроями – їх принципами побудови, мережними протоколами та специфікою обробки даних [30,49]. Наприклад, при застосуванні супутникових сегментів у складі інформаційно-обчислювальної мережі необхідно враховувати затримки доставки даних. Для супутників, що знаходяться на високих геостаціонарних орбітах, тільки затримки на розповсюдження сигналу від користувача до супутника й назад складають близько 250 мілісекунд. Тому, в інтегрованих комутаційних вузлах, побудованих на базі маршрутизаторів, комутаторів звичайних (*Switch*) і програмних (*Softswitch*), систем передавання даних через IP-мережі (*IP*

*Multimedia Subsystem – IMS*) набори протоколів доставки даних мають бути доповнені протоколами тривалого зберігання та гарантованої доставки даних (по типу протоколів мереж з толерантністю до затримок – *Delay-Tolerant Networks – DTN*). Крім того, необхідно забезпечувати взаємодію між успадкованими мережами *ATN* на основі еталонної моделі *OSI* та майбутніми мережами *ATN/IPS* на основі стандарту *IPv6*. У подальшому будуть розглянуті модифіковані архітектури протоколів та інтерфейсів для застосування в інтегрованих аеровузлових мережах.

На рис. 2.1. представлена модель архітектури інтегрованої мережі аеровузла.

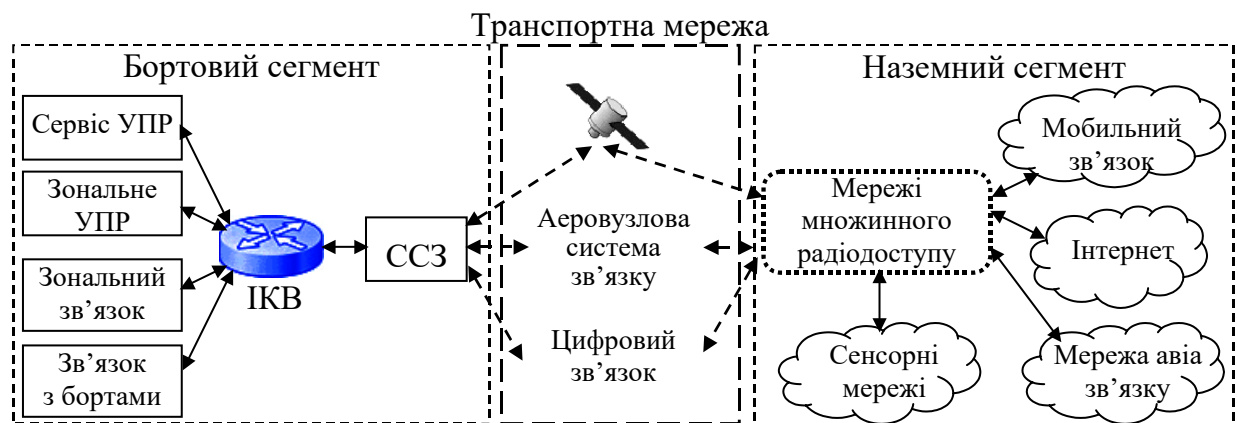


Рис. 2.1. Мережна архітектура інтегрованої мережі аеровузла.

ССЗ – складена система зв'язку; ІКВ – інтегрований комутаційний вузол

Окрім складених комунікаційних мереж, які об'єднують різні сегменти, до складу інтегрованої мережі аеровузла входить безліч сервісних мереж, які використовуються для забезпечення обміну інформацією, безпосередньо не пов'язаною з організацією повітряного руху. Це мережі авіакомпаній, аеропортів, що входять до складу аеровузла, спеціалізовані мережі для контролю стану аеродрому – льотного поля, службових приміщень, ангарів, диспетчерських веж тощо. Прикладами таких мереж служать мережі транкінгового та мобільного зв'язку, сенсорні мережі для збору інформації про температуру та вологість злітно-посадочних смуг, рульових доріжок та ін. На рис. 2.2. зображена структура такої мережі.

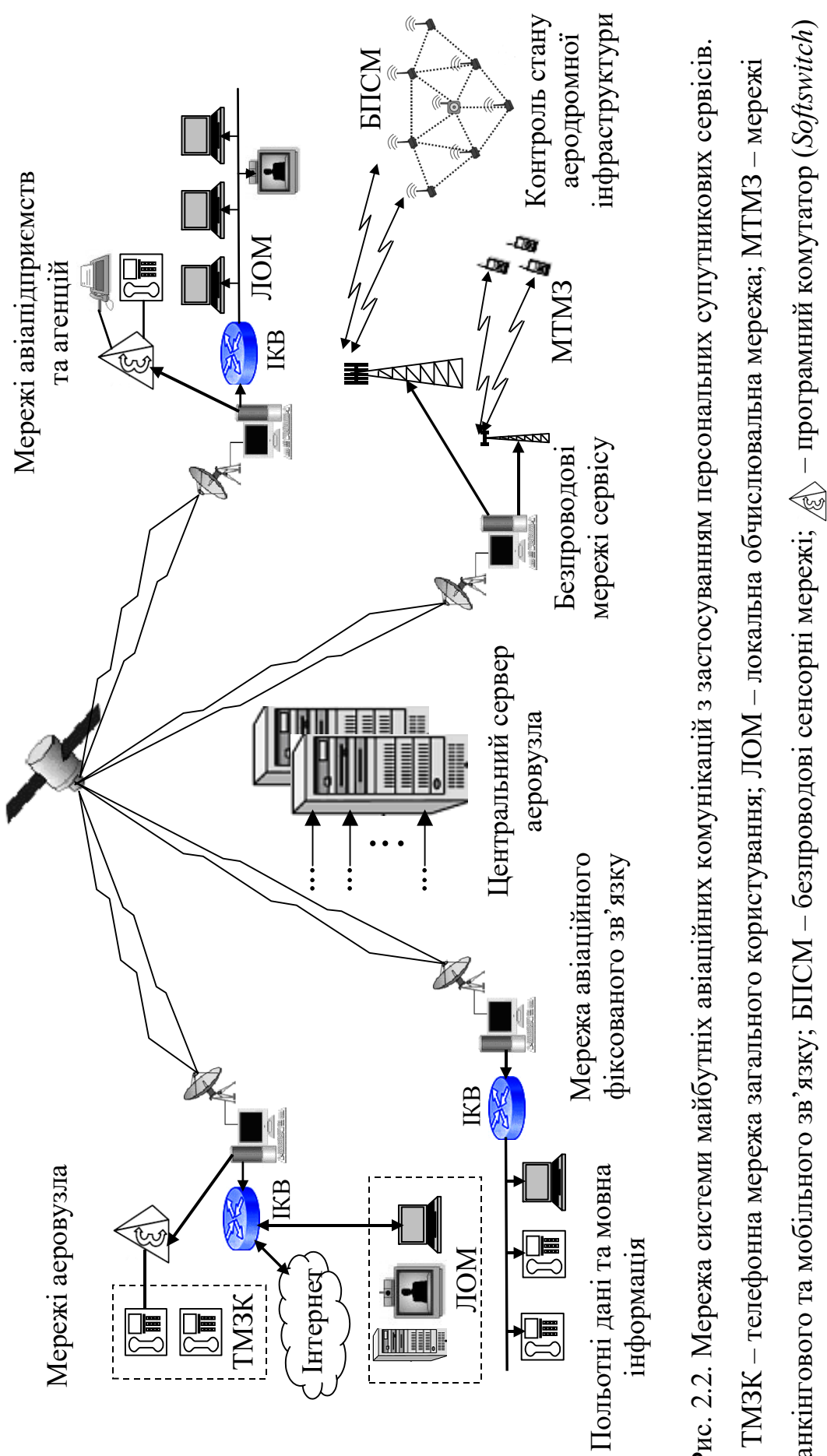


Рис. 2.2. Мережа системи майбутніх авіаційних комунікацій з застосуванням персональних супутникових сервісів.  
 ТМЗК – телефонна мережа загального користування; ЛОМ – локальна обчислювальна мережа; МТМЗ – мережі транкінгового та мобільного зв'язку; БПСМ – безпроводові сенсорні мережі; – програмний комутатор (Softswitch)

Нині на основі використання сучасних технічних засобів реалізується концепція гнучкої організаційної структури повітряного простору, що дозволяє оперативно змінювати межі секторів УПР залежно від повітряної обстановки, що складається. Здійснюється оптимізація повітряного простору, завдяки чому забезпечується заданий рівень безпеки повітряного руху, метод обслуговування повітряного руху "від перону до перону" і використання технології зональної навігації (так званий метод "вільних польотів").

В умовах очікуваного зростання інтенсивності повітряного руху, і, перш за все, міжнародного, необхідно покращувати координацію процесів організації повітряного руху (ОрПР), забезпечувати безперервний обмін інформацією між всіма елементами авіатранспортної інфраструктури, зокрема як усередині конкретного аеровузла, так і між різними аеровузлами. Для цього розробляється єдина технічна архітектура національних аеронавігаційних систем, визначених раніше згадуваною концепцією "Зв'язок, навігація, огляд/управління повітряним рухом" (*Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management – CNS/ATM*).

У технологічному плані розвиток йде по шляху автоматичного обміну даними, голосовий зв'язок використовується в нестандартних і аварійних ситуаціях [51].

Існують дві основні категорії видів авіаційного зв'язку.

1. Види зв'язку, що відносяться до забезпечення безпеки польотів, які повинні мати високу цілісність і швидкодію:

- зв'язок в цілях обслуговування повітряного руху (ОрПР), здійснювана між органами організації повітряного руху (ОПР) або органом ОПР і повітряним судном (ПС) для забезпечення управління повітряним рухом (УПР), передачі польотної інформації, застережливих повідомлень тощо;

- зв'язок в цілях авіаційного оперативного контролю (АОК), здійснюваний експлуатантами повітряних судів для вирішення питань, пов'язаних з безпекою, регулярністю і ефективністю польотів.

2. Види зв'язку, що не відносяться до забезпечення безпеки польотів:

- авіаційний адміністративний зв'язок (ААЗ), здійснюваний авіаційним персоналом та/або авіаційними організаціями, авіакомпаніями для вирішення адміністративних і часткових питань;

- авіаційний зв'язок для пасажирів (АПЗ).

Крім того, для передачі даних спостереження і даних, що забезпечують краще знання повітряної обстановки, використовується прямий зв'язок і зв'язок в режимі радіомовлення.

Передбачається, що регулярний зв'язок "повітря – земля" на етапі польоту по маршруту, зв'язок між наземними службами аеровузла, зв'язок між аеровузлами в основному буде обміном цифровими даними. В цьому випадку користувач вибирає конкретне повідомлення про заздалегідь складеного переліку, використовуючи меню на екрані монітора, додає деякі специфічні параметри (або довільний текст) і потім відправляє повідомлення. В деяких випадках передача даних здійснюється між автоматизованими бортовими і наземними системами без необхідності ручного втручання. Такий обмін даними, на думку експертів, набагато скоротить об'єм мовного зв'язку і зменшить робоче навантаження пілотів і диспетчерів.

Найважливішою ланкою авіатранспортної інфраструктури є сукупність мереж авіаційного електрозв'язку, локальних комп'ютерних мереж центрів УВС, інших мереж, об'єднаних в корпоративну мережу системи ОрПР [8].

Для оптимізації або вибору раціональної структури такої мережі необхідно визначити основні параметри, які найбільш впливають на ефективність її функціонування. На нашу думку, вельми продуктивним підходом до розв'язання даного завдання є вибір та обґрунтування ключових показників ефективності, про які говорилося раніше. Розглянемо метод вибору та обґрунтування ключових показників ефективності на основі кореляційно-регресійних моделей.

## 2.2. Ключові показники управління якістю сервісу в інформаційно-обчислювальній мережі аеровузла

Обмін інформацією у мережі між будь-якими абонентами системи забезпечується в реальному часі при змінах вигляду, пріоритету, інтенсивності мережного трафіку в широких межах. Для вирішення цієї задачі параметри і структура мереж вибираються залежно від кількості робочих місць, починаючи від одиниць до сотень робочих місць, і передбачається можливість зміни конфігурації без зупинки роботи системи.

Це досягається використанням різних транспортних середовищ:

- для систем, що складаються з 1-3 робочих місць – безпосереднє підключення до автоматизованих робочих місць (АРМ);
- для систем, що складаються з 4-8 робочих місць – мережі доступу, зокрема безпроводові;
- для систем, що включають від 10 до 20 робочих місць – локальні мережі з логічною структуризацією і мікросегментацією;
- для систем з великою кількістю робочих місць (від 20 до 500 і більш) – мережі з асинхронним режимом передачі (*Asynchronous Transfer Mode* – *ATM*-мережі) з маршрутизаторами, програмними комутаторами *Softswitch* або системами передавання даних через *IP*-мережі (*IP Multimedia Subsystem* – *IMS*).

При цьому необхідно вибрати і обґрунтувати критерії ефективності інформаційно-обчислювальної мережі аеровузла, по яких оптимізуються структура і параметри мережі. На жаль, нині не існує обґрунтованих критеріїв, які дозволяють оцінити якість ОрПР в зоні відповідальності конкретного аеровузла [8]. У даній роботі зроблена спроба заповнити цей пропуск.

Загальні критерії ефективності повинні вибиратися так, щоб можна було одержувати порівняльні оцінки якості роботи мереж різних аеровузлів, а головне – забезпечувати гарантовану якість сервісу, що для систем ОрПР як систем критичного застосування є першочерговою задачею.

Оскільки система ОрПР є багатофункціональною системою, природно припустити, що оптимізація її ефективності представляє збір багатокритеріальну задачу. Якість і продуктивність системи ОрПР можна визначати за номінальними, порядковими або інтервальними і відносними (кількісним) шкалами [52]. У табл. 1 приведені часткові показники ефективності роботи системи ОрПР і види шкал, по яких вони оцінюються [5].

Таблиця 1.

| Ефективність (результативність) функціонування системи ОрПР |   |                           |   |
|---|---|---------------------------|---|
| Продуктивність системи                                      | ┌ | Якість результатів роботи | ┌ |
| Інтервальна оцінка  | ← | Інтервальна оцінка        | ← |
| Номінальна оцінка   | ← | Порядкова оцінка          | ← |
| Порядкова оцінка  | ← |                           |   |

Розглянемо тепер критерії ефективності системи ОрПР і якості надаваних послуг (табл. 2).

Таблиця 2.

| №    | Показник                                      | Часткові параметри   |
|------|---|--|
| 1.   | Загальний показник якості системи ОрПР        |  |
| 1.1. | Показники якості джерел динамічної інформації | <ul style="list-style-type: none"> <li>- кількість каналів обміну даними;</li> <li>- темп надходження інформації;</li> <li>- точність вимірювань;</li> <li>- розміри зони спостереження;</li> <li>- розрізнявальна спроможність;</li> <li>- імовірнісні характеристики (помилки першого і другого роду);</li> <li>- інші.</li> </ul> |



|      |                                  |   |
|------|----------------------------------|---|
| 1.2. | Показники якості сервісу         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- точність і достовірність інформації, яка передається;</li> <li>- розбірливість мови, затримки, джиттер;</li> <li>- число втрачених і спотворених пакетів даних;</li> <li>- зручність користування системою.</li> </ul> |
| 1.3. | Показники продуктивності системи | <ul style="list-style-type: none"> <li>- число одночасно обслугованих повітряних судів в зоні дії;</li> <li>- число одночасно обслугованих повітряних судів в одиницю часу;</li> <li>- максимальна і середня пропускна спроможність системи ОрПР.</li> </ul>    |
| 1.4. | Економічна ефективність          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ставки тарифів і аеронавігаційних платежів;</li> <li>- експлуатаційні витрати і рентабельність;</li> <li>- термін окупності і ін.</li> </ul>   |

Загальне число показників ефективності і результативності роботи системи ОрПР, строго кажучи, значно більше. Тут відібрані деякі ключові показники (*Key Performance Indicators – KPIs*) [5, 6], які безпосередньо пов'язані з якістю роботи інформаційно-обчислювальної мережі як невід'ємного елемента системи ОрПР.

Далі розглянемо деякі імовірнісні характеристики системи, по яких обґрунтовуються вимоги до якості сервісу. Одним із основних показників якості сервісу інформаційно-обчислювальної мережі системи ОрПР є імовірність успішного виконання польоту за час між моментами зльоту і посадки [8]. Необхідно вирішувати задачу оцінювання часткового показника – якості сервісу по інтегральному показнику – імовірність успішного

виконання польоту. Ця задача, по суті, є зворотною задачею і відноситься до класу некоректних задач математичної фізики [53]. Для отримання стійкого рішення необхідно вводити додаткові обмеження на параметри і структуру мережі, а також конкретизувати вимоги до продуктивності мережі.

Звично імовірність успішного виконання польоту за час  $\Delta T_{TL}$  між моментами зльоту і посадки підкоряється експоненціальному закону розподілу:

$$P(t) = \exp(-\lambda \times \Delta T_{TL}). \quad (2.1)$$

Відповідно, імовірність неуспішного завершення польоту

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda \times \Delta T_{TL}). \quad (2.2)$$

Тут  $\lambda$  – середня частота виникнення льотних подій (ЛП) або передумов до ЛП за одиницю часу польоту.

Якщо врахувати, що величина  $\lambda$  значно менше одиниці, то можна розкласти експоненту в ряд Тейлора і обмежитися лінійним членом розкладання. Тоді наближений вираз (2.2) матиме вигляд:

$$Q(t) = 1 - 1 + \frac{\lambda \times \Delta T_{TL}}{1!} - \frac{(\lambda \times \Delta T_{TL})^2}{2!} - \dots (-1)^n \frac{(\lambda \times \Delta T_{TL})^n}{n!} + \varepsilon (\lambda \times \Delta T_{TL})^n \approx \lambda \times \Delta T_{TL}. \quad (2.3)$$

Якщо інформаційно-обчислювальна мережа входить до складу системи ОрПР аероузла, обслуговуючого  $N$  повітряних судів одночасно, то імовірність успішного виконання польотів за певний період визначатиметься як

$$P_N(t) = \exp\left(-\sum_{k=1}^N \lambda_k \times \Delta T_{TLk}\right), \quad (2.4)$$

де  $\lambda_k$  – середня частота виникнення ЛП з  $k$ -м повітряним судном;  $\Delta T_{TLk}$  – сумарна тривалість виконання польотів  $k$ -м повітряним судном. Відповідно

$$Q_N(t) = 1 - P_N(t) = 1 - \exp\left(-\sum_{k=1}^N \lambda_k \times \Delta T_{TLk}\right). \quad (2.5)$$

Оскільки число  $N$  може бути достатньо великим, тут вже не можна

використовувати наближений вираз вигляду (2.3).

Рівень безпеки повітряного руху в зоні ОрПР за вибраний період визначатиметься як

$$p_{\Sigma}(t) = \exp\left(-\sum_{k=1}^N \lambda_k \times \Delta T_{\Sigma k}\right), \quad (2.6)$$

де  $\Delta T_{\Sigma k}$  – сумарний час перебування  $k$ -го повітряного судна в зоні ОрПР за період аналізу.

Тоді

$$q_{\Sigma}(t) = 1 - \exp\left(-\sum_{k=1}^N \lambda_k \times \Delta T_{\Sigma k}\right). \quad (2.7)$$

При вибраному вище параметрі безпеки польотів можна записати вираз для функціонала якості роботи інформаційно-обчислювальної мережі в наступній формі:

$$\Psi[q_{\Sigma}(t)] \Big|_{N \geq N_{\min}} \xrightarrow{\bar{V}_C} \min, \quad (2.8)$$

де  $N_{\min}$  – мінімальне число обслугованих повітряних судів за період аналізу;

$\bar{V}_C^T = [C_{\min}, \tau_d, \delta\tau_d, BER, M_L, K_{nod}, \dots]$  – вектор параметрів мережі:

$C_{\min}$  – пропускна спроможність найповільнішого мережного вузла або сегменту;

$\tau_d$  – середня затримка доставки даних;

$\delta\tau_d$  – варіація затримок доставки даних;

$BER$  – відношення числа спотворених кадрів (пакетів, повідомлень) до загального числа переданих;

$M_L$  – відношення числа втрачених кадрів до загального числа переданих;

$K_{nod}$  – загальне число термінальних і мережних вузлів.

Для отримання коректного результату потрібно також враховувати імовірність відмови мережних та/або термінальних вузлів, перепади обчислювального навантаження при виникненні ЛП або передумов до них і т.п. Ці параметри оцінюються в процесі реальної експлуатації мережі і

вводяться у функціонал (2.8) для пошуку оптимального рішення.

У даній роботі поставлена задача: визначення чинників впливу характеристик інформаційно-обчислювальної мережі, що входить до складу системи ОрПР, на загальну ефективність функціонування системи. Для отримання коректних рішень необхідно вводити додаткові дані про параметри і стан мережі безпосередньо в процесі експлуатації системи ОрПР.

### **2.3 Кореляційно-регресійна модель системи ключових показників ефективності ієрархічної мережі аеровузла**

Вище відмічалось, що ключові показники ефективності (англ. *Key Performance Indicators, KPI*) – система оцінок, яка застосовується при рішенні стратегічних і тактичних задач, що виникають в складних технічних системах. Використання ключових показників ефективності дає можливість оцінити стан і допомогти в оцінці реалізації методів управління.

Для терміну *KPI* часто використовується переклад "ключові показники ефективності" (КПЕ), проте це не зовсім вірно [4]. Справа в тому, що слово *performance* має декілька трактувань. Правильне формулювання можна знайти в стандарті ISO 9000:2008. Він розділяє слово *performance* на два терміни: результативність і ефективність. За стандартом, результативність – це міра досягнення запланованих результатів (здатність системи орієнтуватися на результат), а ефективність – співвідношення між досягнутими результатами і витраченими ресурсами (здібність системи до реалізації своїх цілей і планів із заданим якісним рівнем, вираженим певними вимогами – часом, витратами, ступенем досягнення мети). Слово *performance* об'єднує в собі і результативність, і ефективність. Отже, правильним перекладом терміну *KPI* був би "ключовий показник результатів функціонування", оскільки результат функціонування містить в собі і міра досягнення, і витрати на отримання результату [4]. Проте в літературі, у тому числі і технічній, включаючи статті і монографії по зв'язку і інформаційним технологіям [3, 49, 50], під терміном *KPI* розуміють саме ключові показники

ефективності, тобто співвідношення між досягнутими результатами і витраченими ресурсами. Тому, надалі дотримуємося такого трактування терміну *KPI*.

У даній роботі розглядається система ключових показників ефективності для комп'ютерної мережі як великої системи із затримками сигнальної і управляючої інформації. При оптимізації характеристик мережі необхідно враховувати параметри, від яких залежить якість сервісу і взаємозв'язок між цими параметрами. Оскільки параметри окремих мережних вузлів і елементів змінюються в процесі функціонування мережі випадковим чином, необхідно застосовувати методи математичної статистики.

При оптимізації параметрів і структури комп'ютерних мереж до складу цільової функції входить велика кількість основних і додаткових параметрів, від яких залежить якість сервісу *QoS*.

Для вирішення задач поточного управління мережами необхідний системний підхід. Критерії оптимізації ключових параметрів функціонування мережі та поточного управління мережею є неоднозначними і суперечливими. Урахування цих суперечностей і пошук компромісних рішень можливий при використанні статистичних методів, узгодження достовірності і детальності початкових даних з фізичним сенсом вирішуваних задач.

Процеси зміни КПЕ, з одного боку, є суттєво нестационарними, а, з іншого – тенденції їх змін вельми схожі, тому представляє інтерес дослідження характеристик їх стохастичного взаємозв'язку. Цей інтерес має не тільки теоретичний, але і практичний характер. Як основні характеристики стохастичного взаємозв'язку використовується коефіцієнт множинної кореляції і множинна регресія [57-60]. Крім того, для автоматизації вимірювань і розрахунків необхідно вибрати метод апроксимації кривих повторюваності змін КПЕ. Найгнучкішим і точним методом є апроксимація поліномами по мінімуму середнього квадрата

помилки [61, 62].

Розглянемо задачу прогнозу  $k$ -ї змінної  $Y_k$ ,  $k = \overline{1, N}$  по  $M$  змінних  $X_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $m \neq k$ . У загальному випадку  $M \neq N$ . При  $m = 1$  маємо рівняння лінійної або поліноміальної регресії незалежної змінної  $X_m$  на залежну змінну  $Y_k$ , при  $m > 1$  маємо систему  $m$  рівнянь множинної регресії змінних  $X_1, X_2, \dots, X_m$  на  $Y_k$ . (Мається на увазі функціональна, а не статистична залежність.) У даній задачі незалежні змінні  $X_1, X_2, \dots, X_m$  – це випадкові величини, які не обов'язково є статистично незалежними.

Змінну апроксимуємо функцією регресії  $\Psi(\cdot)$ , що містить оцінки КПЕ і невідомі коефіцієнти  $\{a_0, a_1, \dots, a_m\}$ . Рівняння моделі лінійної регресії незалежних змінних  $X_1, X_2, \dots, X_m$  на залежну змінну  $Y_k$  запишемо в наступному вигляді:

$$Y_k = a_{0k} + a_{1k}X_1 + \dots + a_{mk}X_m + \varepsilon, \quad (2.9)$$

де  $\varepsilon$  – помилка апроксимації.

Хай  $X_{1j} = X_1^j$ . Тоді можна записати рівняння поліноміальної регресії у вигляді

$$Y_k = a_{0k} + a_{1k}X_1 + a_{2k}X_1^2 + \dots + a_{mk}X_1^m + \varepsilon. \quad (2.10)$$

Параметри моделі регресії оцінюються по вибірці об'єму, взятої з деякої генеральної сукупності. Теоретично генеральна сукупність має нескінченний об'єм або є всім набором даних, який існує у принципі.

Вибірка формується таким чином. За наслідками тесту функціонування мережі фіксуємо першу вибірку незалежних змінних  $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1m}$  і розраховуємо залежну змінну  $Y_1$ . Потім фіксуємо другу вибірку незалежних змінних  $X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2m}$  і розраховуємо залежну змінну  $Y_2$ . Продовжуємо процедуру до отримання  $N$  змінних  $Y_k$ ,  $k = \overline{1, N}$ . Одержуємо вибірку з  $N$  спостережень

$$\{Y_1 : X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1m}\}, \{Y_2 : X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2m}\}, \dots, \{Y_N : X_{N1}, X_{N2}, \dots, X_{Nm}\}.$$

Система рівнянь множинної лінійної регресії приймає вигляд

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= a_{01} + a_{11}X_{11} + \dots + a_{m1}X_{1m} + \varepsilon_1 \\ Y_2 &= a_{02} + a_{12}X_{21} + \dots + a_{m2}X_{2m} + \varepsilon_2 \\ &\dots \\ Y_k &= a_{0k} + a_{1k}X_{k1} + \dots + a_{mk}X_{km} + \varepsilon_k \\ &\dots \\ Y_N &= a_{0N} + a_{1N}X_{N1} + \dots + a_{mN}X_{Nm} + \varepsilon_N \end{aligned} \right\}, \quad (2.11)$$

де  $\{a_{0k}, a_{1k}, \dots, a_{mk}\}$ ,  $k = \overline{1, N}$  – невідомі коефіцієнти, а  $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k, \dots, \varepsilon_N\}$  випадкові помилки, які логічно вважати нормальними однаково розподіленими з параметрами  $\{0, \sigma_\varepsilon^2\}$ . Для отримання оцінок по методу якнайменших квадратів необхідно мінімізувати суму  $S_k$  квадратів відхилень в кожній точці. Якнайкраще наближення відповідає мінімальній величині виразу

$$S_k = \sum_{k=1}^N (Y_k - a_{0k} - a_{1k}X_{k1} - \dots - a_{mk}X_{km})^2. \quad (2.12)$$

Величина  $S_k$  є мірою помилки, пов'язаною з прив'язкою наявних даних до вибраної моделі регресії. Мінімум  $S_k$  досягається диференціюванням останнього виразу по коефіцієнтах, прирівнюванням відповідних похідних нулю і рішенням системи рівнянь відносно  $\{a_{0k}, a_{1k}, \dots, a_{mk}\}$ . Одержуємо систему рівнянь для оцінки частинних коефіцієнтів регресії:

$$\left. \begin{aligned} \hat{Y}_1 &= \alpha_{01} + \alpha_{11}X_{11} + \dots + \alpha_{m1}X_{1m} \\ \hat{Y}_2 &= \alpha_{02} + \alpha_{12}X_{21} + \dots + \alpha_{m2}X_{2m} \\ &\dots \\ \hat{Y}_k &= \alpha_{0k} + \alpha_{1k}X_{k1} + \dots + \alpha_{mk}X_{km} \\ &\dots \\ \hat{Y}_N &= \alpha_{0N} + \alpha_{1N}X_{N1} + \dots + \alpha_{mN}X_{Nm} \end{aligned} \right\}. \quad (2.13)$$

Тут  $\alpha_{0k}, \alpha_{1k}, \dots, \alpha_{mk}$  – оцінки для  $\{a_{0k}, a_{1k}, \dots, a_{mk}\}$ . Оцінки є незміщеними і ефективними, тобто мають мінімальну дисперсію для вибірки  $X_1, X_2, \dots, X_m$

серед всіх лінійних оцінок для прогнозу змінних  $Y_k$ ,  $k = \overline{1, N}$ .

Як зазначено вище, нині широко використовується поняття ключових параметрів ефективності складних систем, зокрема, комп'ютерних і телекомунікаційних мереж [3]. Ключовими параметрами є затримка передачі, пропускна спроможність, втрати пакетів і рівень безпеки. Ці параметри найбільше впливають на результуючу якість сервісу.

У якості параметрів задачі, що оптимізуються, зазвичай обирають наступні [6]:

- затримка передачі  $\tau$ ;
- пропускна спроможність  $C_p$ ;
- втрати пакетів при передачі даних  $L_p$ ;
- рівень безпеки і захисту даних при передачі по мережі;
- якість *Web*-сервісу;
- якість передачі аудіо (звукові файли, звичайна і *IP*-телефонія);
- швидкість і надійність обміну файлами по протоколу *FTP*;
- швидкість і надійність роботи електронної пошти (*E-mail*);
- якість передачі відео.

Розглянута гіпотетична мережа *WiMAX*, дані для розрахунку параметрів якої узяті з роботи [63]. Для розрахунків використовувалася програма множинного кореляційного аналізу, приведена в [64] і модифікована для даної задачі.

У табл. 3 приведені часткові коефіцієнти кореляції параметрів, що оптимізуються, по яких надалі з використанням рівнянь (2.9 – 2.13) можна розраховувати часткові коефіцієнти регресії.



Таблиця 3.

## Коефіцієнти взаємної кореляції параметрів, що оптимізуються

| Параметр      | Коефіцієнти кореляції |       |       |          |            |       |            |               |       |  |
|---------------|-----------------------|-------|-------|----------|------------|-------|------------|---------------|-------|--|
| $\tau$        | 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      |            |       |            |               |       |  |
| <i>Web</i>    | 0,75                  | 0,76  | 0,36  | 0,77     | 1,0        |       |            |               |       |  |
| Аудіо         | 0,85                  | 0,64  | 0,50  | 0,56     | 0,30       | 1,0   |            |               |       |  |
| <i>FTP</i>    | 0,27                  | 0,75  | 0,63  | 0,61     | 0,57       | 0,44  | 1,0        |               |       |  |
| <i>E-mail</i> | 0,17                  | 0,22  | 0,34  | 0,78     | 0,30       | 0,36  | 0,16       | 1,0           |       |  |
| Відео         | 0,87                  | 0,89  | 0,84  | 0,82     | 0,53       | 0,67  | 0,79       | 0,30          | 1,0   |  |
|               | $\tau$                | $C_p$ | $L_p$ | $D_{sp}$ | <i>Web</i> | Аудіо | <i>FTP</i> | <i>E-mail</i> | Відео |  |

Між основними ключовими параметрами виявляється сильна кореляція. Це пояснюється тим, що вони значно впливають на вимоги до якості сервісу. Виняток становить електронна пошта, оскільки, на відміну від потокового аудіо, відео, *Web-сервісу* і передачі файлів по протоколу *FTP*, для неї не критичні ні смуга пропускання каналу, ні затримка доставки. Проте необхідно відзначити, що параметр  $D_{sp}$  – рівень безпеки і захисту даних є критичним практично для всіх представлених додатків, оскільки навіть для таких видів еластичного трафіку, як електронна пошта, захист даних є невід’ємною вимогою забезпечення якості сервісу *QoS*.

Результати кореляційного аналізу служать також ключовим індикатором моніторингу і регулювання поточних даних і *Web-сервісу*. Це необхідно для забезпечення безпечної передачі інформації у мережі, прогнозування і запобігання перевантаженням контрольованого мережного сегменту. 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, необхідно відзначити, що повністю скомпільована програма розрахунків займає в пам'яті обчислювального пристрою від 80 до 500 кілобайт залежно від масштабу мережі і об'єму оброблюваної вибірки. Оскільки нині практично будь-який мережний вузол, по суті, є спеціалізованим обчислювачем або навіть багатопроцесорною системою, задача апаратурної реалізації запропонованого методу може розв'язуватися порівняно просто.

Однак для спеціалізованих комп'ютерних мереж або автономних сегментів складеної комп'ютерної мережі таких, як безпроводова локальна мережа групи літаків, що знаходяться у зоні аеровузла, обрані сукупності ключових показників ефективності, їх параметри та стан мають суттєві відмінності [5,113]. По-перше, сама структура КПЕ може змінюватися у процесі управління повітряним рухом – вплив деяких показників на загальну ефективність системи може знизитися аж до повного виключення їх з поточного набору, а нові показники можуть бути додані. По-друге, статистичні зв'язки між КПЕ також змінюються у широких межах (що, власне, логічно випливає з першого міркування). Інакше кажучи, ми маємо розв'язувати завдання кореляційно-регресійного аналізу за умов нестационарності процесів, що спостерігаються.

Тому, для даної конкретної задачі метод множинного кореляційно-регресійного аналізу, що розглянутий вище, може служити лише методологічною основою розробки алгоритму кореляційно-регресійного оцінювання системи КПЕ. Для поточного оцінювання за умов нестационарності доцільно застосовувати методи, які мають можливість адаптації до змін параметрів та стану системи КПЕ. До таких методів, насамперед, можна віднести метод покрокової регресії [114, 115].

Набори КПЕ для авіаційних застосувань докладно проаналізовані у роботах [116-120]. Найбільш важливими КПЕ є затримка передачі, пропускна здатність, втрати пакетів і рівень безпеки. Ці параметри мають найбільший вплив на результуючий якість сервісу і, в кінцевому рахунку, на ефективність

системи ОрПР в цілому. Крім того, для завдань організації, обслуговування та управління повітряним рухом найбільш важливими КПЕ є затримки рейсів на землі та в повітрі.

З урахуванням наведених міркувань в якості оптимізуються параметрів завдання обрано такі:

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

У табл. 4 наведені частинні коефіцієнти кореляції оптимізуються параметрами, за якими в подальшому можна розраховувати частинні коефіцієнти регресії. Числові дані взяті з робіт [5, 6].

Таблиця 4.

**Коефіцієнти взаємної кореляції параметрів, що оптимізуються**

| Параметр       | Коефіцієнти кореляції |       |       |          |                |                |
|----------------|-----------------------|-------|-------|----------|----------------|----------------|
| $\tau$         | 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            |
|                | $\tau$                | $C_p$ | $L_p$ | $D_{sp}$ | $\bar{d}_{AH}$ | $\bar{d}_{GH}$ |

Специфіка інформаційно-комунікаційної мережі аеровузли така, що в багатьох випадках застосування регресійного аналізу ми не маємо достатньої інформації про порядок незалежних змінних  $X_1, X_2, \dots, X_p$  по їх важливості

для передбачення незалежної змінної  $Y$ . Це може привести до невірних висновків щодо важливості тих чи інших змінних  $X_i$  для передбачення  $Y$ .

Одним із рішень є пряма покрокова регресія [114, 115], коли незалежні змінні одна за одною включаються в підмножина згідно попередньо заданому критерію. Саме тоді деяка змінна може бути замінена іншою змінною, яка не входить в набір, або видалена з нього. Сукупність критеріїв, що визначають, які змінні включати, замінювати і видаляти, називається покроковою процедурою.

Пропонується використовувати модифіковану покрокову процедуру з включенням і виключенням значущих змінних [113]. Включення і видалення змінних здійснюються за допомогою критерію для перевірки рівності нулю частинного коефіцієнта кореляції або квадрата цієї статистики (критерію), який має  $F$ -розподілення з числом ступенів свободи  $(n - k - 2)$ , де  $n$  – обсяг вибірки даних, одержуваних шляхом вимірювання  $k$ -го КПЕ. Правило зупинки засноване на завданні допустимого рівня значимості  $t$ -критерію.

Кроки стандартної покрокової процедури наступні:

1. Обчислюються прості коефіцієнти кореляції  $r_{yx,i}$  для набору  $X_1, X_2, \dots, X_p$ .
2. Виділяється змінна  $X_{j_1}$ , якій відповідає найбільша величина квадрата коефіцієнта кореляції з  $Y$ . Розв'язується відповідне рівняння найменших квадратів і обчислюється множинний коефіцієнт кореляції.
3. Виділяється змінна  $X_{j_2}$ , якій відповідає друга за величиною значення квадрата коефіцієнта кореляції з  $Y$ . Розв'язується відповідне рівняння найменших квадратів і обчислюється множинний коефіцієнт кореляції.

Наступні кроки повторюються рекурентно з наростаючим індексом  $jk$ .

4. За отримуваних значень  $F$ -критерію перераховуються нові набори значущих змінних, які використовуються для обчислення коефіцієнтів регресії на кожному кроці процедури. Фіксуються номер кроку, число включених і віддалених змінних і множинний коефіцієнт кореляції між  $Y$  і включеними змінними.

Наступні кроки повторюються рекурентно з наростаючим індексом  $jk$ .

Як показано в роботі [5], повністю скомпільована програма розрахунків займає в пам'яті обчислювального пристрою від 80 до 500 кілобайт залежно від масштабу мережі і обсягу оброблюваної вибірки. Оскільки нині практично будь-який мережний вузол, по суті, являє собою спеціалізований обчислювач або навіть багатопроцесорну систему, завдання апаратурною реалізації запропонованого методу може вирішуватися порівняно просто.

## Висновки до розділу 2

1. Виконано аналіз системи ключових параметрів ефективності та особливостей їх застосування для управління якістю сервісу комп'ютерної мережі. У результаті аналізу показано, що при використанні статистичного підходу можна виділити залежності між ключовими параметрами мережі, що дає можливість побудови системи управління якістю сервісу.

2. При використанні ключових параметрів ефективності комп'ютерної мережі як складної системи із затримками сигнальної і управляючої інформації можна забезпечити прогноз її стану і вирішувати задачі управління якістю сервісу в реальному часі.

3. Обрано та обґрунтовано ключові показники управління якістю сервісу в інформаційно-обчислювальній мережі аеровузла. Використовуючи ці показники можна обирати транспортні середовища та мережні технології, які найбільш придатні для кожного конкретного режиму польоту (штатний режим, передпосилання до льотної події та інші.)

4. Вдосконалено метод покрокової регресії для оцінювання характеристик мережі зі змінною структурою та мобільними вузлами.

5. Розроблено алгоритм обчислення множинних коефіцієнтів кореляції, за якими розраховуються множинні коефіцієнти регресії для передбачення та встановлення поточних ключових показників ефективності авіаційної бортової мережі як невід'ємної складової частини аеровузлової інформаційно-обчислювальної системи.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ СЕГМЕНТІВ АЕРОВОЗЛОВОЇ МЕРЕЖІ

#### 3.1 Специфіка авіаційних бортових комп'ютерних мереж

В сучасних, і тим більш у майбутніх, авіаційних системах *CNS/ATM* стають все більш затребуваними мобільні комунікації та організація доступу до Інтернету з метою доступу до даних. На перших етапах розвитку авіаційних бортових мережних структур основна увага приділялася використанню супутникових комунікаційних систем та глобальних комп'ютерних мереж на їх базі [10]. При виконанні польотів великої протяжності, включаючи трансконтинентальні польоти, а також польоти над пустелями, у полярних регіонах, супутникові комунікаційні системи грають основну роль в організації та розгортанні глобальної авіаційної мережної інфраструктури.

Зараз активно впроваджуються локальні комп'ютерні мережі різного масштабу типу стільникових інформаційно-комунікаційних та обчислювальних систем зі самоорганізацією. Вони мають змішану структуру "борт – борт" або "борт – земля". Завдяки таким системам забезпечуються швидкий та економічний доступ впродовж польотів середньої та малої протяжності.

Процес еволюції авіаційних інформаційно-комунікаційних та обчислювальних мереж нагадує відповідний процес еволюції наземних комп'ютерних мереж [15, 16, 56]: від глобальних мереж типу *ARPANET* до мереж масштабу мегаполісу *MAN* або крупної корпорації та локальних мереж *LAN*. На рис. 3.1. схематично зображений процес еволюції підходів до загальної організації та апаратної реалізації авіаційних мереж – від а) виключно супутникових каналів доставки даних до б) змішаних систем та в) автономних локальних мереж.

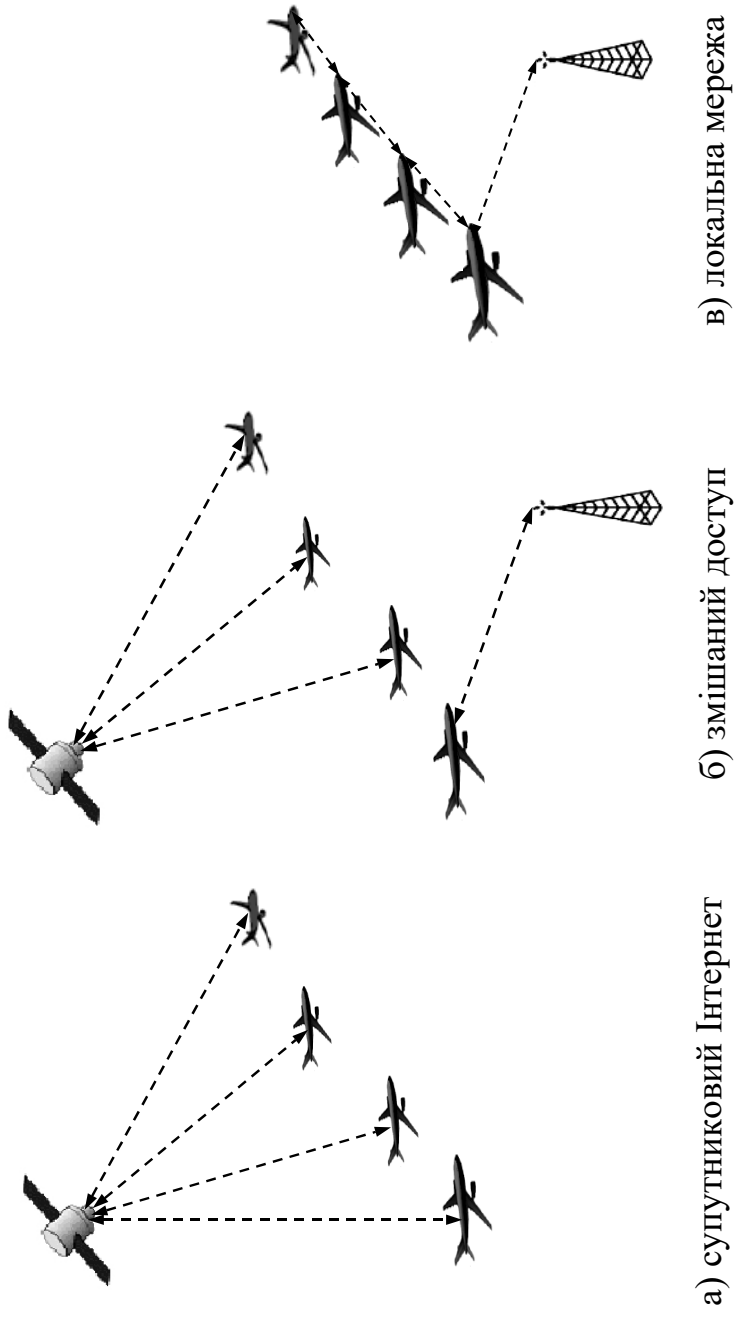


Рис. 3.1. Етапи розвитку авіаційних мереж: від супутникового Інтернету до локальних мереж доступу "борт – земля"



Перехід від виключно супутникових комунікаційних систем до змішаних та автономних мережних систем обумовлений у тому числі й бажанням забезпечити неперервний доступ до джерел інформації та знизити затримки доставляння, особливо у нештатних ситуаціях. При роботі зі супутниками, що знаходяться на геостаціонарних орбітах, затримка доставляння, навіть без урахування затримок при обробці у мережних комутаційних вузлах, складає близько 250 мс. З іншого боку, низькоорбітальні супутники не завжди можуть забезпечити неперервне доставляння даних до користувачів.

Як відмічалось раніше, одним із наріжних каменів удосконалення авіаційної комунікаційної інфраструктури є безшовна організація авіаційних мереж та стиків мережних сегментів. Якщо розглядати аеровузол як автономний елемент авіатранспортної інфраструктури, то одним із найважливіших автономних мережних сегментів аеровузла, відповідно, є авіаційна мережа з мобільними вузлами. Розглянемо її типову структуру та параметри [30]. На рис. 3.2. зображено типову схему організації авіаційної бортової мережі для обміну даними по напрямкам "борт – борт" та "борт – земля". Відповідно, на рис. 3.3. зображено схему мережі, що включає мобільні мережні вузли – маршрутизатори та/або програмні комутатори (*Softswitch*). Останні можуть бути замінені системами класу *IMS – IP Multimedia Subsystem*, але тільки для "чистих" *IP*-мереж з відповідною інфраструктурою. Крім того, технологія *Softswitch* є достатньо відпрацьованою і як будь-яка зріла технологія потребує лише доробки практичних питань – забезпечення безпеки, взаємодії з новими мережними технологіями, оптимізації параметрів функціонування тощо. До речі, такі твердження є справедливими й для авіаційних систем доступу та розподілу даних через комунікаційні та комп'ютерні мережі.

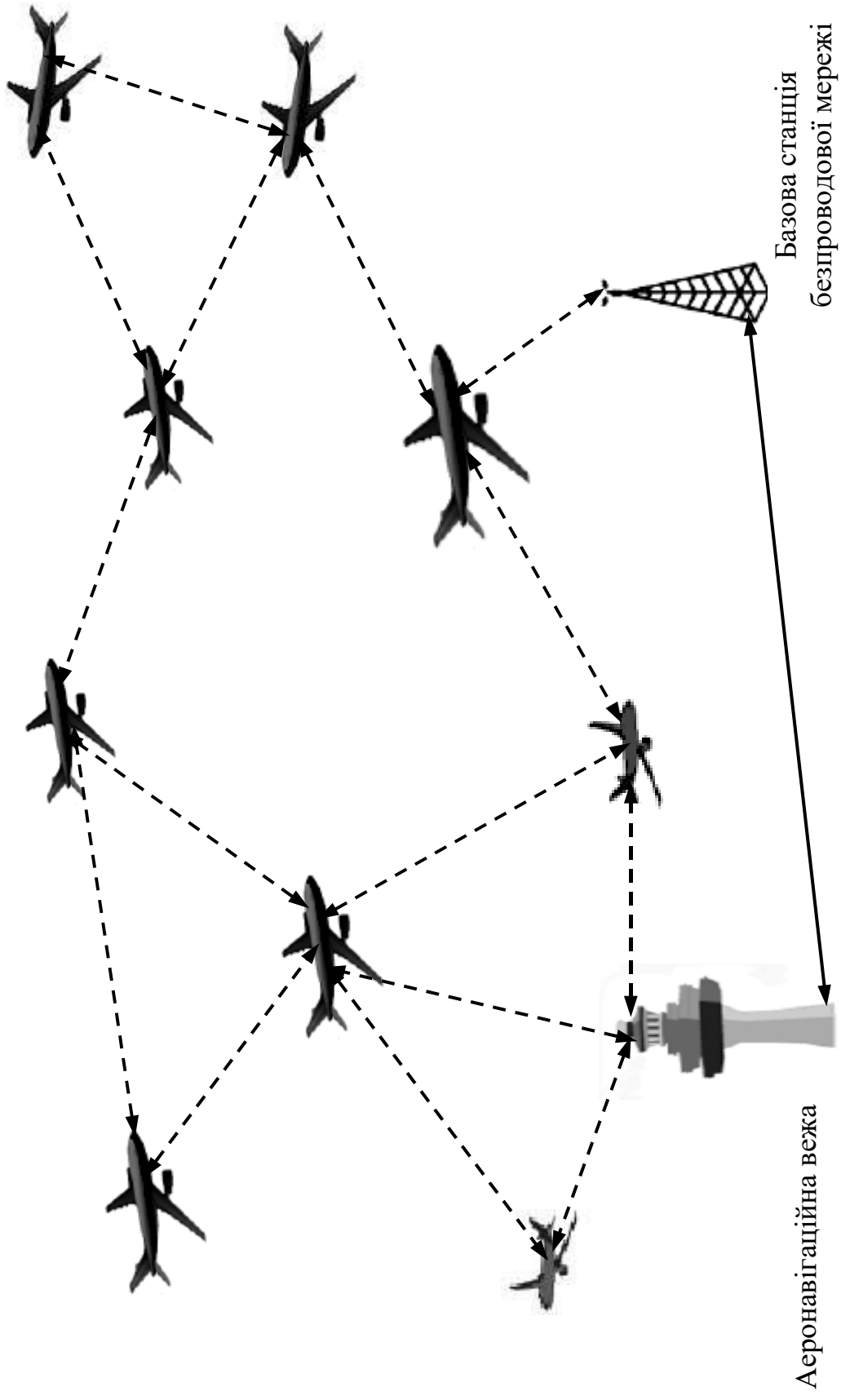


Рис. 3.2. Схема використання авіаційної бортової мережі для обміну даними по каналах "борт – борт" та "борт – земля"

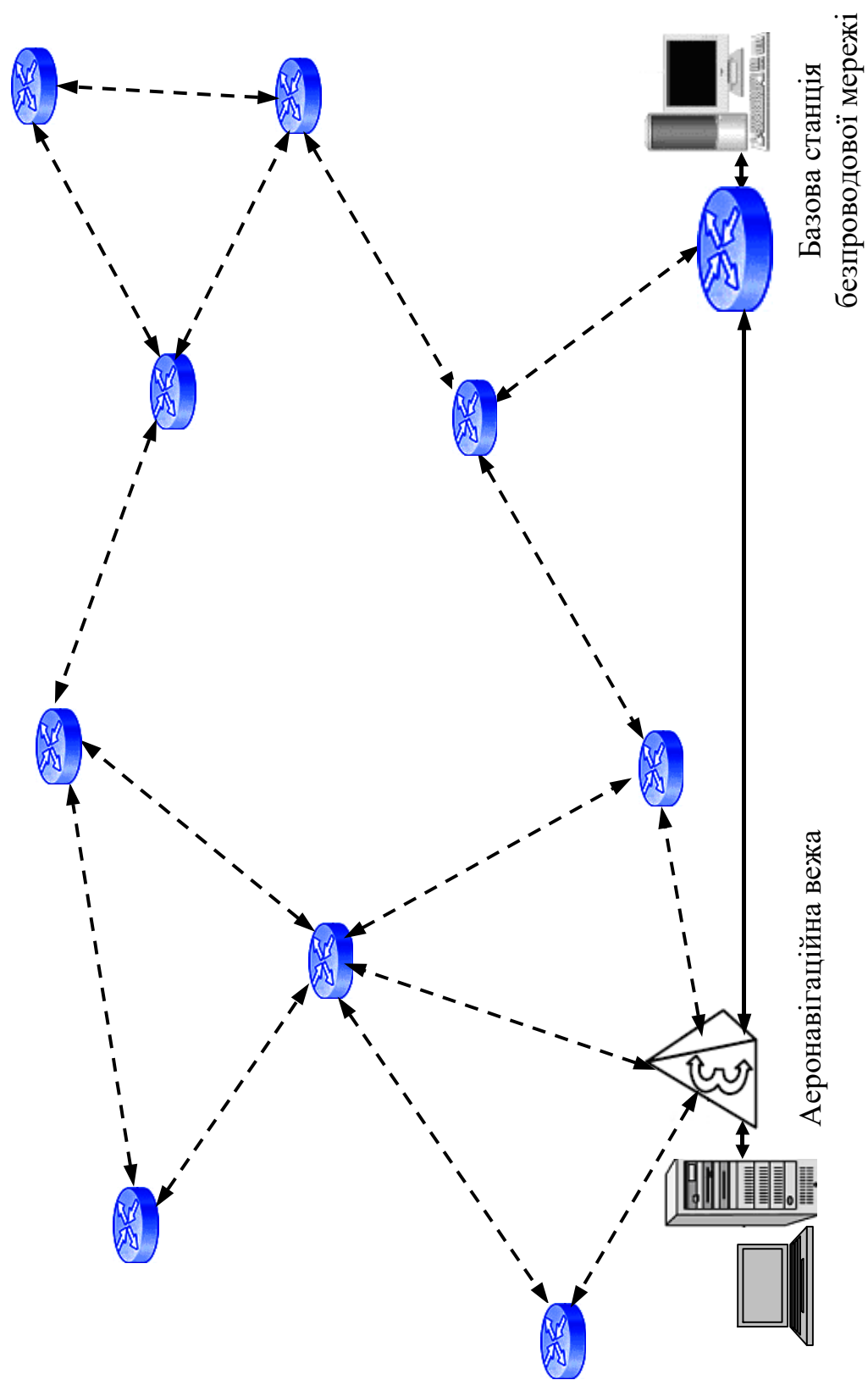


Рис. 3.3. Приклад поточної топології авіаційної бортової мережі

Доступність термінальних вузлів до отримання інформації з гарантованою якістю сервісу залежить від їх географічного положення, зокрема від дальності бортів одне від іншого. При досить великих дальностях між бортами наявність прямої видимості може бути відсутня. Для оцінки наявності прямої видимості використовуємо геометричні співвідношення між повітряними об'єктами, що знаходяться на різних висотах.

Із теорії розповсюдження радіохвиль [73, 74] відомо, що дальність прямої видимості з урахуванням кривизни Землі визначається наступними наближеними виразами:

$$R_{\text{пр,км}} = 3,57(\sqrt{h_{1,\text{м}}} + \sqrt{h_{2,\text{м}}}) \quad (3.1)$$

для випадку відсутності рефракції;

$$R_{\text{пр,км}} = 4,12(\sqrt{h_{1,\text{м}}} + \sqrt{h_{2,\text{м}}}) \quad (3.2)$$

для випадку нормальної рефракції, де  $h_1$  и  $h_2$  – висоти польоту (в метрах) бортів, які обмінюються даними. Дальність  $R_{\text{пр}}$  у виразах (3.1-3.2) вимірюється у кілометрах.

Відмітимо також, що бортові мережі стільникового типу принципово мають бути мережами типу *Ad Hoc*. Це є очевидним внаслідок мобільності мережних комутаційних вузлів та впливаючої з цього мінливості фізичної топології: одні мережні вузли виходять з зони дії мережі, інші входять до неї. Звичайно, треба обирати протоколи маршрутизації з такими властивостями, щоб забезпечувати стабільність роботи мереж зі швидкими змінами топології [54].

Інформація, що розподіляється між клієнтами на борту ПС, операторів та провайдерів аеронавігаційної інформації та іншими користувачами мережі, об'єднується у чотиривимірні вектори поточних даних з використанням механізмів доставки на основі *IP*. Постачальники даних "борт – земля" можуть видавати дані в систему, яка поширюватиме інформацію до клієнтів. Споживачі даних можуть також отримати дані за запитом або

підписатися до отримання інформації певного виду. Це дозволяє синхронізувати програмні додатки з інформаційним сховищем.

Основною перевагою бортової стільникової мережі типу *Ad Hoc* є стійкість до змін фізичної топології. Навіть якщо деякі борти знаходяться поза зоною покриття наземних станцій, вони можуть обмінюватися з ними інформацією через борти, що знаходяться у зоні покриття, використовуючи останніх у якості проміжних передатних (комутаційних) вузлів.

Уповні очевидними є вимога безпеки наскрізних комунікацій, забезпечення підтримки ідентифікації і запобігання несанкціонованого розповсюдження і модифікації даних. Крім того, деяким споживачам можливо потрібна підтримка наскрізної конфіденційності передачі. Вважається [72], що у перспективній комунікаційній інфраструктурі ці вимоги краще всього можна задовольнити з використанням стандарту захищеної *IP*-структури (*IPsec*).

Як показано на рис. 3.1–3.3, авіаційна інформаційно-обчислювальна мережа може складатися з бортового сегменту зі стільниковою організацією та наземного сегменту "борт – земля". У довільний момент часу  $t_k$  бортова мережа складається з поточного числа  $N_k = N(t_k)$  мобільних комутаційних вузлів, розташованих на повітряних судах. При цьому наземний сегмент має фіксоване число  $M$  наземних станцій, що можуть вміщувати комутаційні вузли та Інтернет-шлюзи. Наземні станції географічно розподіляються у зоні аеровузла та на прилеглих трасах. Окремий бортовий або наземний вузол  $d_{nk}$  має однозначно визначитися своїм індивідуальним номером  $n_k \in \{1, 2, K, N(t_k) + M\}$ .

З урахуванням виразів (3.1-3.2) прямий зв'язок між вузлом  $d_{nk}$  та вузлом  $d_{n,k+j}$ ,  $j \in \{1, 2, K, N(t_k) + M\}$ ,  $j \neq n_k$  має місце, якщо дальність між ними  $R_{nk,k+1} < R_{\delta, \epsilon}$ . За таких умов заявлену якість сервісу може бути досягнуто за умов не перевищення певного рівня зовнішніх завад

множинного доступу та відповідного рівня відношення сигнал/шум. Очевидно, для виключення завад, обумовлених множинним доступом до середовища, або хоча б зменшення завад до прийняттого рівня необхідно використовувати методи розподілу ресурсів середовища доступу між бортовими та наземними мережними вузлами як термінальними, так і комутаційними.

Розглянемо методи взаємодії мобільних мережних вузлів та управління доступом до середовища.

### 3.2 Методи взаємодії мобільних мережних вузлів

При організації та розгортанні авіаційних мереж "борт – борт – земля" з мобільними та стаціонарними вузлами доцільно обирати напівдуплексний режим роботи приймально-передавальних пристроїв на однаковій несівній частоті. Такий підхід є найбільш поширеним для широкосмугових безпроводових комунікаційних мереж загального та спеціального призначення [63, 75].

Для реалізації технології *CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* – по-перше, усі станції мережі повинні виконувати правило "слухати перед тим, як віщати". По-друге, вони мають бути синхронізовані (через *GPS* або в інший спосіб). По-третє, сеанси обміну даними розподіляються по часовим слотам за технологією *TDMA – Time-Division Multiple Access*. Кожний слот має однакову тривалість  $\tau_{sl}$ , а довжина пакету  $\tau_p$  обирається меншою, ніж тривалість слоту, на величину захисного інтервалу  $\tau_g$ :  $\tau_p = \tau_{sl} - \tau_g$ . Захисний інтервал вибирається, виходячи з урахування очікуваних дальностей між мережними вузлами.

Реально припустити, що число запитів, що генеруються бортовими мережними вузлами, як правило, більше числа (частотних) комунікаційних каналів, які організуються між бортами як термінальними вузлами. За таких умов може мати місце очікування вільного частотного каналу та часового

слоту. У якості математичної моделі мережі як системи масового обслуговування може служити модель напівмарківського процесу  $\zeta^*(t)$  [76]. У дискретні моменти  $n$  його значення дорівнюють  $\zeta_n$ . При цьому  $\zeta^*(t) = 0$  при  $n = 0$ . Послідовність  $\{\zeta_n\}$  представляє собою вкладений ланцюг Маркова. Такий ланцюг Маркова є таким, що не припускає приведення [68]. Це означає, що з будь-якого її стану  $t_n$  можна з ненульовою імовірністю попасти у нульовий стан: достатньо, щоб упродовж  $n\tau_{sl}$  послідовних тривалостей обслуговування запитів нові запити не поступали. Крім того, цей ланцюг є неперіодичним, оскільки зі стану 0 можна повернутися у той же стан за один крок. Умовою повернення є відсутність запитів за час обслуговування поточного запиту.

Розглянемо задачу оцінювання імовірності виникнення колізії у бортовій мережі з мобільними вузлами (див. рис. 3.3). Нехай, як визначено раніше, у довільний інтервал часу  $T_k, T_k + \Delta T_k$  бортова мережа складається з поточного числа  $N_k = N(T_k)$  мобільних комутаційних вузлів, розташованих на повітряних судах. Вузли видають пакети тривалістю  $\tau_p$  у моменти виділення для них вільних часових слотів  $\tau_{sl}(k)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , де  $K$  – потрібне число пакетів для передачі завершеного повідомлення. Якщо слоти виділяються у випадкові моменти часу з однаковим імовірнісним розподілом, вони на кінцевому інтервалі  $\Delta T_k \gg \tau_{sl}$  створюють потік Ерланга  $k$ -го порядку. Як відомо [77-79], задаючись порядком потоку Ерланга, можна отримати довільний ступінь післядії випадкового процесу: від повної взаємної незалежності між моментами появи подій (запитів) при  $k = 0$  до детермінованого функціонального зв'язку при  $k \rightarrow \infty$ .

Питання післядії у потоках мережного трафіку є вельми актуальним [16, 18, 70, 71, 80]. При наявності різномірності трафіку типу *Triple Play* (мова – відео – дані) або *Quadro Play* (мова – відео – дані – трафік мобільних абонентів) модель пуасонівського потоку запитів вже не може служити

адекватним відображенням реальних потоків трафіку. Має місце неординарність, нестационарність та наявність післядії процесів обміну даними. Якщо припущення ординарності та відсутності післядії найпростішого потоку є уповні природними, то твердження про стаціонарність навіть для пуасонівського потоку у реальних умовах вселяє серйозні сумніви, а інколи стає завідомо хибним [76].

Різномірний трафік з наявністю післядії має властивість так званої самоподібності – статистичні характеристики та зовнішні ознаки процесу зберігаються при розгляді у різному масштабі. Виходячи з визначення самоподібності, можна стверджувати, що часові й спектральні характеристики випадкового процесу (у нашому випадку – трафіку) при зміні масштабу усереднювання описуватимуться одними і тими ж рівняннями, функціями, але з відповідними масштабними коефіцієнтами. Інакше кажучи, самоподібність будь-якого процесу (явища) можна трактувати як інваріантність до змін масштабу або розміру.

Реальні випадкові процеси зберігають властивість самоподібності тільки до певної межі. Ця межа або міра статистичної стійкості процесу при багатократному масштабуванні визначається так званим параметром Херста або параметром самоподібності. Параметр Херста може лежати у межах від 0,5 до одиниці. При  $H = 0,5$  процес не має післядії і, відповідно, властивості самоподібності. При  $H \rightarrow 1$  ступінь самоподібності прагне до нескінченності, тобто при будь-яких змінах масштабу часу у довільних межах. Випадковий процес  $x(t)$  є статистично самоподібним з параметром Херста  $H$  ( $0,5 \leq H \leq 1$ ), якщо для будь-якого дійсного значення  $a > 0$  процес  $x(at)/a^H$  має ті ж статистичні характеристики, що і сам процес  $x(t)$ :

$$\text{математичне очікування } M[x(t)] = \frac{M[x(at)]}{a^H} ;$$

$$\text{дисперсія } D[x(t)] = \frac{D[x(at)]}{a^{2H}} ;$$



кореляційна функція  $R(t, \tau) = \frac{R(at, a\tau)}{a^{2H}}$ .

Чим більше  $H$ , тим довше зберігається властивість самоподібності при багатократному масштабуванні. При  $H = 0,5$  ця властивість практично відсутня.

У самоподібному трафіку типу *Triple Play* або *Quadro Play* виникає так звана пачковість – поява у випадкові моменти помітних сплесків інтенсивності трафіку при досить низькій середній інтенсивності на тривалих інтервалах спостереження. Найчастіше така ситуація виникає, коли термінальний вузол, зокрема, комп'ютер, яким керує людина-оператор, активується після деякої, можливо, тривалої паузи, або внаслідок передавання фрагментованих пакетів, які мережний комутаційний вузол розпізнає як короткі повідомлення до завершення передавання усіх фрагментів пакету вузлом-джерелом.

Для урахування ефектів самоподібності у мережі з технологією *CSMA/CA* та організацією сеансів обміну даними з розподілом по часовим слотам методом *TDMA* проаналізуємо вимоги до термінального і комутаційного обладнання бортових мереж з мобільними комутаційними вузлами для простого і самоподібного вхідного потоків.

При самоподібній природі трафіку залежність середньої тривалості черги (відповідно, необхідного розміру буфера)  $q$  від середнього коефіцієнта використання має наступний вигляд [16]:

$$q = \frac{\rho^{1/2(1-H)}}{(1-\rho)^{H/(1-H)}} \quad (3.3)$$

При  $H=0,5$  формула (3.3) спрощується:

$$q = \rho/(1-\rho), \quad (3.4)$$

що є класичним результатом СМО з простим вхідним потоком і експоненціально розподіленим часом обслуговування (М/М/1). Для системи з

детермінованим часом обслуговування (M/D/1) класичний результат виглядає таким чином:

$$q = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}. \quad (3.5)$$

Тепер необхідно обчислити сумісну ймовірність  $P(t_i, t_j)$  того, що пакет  $f_i$  потрапить в інтервал  $[t_1 - \tau_i, t_1 + \tau_j]$  за умови, що пакет  $f_j$  починається в точці  $t_1$ . З урахуванням часових співвідношень ця ймовірність визначається як

$$P(t_i, t_j) = P(t_1 - \tau_i \leq t \leq t_1 + \tau_j | t_1 = t_j). \quad (3.6)$$

Логічно припустити, що процеси появи в мережі пакетів, видаваних різними джерелами, взаємно незалежні, а моменти появи пакету  $f_j$  на інтервалі  $[t_0, t_0 + T]$  рівноімовірні. Тоді

$$P(t_i, t_j) = P(t_1 - \tau_i \leq t \leq t_1 + \tau_j | t_1 = t_j) = P(t_1 - \tau_i \leq t \leq t_1 + \tau_j) P(t_1), \quad (3.7)$$

$$\text{де } P(t_1) = P(0 \leq t_j < t_j + \tau_j \leq T) = \tau_j / T \quad (3.8)$$

– імовірність того, що пакет  $f_j$  «накриє» інтервал тривалістю  $\tau_j$  в будь-якій точці  $t_j$ .

Покладемо, що у момент часу  $t_1 - \tau_i$  пакет  $f_i$  не спостерігається. Обчислимо імовірність  $P(t_1 - \tau_i \leq t_i \leq t_1 + \tau_j)$  появи  $f_i$ -го пакету за відрізок часу  $[t_1 - \tau_i, t_1 + \tau_j]$ , використовуючи вирази для закону Ерланга  $k$ -го порядку [6], в яких для урахування нестационарності введемо змінну інтенсивність потоку  $\lambda_i(t)$ :

$$P(t_1 - \tau_i \leq t \leq t_1 + \tau_j) = \frac{\lambda_i(t_1 - \tau_i) (\lambda_i(t_1 - \tau_i + t) t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp\left(-\int_{t_1 - \tau_i}^{t_1 + \tau_j} \lambda_i(t) dt\right). \quad (3.9)$$

Якщо вважати інтенсивність потоку  $\lambda_i(t)$  величиною, що змінюється повільно на інтервалі спостереження, то можна з прийнятною точністю

усереднити її на інтервалі інтегрування  $[t_1 - \tau_i, t_1 + \tau_j]$ :  $\lambda_i(t) \approx \lambda_{i\bar{n}\bar{\delta}}$ . Тоді вираз (3.9) спрощується:

$$P(t_1 - \tau_i \leq t \leq t_1 + \tau_j) = \frac{\lambda_{i\bar{n}\bar{\delta}} (\lambda_{i\bar{n}\bar{\delta}} t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_{i\bar{n}\bar{\delta}}). \quad (3.10)$$

Після громіздких, але нескладних перетворень вираз (3.10) перетвориться для випадку самоподібного трафіку по аналогії з виразом (3.3):

$$P(t_1 - \tau_i \leq t \leq t_1 + \tau_j) = \frac{\lambda_{i\bar{n}\bar{\delta}}^{1/2(1-H)} (\lambda_{i\bar{n}\bar{\delta}}^{1/2(1-H)} t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_{i\bar{n}\bar{\delta}} H / (1-H)). \quad (3.11)$$

Очевидно, якість сервісу в мережі з мобільними вузлами та топологією, яка змінюється у процесі руху повітряних суден – носіїв мережних комутаційних вузлів, залежить не тільки від інтенсивності мережного трафіку та його типів, а й від геометричних співвідношень у мобільній мережі. Розглянемо цю проблему докладніше.

### 3.3 Розробка моделі та методу забезпечення якості сервісу в мережі з мобільними вузлами

Слідуючи [76], розглянемо багатоканальну систему масового обслуговування (СМО) з очікуванням класу  $GI/G/m$ . Оскільки, як зазначено вище, кореляційна функція самоподібного трафіку не є експоненціальною, вхідний потік заявок слідує вважати потоком з обмеженою післядією. Заявки поступають в послідовні дискретні моменти для будь-якого, інтервали між ними  $\tau_n = t_n - t_{n-1}$  незалежні і розподілені по одному і тому ж закону  $F_n(\tau) = P\{\tau_n < \tau\}$ ,  $n \geq 2$ .

Тривалості обслуговування заявок – незалежні величини  $\zeta_n$  із законом розподілу  $\Psi_n(\zeta) = P\{\zeta_n < \zeta\}$ ,  $n \geq 1$ . Позначимо  $\xi_n = \zeta_{n-1} - \tau_n$ . Тоді при умові що послідовності  $\{\tau_n\}$  і  $\{\zeta_n\}$  взаємно незалежні, можна визначити імовірність

$$\Theta(\tau) = P\{\xi_n < \tau\} = \int_0^{\infty} \overline{F}_n(\eta - \tau) d\Psi_n(\eta), \quad (3.12)$$

де  $\overline{F}_n(\eta - \tau) = 1 - F_n(\eta - \tau)$ .

Позначимо тривалість очікування  $n$ -ї заявки через  $\omega_n$ . Якщо  $n$ -а заявка поступить відразу вслід за  $(n-1)$ -й, їй, з урахуванням величини інтервалу, доведеться чекати обслуговування  $\omega_{n-1} + \zeta_{n-1} - \tau_n = \omega_{n-1} + \xi_n$  одиниць часу. Проте при достатньо великих  $\tau_n$  величина  $\omega_{n-1} + \xi_n$  може формально стати негативною. Ясно, що в цьому випадку дійсний час очікування  $n$ -ї заявки буде рівний нулю – черги немає, і заявка поступає на обслуговування відразу після приходу. Отже, виконується рекурентне співвідношення

$$\omega_n = \max_n \{\omega_{n-1} + \xi_n, 0\}. \quad (3.13)$$

Позначимо  $G_n(x) = P\{\omega_n < x\}$ . Тоді співвідношення (3.13) можна виразити через функції розподілу таким чином:

$$G_{n+1}(x) = \begin{cases} \int_{-\infty}^x G_n(x-y) d\Theta(y), & x > 0, n \geq 2; \\ 0, & x \leq 0, n \geq 1. \end{cases} \quad (3.14)$$

Доповнимо вирази (3.14) очевидним співвідношенням для функції розподілу часу очікування першої заявки:

$$G_{n+1}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

Вирази (3.6) і (3.8) є інтегралами Стілтєса, які у разі безперервних майже усюди розподілів  $\Psi_n(t)$  і  $\Theta_n(t)$  перетворюються на звичні інтеграли. Отже, використовуючи вирази (3.14–3.15), можна рекурентно обчислювати розподіли тривалості очікування для заявки з будь-яким номером. Крім того, як відмічено в [76], виявляється, що вони застосовні і при взаємній залежності послідовностей випадкових величин  $\{\tau_n\}$  і  $\{\zeta_n\}$ . Має значення лише незалежність величин  $\xi_n$ .

Якість сервісу  $QoS$  мережі з мобільними вузлами залежить, як від пропускної спроможності та навантаження на мережу, так і від параметрів управління потоками мережного трафіку. Тому метод забезпечення  $QoS$  в авіаційній мережі з мобільними вузлами представляє собою сукупність методів управління потоком та боротьби з перевантаженнями.

Логічно припустити, що час обслуговування заявки, наприклад, час обробки пакету в комутаційному вузлі, не зв'язаний жорсткою функціональною залежністю з довжиною пакету. Тоді, знаючи характеристики тривалості пакетів на вході комутаційного вузла як СМО, можна на ділянках локальної стаціонарності вхідного трафіку конкретизувати параметри розподілу часу обслуговування. Наприклад, при групуванні однорідних пакетів (що характерно для самоподібного трафіку), можна зробити допущення про детермінований час обслуговування (модель  $GI/D/m$ ).

Продуктивність, пропускна спроможність, надійність передачі даних і якість сервісу залежать як від характеристик термінального і мережного обладнання, так і від параметрів трафіку, який передається. Методи розрахунку вимог до мереж нових поколінь (пропускної спроможності каналів, ємності буферів тощо) засновані на пуасонівських моделях і формулах Ерланга, які з успіхом використовувалися при проектуванні телефонних мереж, можуть давати невиправдано оптимістичні рішення і приводити до недооцінки навантаження. Тому, в даній роботі основна увага надана дослідженню впливу інтенсивності й статистичних характеристик мережного трафіку на затримку передачі та корисну пропускну спроможність мережі. З урахуванням отриманих результатів проаналізуємо вимоги до характеристик комутаційних вузлів для найпростішого і самоподібного вхідних потоків.

Для самоподібного трафіку результати класичної теорії масового обслуговування [76,77] треба застосовувати з деякими застереженнями. Враховуючи пульсуючий характер самоподібного трафіку, загалом не можна

вважати потік заявок простим, оскільки на інтервалі спостереження не виконується умова стаціонарності. Проте, виходячи з логіки надання послуг з гарантованою крізною якістю обслуговування *QoS*, потрібно вимагати забезпечення якості обслуговування на інтервалі будь-якої тривалості, випадково вибраному із загального сеансу передачі даних. Як на інтервалах з низькою інтенсивністю трафіку, так і на інтервалах, де спостерігаються сплески навантаження, трафік можна з достатньою для практики точністю вважати локально-стаціонарним. Вся проблема полягає в тому, щоб визначити моменти переходу від одного інтервалу до іншого. У роботі [86] відмічається, що можна запропонувати алгоритми адаптації до змін навантаження, наприклад, з оцінюванням кореляційних властивостей потоку даних, проте навряд варто чекати прийнятної точності, а, отже, і високої ефективності таких алгоритмів.

На мій погляд, більший інтерес представляє отримання асимптотичних порівняльних оцінок для класичного пуасонівського і самоподібного потоків. З використанням результатів роботи [87] за виразами (3.3–3.4) та (3.10–3.11) розраховані характеристики середньої довжини черги пакетів, які очікують обробки, знаходячись у буферній пам'яті. Результати розрахунків наведені на рис. 3.4.

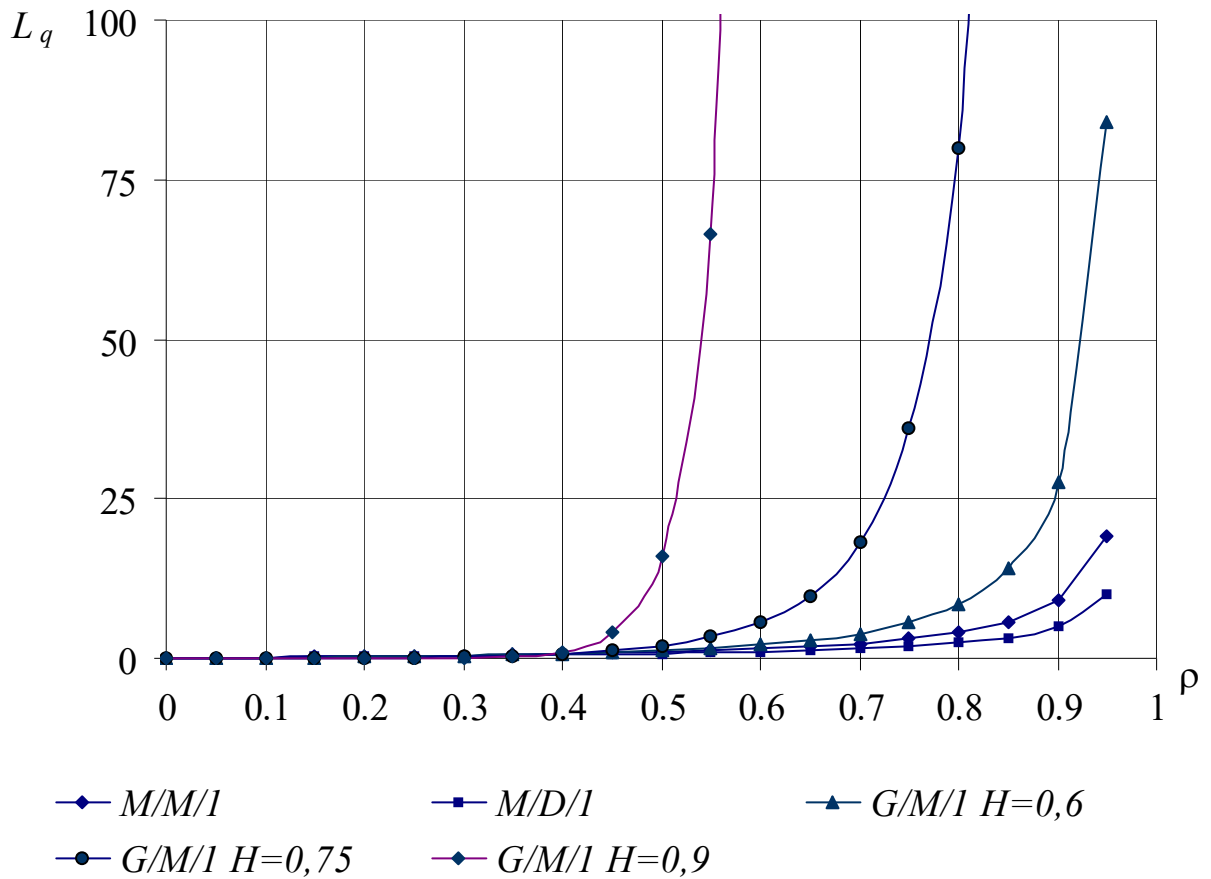


Рис. 3.4. Залежності асимптотичної довжини черги  $L_q$  від інтенсивності та статистичних характеристик трафіку

Буферна пам'ять заповнюється, доки число вхідних пакетів не перевищить діючий об'єм буфера  $v_b$ , тобто поки  $L_q \leq v_b$ . Пакети, що прийдуть після остаточного заповнення буферної пам'яті та перевантаження мережного вузла (маршруту, сегменту), будуть просто відкидатися. Із-за втрат пакетів приходиться робити повторні передачі, що дає додаткове навантаження на мережу.

Збільшення об'єму буферної пам'яті як засіб зменшення перевантажень є ефективним тільки на перший погляд [88]. Якщо комутаційний вузол має теоретично необмежений об'єм буфера, це призведе до нескінченних затримок пакетів, що знаходяться у черзі. Наприклад, сучасні маршрутизатори мають розміри буфера у декілька мегабайт, тому затримки передавання, включаючи перебування у черзі, можуть складати десятки

секунд [89], що може перевищувати часу життя пакету (*Time-to-Live*). При перевищенні часу життя пакету він відкидається. Відповідно, це потребує повторних передач.

Різниця між методами боротьби з перевантаженням і методом управління потоком полягає в наступному [88]. Запобігання перевантаженню гарантує, що підмережа справиться з пропонованим їй трафіком. Це глобальне питання, що включає поведінку всіх хостів і маршрутизаторів, процесів зберігання і пересилки на маршрутизаторах, а також безліч інших чинників, що знижують пропускну спроможність підмережі.

Управління потоком, навпаки, відноситься до трафіку між двома конкретними станціями – відправником і одержувачем. Задача управління потоком заключається в узгодженні швидкості передачі відправника з швидкістю, з якою одержувач здатний приймати потік пакетів. Управління потоком звичайно реалізується за допомогою зворотного зв'язку між одержувачем і відправником.

Причина, по якій управління потоком і боротьбою з перевантаженням часто плутають, полягає у тому, що алгоритми боротьби з перевантаженням також використовують зворотний зв'язок у вигляді спеціальних повідомлень, що посилаються різним відправникам з проханням передавати дані повільніше, коли в мережі з'являються затори. Отже, хост може одержати прохання уповільнити передачу в двох випадках: коли з потоком не справляється отримувач або коли з ним не справляється вся мережа.

Тривалість очікування визначається довжиною черги і часом обслуговування. У такій СМО заявка, що поступила в чергу, вже не покидає її і "терпляче" чекає обслуговування [77]. Наведемо основні характеристики обслуговування класичної СМО з необмеженим часом очікування заявок [77]:

Імовірність відмови в обслуговуванні:  $P_{\text{відмова}} = p_{n+m} = \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!} p_0$ .



Відносна пропускна спроможність системи:  $q = 1 - P_{\text{зайняти}} = 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!} p_0$ .

Абсолютна пропускна спроможність системи:  $A = \lambda q = \lambda \left( 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} p_0 \right)$ .

Середнє число зайнятих каналів:  $\bar{z} = \rho \left( 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} p_0 \right)$ .

Середнє число заявок в черзі:  $L = \frac{\rho^{n+1} \cdot p_0}{n \cdot n!} \cdot \frac{1 - (m+1)x + mx}{(1-x)^2}$ , якщо  $x = \rho / n$ .

Середній час очікування:  $\bar{t}_{\text{очікування}} = \frac{L}{\lambda}$ .

Середній час знаходження заявки в системі:  $\bar{t}_{\text{знаходження}} = \bar{t}_{\text{очікування}} + q / \mu$ .

Проте весь трафік мережі з різнорідними потоками вже не може вважатися "еластичним", тобто таким, що не має обмежень на час очікування. Для таких ізохронних додатків, як передача голосу, при перевищенні часу затримки більш ніж на 100... 150 мс різко знижується якість відтворення [14]. Погіршується розбірливість мови, що в деяких ситуаціях може привести до неприпустимих наслідків. Теоретично при перевищенні порогу тривалості очікування заявка може піти з черги (так звані "нетерплячі" заявки). Для СМО з "нетерплячими" заявками поняття «імовірність відмови в обслуговуванні» не має сенсу – кожна заявка стає в чергу, але може і не дочекатися обслуговування, пішовши завчасно. Для запобігання втраті таких "нетерплячих" заявок і, відповідно, погіршенню якості обслуговування доцільно застосовувати алгоритми обслуговування з пріоритетами типу маркірування потоків [68] або ранжирування пакетів по тривалості [16].

Крім того, заявки можуть відходити з причин, пов'язаних із мобільністю мережі, що розглядається: раптових зникнень та появ мережних вузлів у зоні дії. Будемо вважати, що сумарний ефект від факторів нееластичності трафіку та раптових змін структури мережі виражається через

так званий "потік відходів" заявок, що обслуговуються. Отже, на кожну заявку, що стоїть в черзі, діє як би "потік відходів" з середньою інтенсивністю  $\vartheta = \frac{1}{t_{i\div}}$ .

Якщо всі канали обслуговування зайняті і є черга заявок, то, як відомо [40, 68], потік обслужених заявок можна вважати простим. Зробимо також припущення про простий характер потоку "нетерплячих" заявок в загальному потоці. Відносна пропускна спроможність системи  $q$  обчислюється з припущення, що будуть обслужені всі заявки, окрім тих, які підуть з черги достроково. Тому, для знаходження середнього числа заявок, що покидають чергу достроково, обчислимо середнє число заявок в черзі.

Дана мережа як СМО є або одноканальною, або  $n$ -канальною (оптимальне число каналів по критерію «ефективність/вартість» лежить в межах  $2 \leq n \leq 5$  [16]).

Характеристики  $n$ -канальної СМО з очікуванням, в якій число місць в черзі необмежене, але час перебування в черзі обмежений випадковим терміном  $T_{оч}$  з середнім значенням  $\overline{t_{оч}}$  представлені нижче. Граф станів такої системи показаний на рис. 3.5.

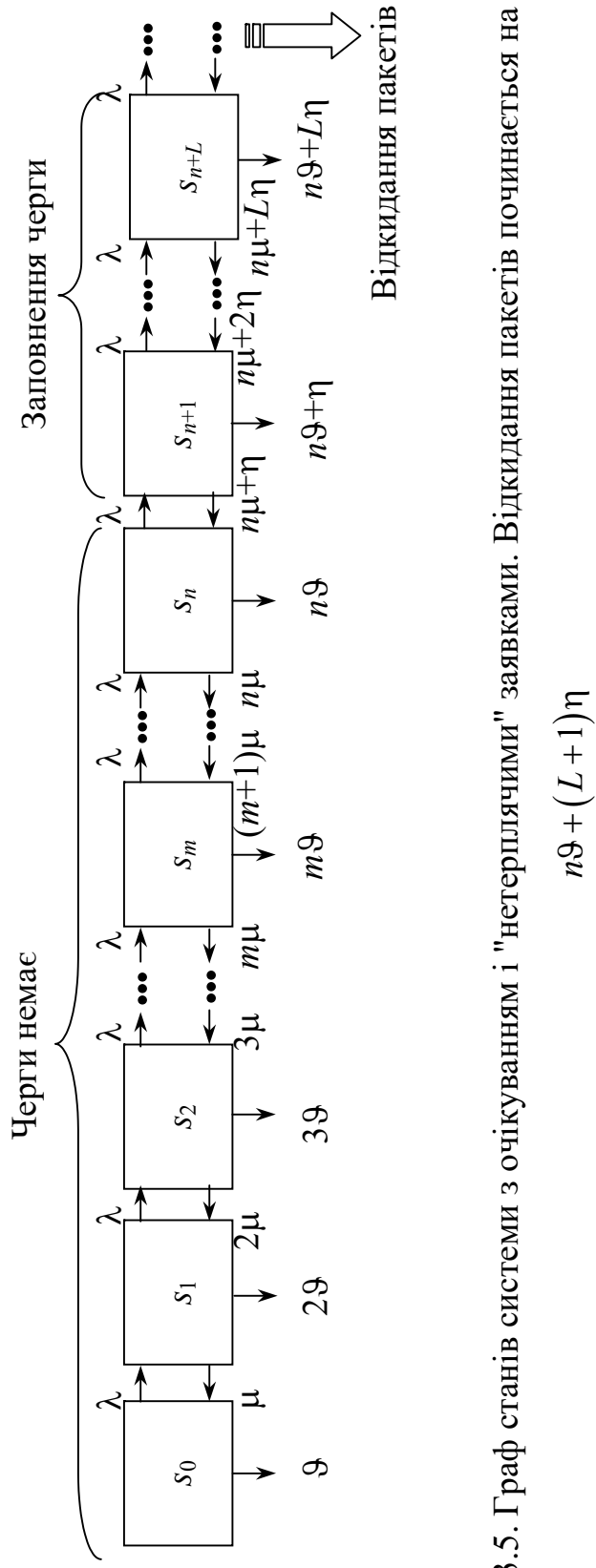


Рис. 3.5. Граф станів системи з очікуванням і "нетерплячими" заявками. Відкидання пакетів починається на кроці  $n\vartheta + (L + 1)\eta$

З урахуванням характеристик потоків заявок, що поступають, та потоків відходів "нетерплячих" заявок з черги обслуговування запишемо вирази для граничних імовірностей станів для системи, граф-схема якої зображена на рис. 3.5:

$$p_0 = \left\{ 1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^n}{n!} \left[ \frac{\rho}{n+\eta} + \frac{\rho^2}{(n+\eta)(n+2\eta)} + \dots + \frac{\rho^r}{(n+\eta)(n+2\eta)\dots(n+L\eta)} + \dots \right] \right\}^{-1},$$

$$p_1 = \frac{\rho}{1!} p_0, \quad p_2 = \frac{\rho^2}{2!} p_0, \quad K, \quad ,$$

$$p_n = \frac{\rho^n}{n!} p_0, \quad p_{n+1} = \frac{\rho^n}{n!} \frac{\rho}{n+\eta} p_0, \quad p_{n+2} = \frac{\rho^n}{n!} \frac{\rho^2}{(n+\eta)(n+2\eta)} p_0, \quad K$$

$$p_{n+r} = \frac{\rho^n}{n!} \frac{\rho^r}{(n+\eta)(n+2\eta)\dots(n+L\eta)} p_0, \quad K$$

В СМО с "нетерплячими" заявками, що колись уходять з черги, стаціонарний режим обслуговування при  $t \rightarrow \infty$  досягається завжди, незалежно від приведеної інтенсивності потоку заявок  $\rho$ .

Для СМО с "нетерплячими" заявками поняття "імовірність відмови" не має сенсу – кожна заявка ставиться в чергу, але може й не дочекатися обслуговування та піти.

Відносна пропускна спроможність  $q$  обчислюється, виходячи з припущення, що будуть обслуговані всі заявки, окрім тих, які підуть з черги достроково. Для знаходження середнього числа заявок, що покинули чергу достроково, обчислимо середнє число заявок в черзі:

$$L = 1 \cdot p_{n+1} + 2 \cdot p_{n+2} + \dots + r \cdot p_{n+r} + \dots$$

На кожному з них діє "потік відходів" з інтенсивністю  $\vartheta$ . Значить, із середнього числа  $L$  заявок в черзі в середньому буде уходити, не дочекавшись обслуговування,  $\vartheta L$  заявок в одиницю часу; всього в одиницю часу в середньому буде обслуговано  $A = \lambda - \vartheta L$  заявок.

По аналогії з виразами для характеристик СМО з необмеженим часом очікування виведемо вирази для основних характеристик обслуговування класичної СМО з обмеженим часом очікування заявок та раптовими

Відносна пропускна спроможність системи: СМО буде  $q = 1 - \frac{\nu}{\lambda} L$ .

Середнє число зайнятих каналів:  $\bar{z} = \rho - \beta \bar{r}$ .

Середнє число заявок в черзі:  $\bar{r} = \frac{\rho}{\beta} - \frac{\bar{z}}{\beta}$ .

Середнє число зайнятих каналів:  $\bar{z} = p_1 + 2p_2 + \dots + n \cdot [1 - (p_0 + p_1 + \dots + p_{n+1})]$ .

На рис. 3.6 зображені розраховані графіки завантаженості буферної пам'яті (довжини черги) при наявності заявок з обмеженим часом очікування.

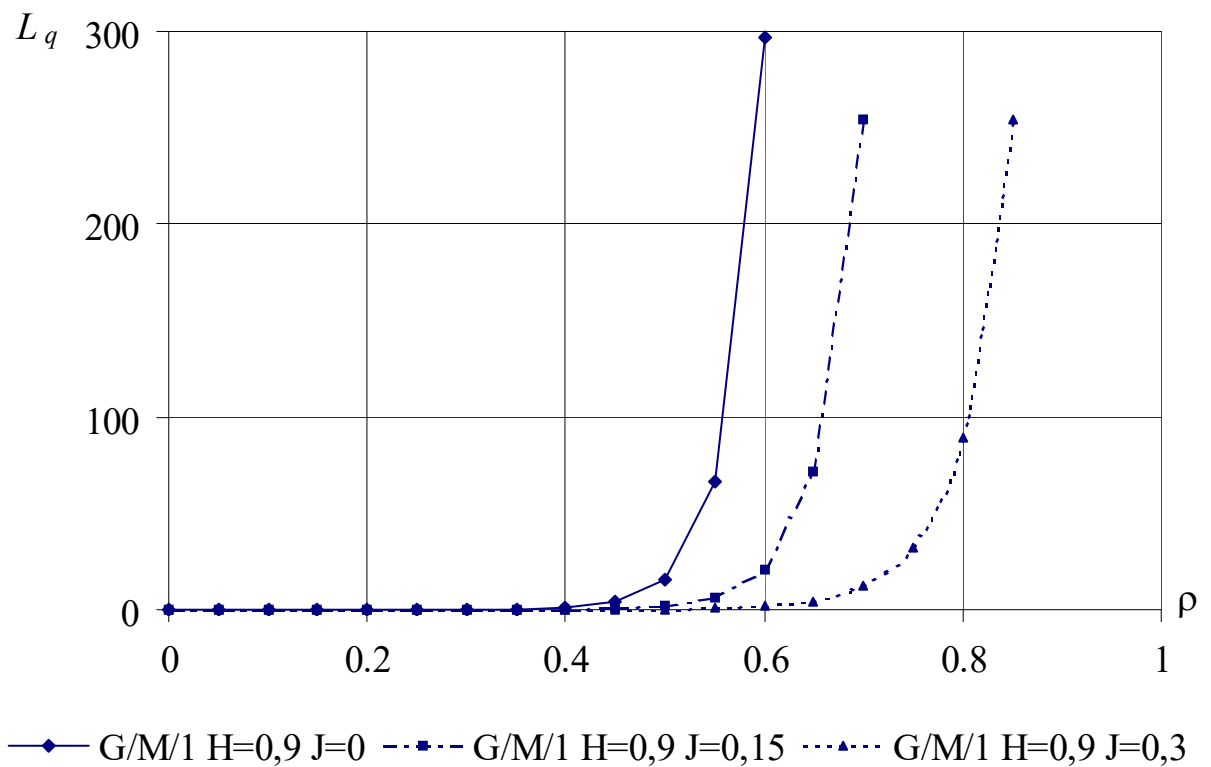


Рис. 3.6. Залежності асимптотичної довжини черги  $L_q$  від інтенсивності самоподібного трафіку з параметром Херста 0,9 та з наявністю частки заявок з обмеженим часом очікування

З графіків видно, що при збільшенні частки "нетерплячих заявок" у

загальному потоці трафіку черги ростуть повільніше, тобто можна допускати більший коефіцієнт використання мережі. Однак це не знімає проблеми ефективного управління потоками трафіку, його раціонального перерозподілу з урахуваннями пріоритетів надійності та швидкості доставки різних видів трафіку. Ці завдання розглянуті у наступному розділі.

### **3.4 Моделі й методи оцінювання характеристик та управління автономними сегментами інформаційно-керуючої системи крупного аеровузла**

Як відмічалось раніше [45], нині активно впроваджуються локальні комп'ютерні мережі різного масштабу типу стільникових інформаційно-комунікаційних і обчислювальних систем зі самоорганізацією. Вони мають змішану структуру "борт – борт" або "борт – земля". Завдяки таким системам забезпечуються швидкий і економічний доступ протягом польотів середньої і малої протяжності. Для реалізації "безшовної" технології [10] при побудові інтегрованої мережі аеровузла, перш за все, необхідно визначитися з комутаційними пристроями – їх принципами побудови, мережними протоколами і специфікою обробки даних. Наприклад, при застосуванні супутникових сегментів в складі інформаційно-обчислювальної мережі необхідно враховувати затримки доставки даних. Для супутників, які знаходяться на високих геостаціонарних орбітах, тільки затримки на поширення сигналу від користувача до супутника і назад становлять близько 250 мілісекунд. Тому, в інтегрованих комутаційних вузлах, побудованих на базі маршрутизаторів, комутаторів звичайних (*Switch*) і програмних (*Softswitch*), систем передачі даних через *IP*-мережі (*IP Multimedia Subsystem – IMS*) набори протоколів доставки даних повинні бути доповнені протоколами тривалого зберігання і гарантованої доставки даних (по типу протоколів мереж з толерантністю до затримок – *Delay-Tolerant Networks – DTN*). Крім того, необхідно забезпечувати взаємодію між успадкованими мережами *ATN* на основі еталонної моделі *OSI* і майбутніми мережами

*ATN/IPS* на основі стандарту *IPv6*. В подальшому планується впроваджувати модифіковані архітектури протоколів та інтерфейсів [2] для застосування в інтегрованих аеровузлових мережах.

Якщо розглядати аеровузлу як автономний елемент авіатранспортної інфраструктури, то одним із найважливіших автономних мережних сегментів аеровузла, відповідно, є авіаційна бортова мережа з мобільними вузлами. Принциповою особливістю мережі з мобільними вузлами є її змінна структура. Внаслідок переміщення літальних апаратів (ЛА) в зоні аеровузла поточна топологія і кількість мережних елементів безперервно змінюються: одні ЛА входять в зону відповідальності аеровузла, інші, навпаки, з неї виходять.

Метою дослідження є побудова математичної моделі авіаційної бортової мережі як стохастичного керованого об'єкта. Для управління роботою мережних структур необхідно розробити рівняння і структурні схеми систем з використанням методів теорії марковських процесів та теорії систем зі змінною структурою.

Проблема стійкості функціонування авіаційних бортових мереж в зоні аеровузла стоїть особливо гостро в зв'язку з необхідністю безумовного забезпечення безпеки польотів, виключення льотних пригод і передумов до них [10]. Ця проблема посилюється через безперервні зміни структури мережі – одні літаки як мережні елементи входять в зону відповідальності аеровузла, інші виходять. Цей процес є суттєво нестационарним. Для забезпечення безпеки мережі при наявності зовнішніх і внутрішніх заважаючих впливів необхідно не просто підвищувати енергетичні та інформаційні ресурси, а застосовувати оптимальні методи управління реконфігурацією мережі. В роботі запропоновані математичні моделі марковських процесів загибелі і розмноження з нестационарними ймовірностями переходу, якими описується поточний стан локальної авіаційної бортової мережі аеровузла. Виведена система рівнянь Колмогорова - Чепмена для нестационарних ймовірностей стану мережі.

Застосовано метод гаусовської апроксимації розподілу координат системи в просторі станів.

На рис. 3.7. схематично зображено схему взаємозв'язку і взаємодії сегментів складеної мережі аеровузла і зовнішніх інформаційних мереж.



Рис. 3.7. Схема взаємозв'язку і взаємодії сегментів складеної мережі аеровузла і зовнішніх інформаційних мереж

Розглянемо типову структуру і параметри авіаційної бортової мережі з мобільними вузлами.

Реальні динамічні системи і, зокрема, системи управління мережною структурою мають елементи, що випадково змінюються, а процеси в них визначаються рівняннями з випадковими параметрами. Випадкові зміни параметрів є повільними в порівнянні з часами процесів управління, що протікають в системі. Отже, ці зміни розглядаються не як статичні нелінійності, а як малі параметри збурення. На малому інтервалі спостереження зміни параметрів також малі та з прийнятною для практики точністю апроксимуються лінійними функціями. Відповідні системи класифікуються як лінійні параметричні. Практично при аналізі таких систем слід враховувати випадкові зміни параметрів в ансамблі однотипних систем.



Структура рівнянь, якими описується їх стан, однакова для всіх систем, а параметри систем розглядаються як випадкові величини, а не як випадкові функції.

Однією з основних проблем організації та функціонування авіаційних бортових мереж є забезпечення їх безпеки і захисту інформації, що циркулює в мережі. Оскільки авіаційні бортові мережі в принципі можуть бути тільки бездротовими, їх вразливість до несанкціонованого доступу (вторгненням) є досить високою. При цьому загрози можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми (наприклад, від пасажирів, які перебувають на борту повітряного судна (ПС) і одержують сервісну і медійну інформацію через інтерфейси загального доступу [40, 42]).

Процес зміни топології і структури бортовий авіаційної мережі представимо у вигляді процесу "загибелі та розмноження". Подія появи нового мережного вузла розглядається як розмноження, вихід вузла із зони покриття мережі – як загибель. Крім того, приймемо припущення про те, що ймовірність одночасної зміни двох і більше вузлів – величина другого порядку малості і тут не розглядається.

Слідуючи [121, 122] стосовно до задачі організації авіаційної бортової мережі, розглянемо методи оцінювання стану і параметрів мережних вузлів, які входять в неї. Один зі станів відповідає повній відсутності вузлів (літаків в зоні аеровузли), а інші – функціонуванню з різним їх кількістю. Перенумерувати все структури в можливій послідовності від відсутності елементів мережі до стану максимального дозволеного їх кількості в зоні аеровузли, отримаємо кінцеве число можливих структур. Перехід системи з одного стану в будь-яке інше характеризується відповідними імовірностями. Можна показати [121], що цей процес є марковським з кінцевим числом станів. Перехідні імовірності не залежать від поведінки системи до моменту часу  $t$  і визначаються тільки ймовірністю стану системи і тривалістю інтервалу  $\Delta t$  – величини другого порядку малості.

Отже, отримуємо систему зі змінною структурою або

мультиструктурну систему, математична модель якої описується марковським процесом загибелі й розмноження [123,124]. Без будь-якої втрати спільності опису приймемо  $0 \leq N \leq 7$ , тобто загальне число елементів мережі в моменти часу  $t_i$  може змінюватися від нуля (відсутність літаків в зоні аеровузла) до 7 (максимально дозволена кількість літаків в зоні аеровузла). При переході зі стану  $j$  в стан  $j+1$  конфігурація мережі змінюється відповідним чином з інтенсивністю реконфігурації, що дорівнює  $\mu_p$ . При цьому вважається, що ймовірність переходу зі стану  $j$  в стан  $j+m$ ,  $m \geq 1$  є величина  $j$  другого порядку малості. Керуючись наведеними вище міркуваннями, побудуємо математичну модель системи управління структурою мережі. На рис. 3.8 зображено схему моделі загибелі та розмноження.

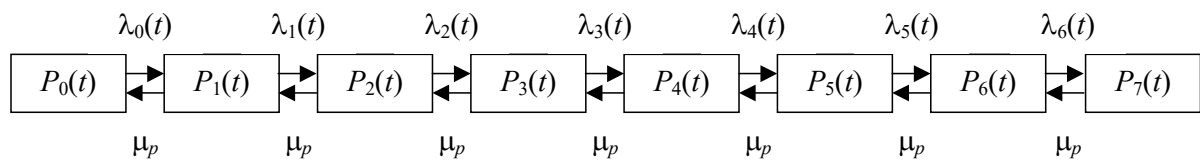


Рис. 3.8. Модель процесу функціонування авіаційної бортової мережі.  
 $\lambda_i$ ,  $i = \overline{0,7}$  – інтенсивності переходів;  $\mu_p$  – інтенсивність реконфігурації  
 мережі при зміні її параметрів

Ймовірності знаходження мережі в певному  $j$ -му стані  $P_{kj}$  в рамках моделі загибелі й розмноження визначаються з рівнянь Колмогорова-Чепмена [6] з

урахуванням умови нормування  $\sum_{k=0}^{N-1} P_k(t) = 1$ :

$$\begin{cases} -P_0(t)7\lambda_d + P_1(t)\mu_\delta = 0; \\ P_0(t)7\lambda_d - P_1(t)(\mu_\delta + 6\lambda_d) + P_2(t)\mu_\delta = 0; \\ P_1(t)6\lambda_d - P_2(t)(\mu_\delta + 5\lambda_d) + P_3(t)\mu_\delta = 0; \\ P_2(t)5\lambda_d - P_3(t)(\mu_\delta + 4\lambda_d) + P_4(t)\mu_\delta = 0; \\ P_3(t)4\lambda_d - P_4(t)(\mu_\delta + 3\lambda_d) + P_5(t)\mu_\delta = 0; \\ P_4(t)3\lambda_d - P_5(t)(\mu_\delta + 2\lambda_d) + P_6(t)\mu_\delta = 0; \\ P_5(t)2\lambda_d - P_6(t)(\mu_\delta + \lambda_d) + P_7(t)\mu_\delta = 0; \\ P_6(t)\lambda_d - P_7(t)\mu_\delta = 0, \end{cases} \quad (3.15)$$

де  $\lambda_d$  – інтенсивність відключення того чи іншого елемента мережі з будь-якої причини (ослаблення сигналу при видаленні літака від зони покриття, поява завад даному абоненту тощо).

Принциповою відмінністю системи рівнянь (3.15) від рівнянь звичайної моделі загибелі й розмноження є нестационарність ймовірностей переходу  $P_i(t)$  на інтервалі спостереження. Рішення в замкнутій формі для такої системи неможливо отримати в принципі, тому необхідно застосовувати наближені (чисельні) методи аналізу. Для кожного типу структури мережі, інтенсивності відключення мережного елемента і заданого критерію зв'язності базової станції безпроводової мережі з цим елементом  $l_{\text{wn}} \geq l_{\text{qos}}$  ( $l_{\text{wn}} \geq 1$  або  $l_{\text{wn}} \geq 2$ ) проводиться розрахунок коефіцієнта захищеності елемента, яким характеризується ймовірність його знаходження в стані з заданим числовим показником якості сервісу  $l_{\text{qos}}$ .

У мультиструктурній системі з матричними функціями поглинання і відновлення реалізацій  $v(t)$  типу стохастичних матриць [97,117] ймовірності стану визначаються з рівнянь типу (3.15) незалежно від рішення рівнянь для вихідних змінних стану. Ці функції визначаються з рівнянь

$$p'_l(t) = p_l(t) \sum_{r=1}^N v_{lr}(t) + \sum_{r=1}^N p_r(t) v_{rl}(t), \quad p_l(t_0) = p_{l0}, \quad l = \overline{1, N} \quad (3.16)$$

Ймовірності стану системи визначаються тільки матрицями потоків поглинання і відновлення, що не залежить від станів системи. Якщо всі інтенсивності переходів на інтервалі спостереження постійні ( $v_{lr} = \text{const}$ ,  $v_{rl} = \text{const}$ ), то рішення рівнянь (3.15) є розв'язання повної проблеми власних значень [98]. Воно повністю визначається початковими умовами і корінням характеристичного рівняння

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 + \sum_{r=1}^N v_{1r} & -v_{21} & \cdots & -v_{N1} \\ -v_{12} & \lambda_2 + \sum_{r=1}^N v_{2r} & \cdots & -v_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -v_{1N} & -v_{2N} & \cdots & \lambda_N + \sum_{r=1}^N v_{Nr} \end{pmatrix} = 0 \quad (3.17)$$

Для нестационарного випадку ( $v_{lr}(t) = \text{var}$ ,  $v_{rl}(t) = \text{var}$ ) матриця в лівій частині рівняння (3.17) є несиметричною. Однак і в цьому випадку чисельне рішення рівняння (3.17) не представляє нездоланих труднощів. Існують добре розроблені методи обчислення власних значень і власних векторів несиметричною матриці шляхом приведення її до верхньої майже трикутної форми Гесенберга і застосування методів *LR*- або *QR*-ітерацій. У зв'язку з нагнітанням обчислювальних потужностей в мережне комутаційне обладнання таке завдання може вирішуватися в реальному часі навіть на прикордонних вузлах мережного периметра.

Як впливає з рівняння (3.16), мережа як об'єкт управління описується рівнянням  $N$ -го порядку. З теорії систем зі змінною структурою [123] слідує, що система є повністю керованою, якщо для об'єкта управління, описуваного рівнянням  $N$ -го порядку, застосовується керуючий пристрій з  $N - 1$  ланкою змінної структури. Рівняння системи реконфігурації мережі мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} R(p)Y &= -k[U + X] + R(p)f; \\ U &= \sum_{j=1}^{N-1} u_j, \quad u_j = \frac{1}{2} [s_{21}^{(j)} Y_j + s_{12}^{(j)} |Y_j| \operatorname{sgn} g]; \\ Y_j &= p^{j-1} Y, \quad g = Q(p)Y, \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

де  $R(p) = \sum_{j=0}^N a_j p^j$ ,  $Q(p) = \sum_{j=1}^N c_j p^{j-1}$ ,  $s_{21}^{(j)} = l_{1j} + l_{2j}$ ,  $s_{12}^{(j)} = l_{1j} - l_{2j}$ ,  $X(t)$  –

випадкова завада з параметрами, які в загальному випадку залежать від часу: середнім значенням  $m_x(t)$  і спектральної щільністю  $s_x(\omega, t)$ ;  $f(t)$  – детермінована функція управління;  $p$  – оператор Лапласа. Ланки управління являють собою перемикачі на ту чи іншу структуру, найбільш ефективну в поточний момент. Перемикання здійснюється при зміні знака керуючого сигналу.

Для отримання асимптотичних оцінок ефективності системи управління захистом мережі доцільно використовувати метод гаусовської апроксимації функції розподілу координат в просторі станів. Правомірність такого підходу, як зазначалося вище, обумовлюється нормалізацією процесів, що протікають в складних системах. Тоді можна застосовувати статистичну лінеаризацію нелінійностей  $u_i$ , яка полягає в наступному.

Передбачається, що в малій  $\varepsilon$ -околиці зображючої точки розподіл ймовірності фазових координат можна апроксимувати гаусовським розподілом. Тоді, розклавши вектор стану (фазових координат)  $\mathbf{Y}$  в ряд Тейлора з утриманням перших двох членів, досить скласти рівняння для вектора математичних очікувань і кореляційної матриці фазових координат системи.

Для розглянутого випадку вектор  $\mathbf{Y}$  системи управління замінюється його математичним очікуванням  $m_1$ , обчисленим шляхом статистичного усереднення в  $\varepsilon$ -околиці, а елементи векторів  $\mathbf{u}$  і  $\mathbf{X}$  – творами їх математичних очікувань на відповідні елементи кореляційної матриці:

$$\left. \begin{aligned} R(p)m_1 &= -\frac{k}{2} \sum_{j=1}^{n-1} [s_{21}^{(i)}m_j + s_{22}^{(j)}\varphi_{0j}] + R(p)f; \\ m_s &= Q(p)m_1, \quad m_j = p^{j-1}m_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

де  $\varphi_{0j}$  - коефіцієнти розкладання векторів  $Y_{0j}$ , описуваних рівнянням (5), у вигляді лінеаризованої залежності  $\varphi_j(Y_1, Y_2) = \varphi_{0j} + k_1 Y_{01} + k_2 Y_{02}$ ; коефіцієнти  $k_1$  і  $k_2$  вибираються, виходячи з умови нормування по змінним стану системи.

Відповідно до поставленої мети роботи отримані рівняння і структурні схеми систем управління безпекою мережних структур, що представляє у сукупності метод управління мультиструктурною системою, для досягнення поставленої мети застосовано математичний апарат методів теорії марковських процесів та теорії систем зі змінною структурою.

Специфіка авіаційних бортових мереж полягає в безперервній зміні структури і складу користувачів мережі та в підвищених вимогах до захисту від зовнішніх і внутрішніх впливів. Для реалізації різних сценаріїв еволюції мобільних мережних структур в умовах не тільки параметричної і структурної невизначеності, а й невизначеності цілей конфлікту доцільно використовувати найбільш універсальні методи статистичного опису вихідних даних і власне процесів протиборства. Водночас необхідно отримувати рішення в замкнутій формі – у вигляді систем функціональних рівнянь, алгоритмів і схем, асимптотичних оцінок. Універсальним апаратом для вирішення цих завдань є теорія марковських процесів, зокрема, процесів загибелі й розмноження, якими з достатньою для практики адекватністю і точністю описуються процеси розвитку конфлікту.

Нелінійності в перемикаючих чарунках доцільно апроксимувати методом статистичної лінеаризації. Справа в тому, що чим більш складною та розгалуженою є динамічна система, тим ближче до гаусовських процеси, що в ній протікають. Крім того, при достатньо великому часі спостереження та накопичення інформації, а також при збільшенні відношення енергії

корисних сигналів до енергії шумів та завад апостеріорна точність оцінок зростає. Відповідно, завдяки застосуванню розробленого методу, точність стохастичної (гаусовської) апроксимації покращується.

### Висновки до розділу 3

У даному розділі проведений аналіз ефективності та розробка методів забезпечення якості сервісу в автономних сегментах авіаційних бортових комп'ютерних мереж і особливостей їх застосування для розв'язання завдань організації повітряного руху.

1. Розглянуті завдання неперервного доставляння аеронавігаційної інформації до користувачів, організації мовного обміну через безпроводові мережі, що працюють під управлінням протоколів, з урахуванням специфіки побудови мобільної бортової мережі, статистичних характеристик мережного трафіку.

2. Розроблено математичну модель бортової локальної мережі з мобільними вузлами та спорадичною зміною структури, коли одні вузли виходять з зони дії мережі, нові вузли з'являються. Виведено розрахункові формули для середнього часу очікування заявок у пам'яті, середньої довжини черги тощо для змішаного – еластичного та нееластичного трафіку.

3. Розроблено математичну модель процесу зростання, розмірів черг у буферній пам'яті мережних вузлів за наявності заявок (сигнальних пакетів) з необмеженим часом очікування та заявок з обмеженим часом очікування у чергах. За результатами розрахунків можна обирати максимально можливий коефіцієнт використання мережі, при якому зростання черги у буферній пам'яті є припустимим.

4. Відповідно до поставленої мети роботи отримані рівняння, структурні схеми систем управління безпекою мережних структур, що у сукупності складає новий метод управління мультиструктурною системою. Для досягнення поставленої мети застосовано математичний апарат методів теорії марковських процесів та теорії систем зі змінною структурою. Нелінійності в перемикаючих чарунках пропонується апроксимувати методом статистичної лінеаризації. Правомірність такого підходу обумовлена ефектами нормалізації в складних динамічних системах і статистичної стійкості імовірнісних розподілів сумарних потоків вхідних впливів.



## РОЗДІЛ 4

### РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИБОРУ СТРУКТУРИ ТА ПАРАМЕТРІВ АЕРОВУЗЛОВОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

#### 4.1 Загальні вимоги до аеровузлової мережі

Згідно з рекомендаціями, даними в роботах [9, 10, 13, 67, 82], головною задачею аеровузлової мережі є забезпечення можливості функціонування системи ОрПР у реальному часі за рахунок сумісного використання ресурсів. Для того, щоб мережа успішно справлялася з цією задачею, вона повинна відповідати вимогам по продуктивності, надійності тощо. Конкретизуємо ці вимоги стосовно задачі забезпечення роботи АС ОрПР як системи критичного застосування при великих перепадах інтенсивності повітряного руху [55].

*Продуктивність* мережі визначає об'єм даних, які передаються, і час, що потрібний для їх передачі. Для оцінки продуктивності мереж загального призначення використовуються загальноприйняті числові характеристики – час реакції мережі, середня пропускна спроможність, максимально можлива пропускна спроможність, затримка передачі. Стосовно систем критичного застосування пропускна спроможність задається, безпосередньо виходячи з максимальної очікуваної швидкості протікання процесів в обслуговуваній системі. Надалі вона може змінюватися (як правило, у бік збільшення) при зміні вимог до системи в цілому. Наприклад, для АС УПР важливим чинником є максимальна очікувана інтенсивність повітряного руху в зоні відповідальності. Проте при цьому час реакції і затримка передачі даних можуть мінятися в широких межах, що неприпустимо при обслуговуванні повітряного руху, особливо при виникненні нештатних ситуацій. Тому, пріоритетними вимогами до обчислювальної мережі є гранично допустимі значення саме часу реакції і затримки передачі даних.

*Надійність* означає імовірність того, що мережа виконує свої функції. Надійності технічних пристроїв звичайно характеризується *часом*

*напрацювання на відмову і коефіцієнтом готовності* (відсоток часу, протягом якого система може бути використана). Надійність інфокомунікаційних мереж також характеризується імовірністю доставки повідомлення адресату. Надійність і ремонтпридатність мереж систем критичного застосування повинні бути такими, щоб при відмовах елементів зниження характеристик системи не виходило за деякі, наперед визначені межі. Час відновлення обладнання або програмного забезпечення не повинен перевищувати десятки секунд, максимум одну-дві хвилини.

*Безпека* означає захист від несанкціонованого доступу до даних і забезпечення надійності та стійкості до навмисних руйнуючих дій.

*Розширюваність* – це можливість порівняльно легкого додавання нових елементів мережі. Для систем критичного застосування висувається додаткова вимога – можливість модифікації мережі в процесі її функціонування, без зниження експлуатаційних характеристик.

*Масштабованість* – це можливість нарощування розмірів мережі, зокрема шляхом приєднання додаткових сегментів.

*Прозорість* означає можливість використовування ресурсів мережі одним і тим же способом незалежно від їх фактичного розміщення – на борту чи на землі, на локальному комп'ютері або в мережі. При цьому користувач як би не «помічає» мережі, працюючи безпосередньо з ресурсами.

*Підтримка різних видів трафіку* – можливість поєднання функцій різних мереж, наприклад, телефонної, зв'язної і комп'ютерної.

*Керованість* – можливість централізованого виявлення і усунення збоїв, несправностей, розподілу ресурсів і повноважень між користувачами. Зупинимося на цій задачі докладніше, оскільки для великої просторово розподіленої корпоративної мережі критичного застосування ефективність управління має найважливіше значення.

Для управління корпоративними комп'ютерними мережами, що включають велику кількість активного обладнання, необхідні складні

системи управління, що здійснюють моніторинг, контроль і управління кожним елементом комп'ютерної мережі.

Аналіз систем управління комп'ютерними мережами дозволив визначити загальні вимоги, що пред'являються до таких систем. Ідеальна система спостерігає за мережею і запобігає виникненню збоїв в її роботі. При цьому, виявивши (спрогнозувавши) проблему, система активізує певну дію, виправляє ситуацію і повідомляє адміністратора про те, що відбулося і які кроки зроблені. Одночасно з цим система управління повинна накопичувати статистичні дані, на підставі яких можна планувати розвиток мережі. У загальному випадку система повинна бути незалежною від виробника і володіти зручним інтерфейсом, що дозволяє виконувати всі дії з однієї консолі.

Існуючі системи управління, не дивлячись на їх функціональну надмірність, не мають в своєму складі розвинених інтелектуальних засобів, що дозволяють якісно прогнозувати поведінку комп'ютерної мережі. Більшість засобів управління насправді мережею не управляють, а всього лише пасивно здійснюють її моніторинг. Вони стежать за мережею, але не виконують активних дій, при цьому фіксуючи тільки факти збоїв. Ідеальним рішенням була б розробка системи аналізу, прогнозування і локалізації можливих збоїв в роботі як комп'ютерної мережі в цілому, так і окремих її елементів. Така властивість системи допоможе заздалегідь виявити можливі вузькі місця і вжити заходи по завчасній їх ліквідації. Проте така система управління практично не може бути реалізована для роботи в умовах критичного застосування [76, 77, 105]. Тому, реальним підходом до рішення даної задачі представляється поточна адаптація деяких підсистем системи в цілому до умов застосування, що змінюються, перерозподіл ресурсів мережі для вирішення конкретних пріоритетних задач (наприклад, при виникненні екстремальних ситуацій різного характеру). Такий підхід цілком логічний і природний, якщо врахувати, що будь-яка крупна корпоративна мережа

складається з окремих сегментів, які порівняно слабо впливають один на одного.

Проаналізуємо характеристики очікуваного навантаження на інформаційно-обчислювальну мережу АС УПР, яка входить як невід’ємна складова крупної корпоративної мережі аеровузла, повинна працювати у реальному часі та в умовах можливого виникнення екстремальних ситуацій, тобто в умовах критичного застосування. На основі проведеного аналізу можна розробити метод і побудувати алгоритм адаптації сегментів мережі до змін об’ємів інформації, що переробляється, і режимів роботи системи в цілому [9].

#### **4.2 Аналіз методів обміну різнорідним та різнопріоритетним мережним трафіком**

Відповідно до прийнятої зараз класифікацій обчислювальних (комп’ютерних) мереж [8, 10, 14, 15, 16], інформаційно-обчислювальну підсистему АС УПР можна віднести до корпоративних мереж.

Корпоративні мережі мають наступні характерні особливості.

1. За допомогою таких мереж покривається велика територія, аж до цілої країни або навіть континенту. Територіальне рознесення вузлів мережі може досягати сотень і тисяч кілометрів.

2. Число користувачів (робочих станцій) може вимірюватися тисячами, число серверів – сотнями, мейнфреймів і спеціалізованих обчислювачів – десятками.

3. Віддалені сегменти найчастіше є високошвидкісними локальними мережами. Ці мережі можуть бути зв’язані між собою через будь-які фізичні канали, а топологія, як правило, змішана, причому не виключена наявність петель.

4. Канали глобального зв’язку між локальними «острівцями» корпоративної мережі, як правило, повинні мати швидкодію такого ж порядку, що і швидкодія цих локальних мереж – острівців.

5. Процеси адміністрування корпоративних мереж, обліку користувачів, встановлення ієрархії і розподілу прав доступу повинні бути, по-перше, максимально автоматизовані, а по-друге, мати раціональний ступінь децентралізації.

Тут перераховані лише деякі, найважливіші особливості корпоративних мереж. Можна стверджувати, що корпоративна мережа АС УВС – це гетерогенна мережа зі змінною структурою. Змінність структури в даному випадку слід розуміти як випадкову послідовність змін в процесі функціонування мережі. Це обумовлено, по-перше, безперервною зміною числа активних користувачів, по-друге, випадковими і часто неконтрольованими змінами параметрів і структури мережі (наприклад, відмови устаткування), по-третє – істотною неоднорідністю трафіку даних, циркулюючих в мережі.

Під гетерогенністю мереж звичайно розуміють різноманітність комутаційного устаткування і каналостворюючої апаратури, великі відмінності (іноді на декілька порядків) в пропускну́й спроможності окремих фрагментів мережі, наявність різних мережних технологій, протоколів обміну даними тощо.

З урахуванням сказаного можна стверджувати, що корпоративна мережа автоматизованої системи управління повітряним рухом об'єктивно є сегментованою структурою. Окремі сегменти функціонують достатньо самостійно і слабо впливають один на одного. Співвідношення об'ємів внутрішньосегментного  $V_{\text{ai}}$  і міжсегментного  $V_{\text{in}}$  трафіку  $q_{\text{dd}} = V_{\text{ai}} / V_{\text{in}}$  міняється в широких межах. За результатами аналізу літератури загального [14, 16, 105, 106] і спеціального [27, 107, 108] призначення можна зробити наступні висновки.

1. У мережах загального призначення – комп'ютерних, телекомунікаційних, конвергованих – традиційне співвідношення  $q_{\text{dd}} = 80/20$ , тобто 80% трафіку – звернення до локальних ресурсів усередині

сегменту і 20% трафіку – обмін даними між сегментами. Нині воно трансформується у бік збільшення частки міжсегментного обміну: «50/50» і навіть «20/80».

2. У мережах систем критичного застосування дані співвідношення дуже сильно залежать від режиму роботи. У штатному режимі може мати місце співвідношення «80/20» і навіть менше.

В екстремальних ситуаціях воно міняється до «20/80», причому пріоритет міжсегментного обміну є значно вищим. Фактично це веде до подальшого збільшення частки міжсегментного трафіку як більш пріоритетного:  $q_{rr} = V_{ai} / V_{in} \approx \llcorner 10/90 \llcorner$  і більш. Проте і менш пріоритетний внутрішньосегментний трафік повинен обслуговуватися у реальному часі, особливо в екстремальних ситуаціях.

Отже, корпоративна інформаційно-обчислювальна мережа АС УПР повинна будуватися за «острівним» принципом. Топологія мережі, як правило, є змішаною. У ній можуть бути присутнім такі елементи:

- комірчаста топологія;
- загальна шина;
- ієрархічна зірка;
- кільце.

Для досягнення необхідної продуктивності, сумісності мережних технологій і протоколів обміну, масштабованості та розширюваності мережі доцільно використовувати підхід, заснований на еталонній моделі взаємодії відкритих систем (*OSI – Open System Interconnection*). Модель *OSI* – це міжнародний стандарт, прийнятий сумісно міжнародною організацією по стандартизації *ISO* і міжнародним союзом по телекомунікаціях (сектор стандартів у області телекомунікацій) *ITU-T*. Всі сучасні комп'ютерні і телекомунікаційні мережі будуються на базі моделі *OSI*. Детальний опис стандарту моделі *OSI* займає більше 1000 сторінок тексту. Для нас же найважливішим є наступні принципові особливості моделі *OSI*:

- семирівнева структура організації обміну даними: від нижнього – фізичного рівня, до верхнього – рівня додатків;

- всі операції по обміну даними контролюються зверху «вниз»: якщо один з нижніх рівнів не виконав свої функції (або виконав їх з помилками), то на верхніх рівнях виниклі проблеми усуваються, а при неможливості їх дозволу операції нижніх рівнів повторюються.

У рамках моделі *OSI* побудова корпоративної мережі АС ОрПР є більш ефективною і наочною. Уявимо, що кожен рівень обслуговується найближчим нижнім рівнем (є клієнтом нижнього рівня), а сам, зі свого боку, обслуговує найближчий верхній рівень (є, відповідно, сервером для верхнього рівня). Тоді ми отримаємо багат шарову (багаторівневу) модель мережі АС ОрПР, з багатократним використанням технології «клієнт-сервер» [66]. Така модель зображена на рис. 4.1.

При такій організації мережі контроль, управління і модернізація є децентралізованими. Всі ці процедури спрощуються, а ефективність їх виконання і надійність системи в цілому підвищуються.

Розглянемо тепер задачу поточного моніторингу, аналізу та діагностування аеровузлової мережі для забезпечення її надійності та відмовостійкості. Ці характеристики є вкрай важливими для підтримки потрібного рівня безпеки польотів.

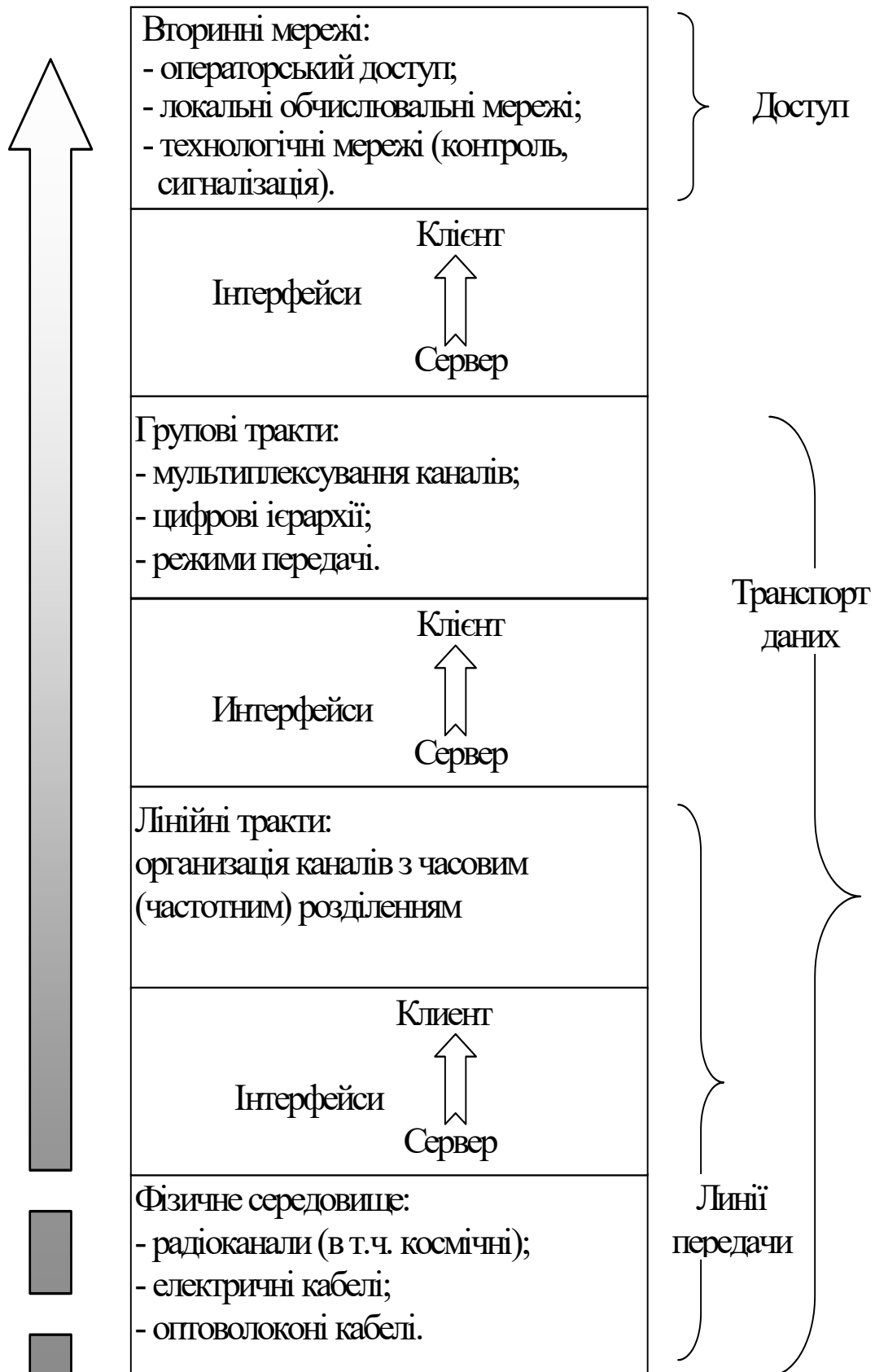


Рис. 4.1. Багатошарова (багаторівнева) модель мережі АС ОрПР



### **4.3 Розробка методу діагностування автономних сегментів аеровузлової мережі**

Для контролю надійності та визначення нештатних ситуацій в аеровузлових мережах необхідно проводити поточний моніторинг, аналіз мереж та діагностування мережних сегментів, вузлів та елементів. Стосовно моніторингу та аналізу комп'ютерних мереж можна стверджувати, що ця проблема впродовж тривалого часу привертає увагу дослідників та розробників комп'ютерних мереж [14-16, 90]. Також вельми актуальною є проблема контролю та діагностики комп'ютерних та телекомунікаційних мереж [65, 91-96].

Менше уваги приділяється проблемам поточної діагностики, забезпечення надійності та відмовостійкості спеціалізованих мереж, зокрема, мереж критичного застосування, до яких, безумовно, слід віднести інформаційно-комунікаційні мережі організації повітряного руху [94]. Задача поточного діагностування складених мереж, що включають автономні сегменти, які можуть функціонувати цілком самостійно, відокремлено від мережі в цілому, є вельми актуальною і такою, що її треба розв'язувати безперервно та частіше за все у реальному часі.

Якщо розглядати складену мережу крупного аеровузла як розподілену обчислювальну систему, побудовану за модульним принципом, з високошвидкісними каналами обміну даними, то для такої системи найбільш придатним є метод самодіагностування з взаємними перевітками та змінною логічною структурою перевірочних зв'язків [69]. У контексті даної роботи самодіагностування слід трактувати як процес виявлення нештатної ситуації в системі шляхом аналізу та узагальнення результатів взаємного контролю функціональних елементів нижчого рівня. Даний вид діагностування є різновидом тестового контролю, при якому контролюється стан об'єктів, що на функціональні блоки. Останні мають принципову можливість виконання тестового контролю інших, пов'язаних з ними функціональних блоків.

Обчислювальні системи та мережі відносяться до класу таких об'єктів, оскільки вони поєднують кілька мережних вузлів – серверів, комутаторів, маршрутизаторів тощо, які працюють під управлінням єдиної розподіленої операційної системи, з'єднуються між собою високошвидкісними лініями передачі та виконують певну сукупність взаємозалежних задач [96, 97].

Залежно від обраної діагностичної моделі та методу діагностування з розподіленим або централізованим діагностичним ядром можна реалізовувати заданий набір тестових перевірок шляхом послідовного або паралельного самодіагностування. Найбільш поширеним є паралельне самодіагностування з розподіленим діагностичним ядром [98]. Однак при реалізації самодіагностування виникають питання практичного характеру: яким чином накопичувати діагностичну інформацію в діагностичному ядрі; як вибрати та обґрунтувати параметри обчислювального модуля, призначеного для аналізу діагностичної інформації; як оцінити імовірнісні характеристики результатів самодіагностування; нарешті, як забезпечити узгодження та розділ процесів виконання базових завдань обчислювальної системи з процесами самодіагностування.

Для розв'язання цих проблем модифікуємо метод самодіагностування з блукаючим діагностичним ядром, запропонований у роботі [99]. Для зниження імовірності похибки першого роду (хибного діагностування) і забезпечення виконання назначених завдань обчислювальної структури, що підлягає діагностуванню, використаємо фоновий режим діагностування з випадковими змінами структур перевірочних зв'язків, тобто розробимо мультиструктурну систему з випадковою зміною структури [100].

Розглянемо діагностичний граф обчислювальної системи (рис. 4.1). Вершини графа відповідають таким елементам об'єкту діагностики, що здатні виконувати перевірку технічного стану всіх інших його частин. Назвемо ці елементи обчислювальними модулями (ОМ). Перевірка  $i$ -м модулем  $M_i$  технічного стану  $j$ -го модуля  $M_j$  визначається як елементарна

перевірка  $C_{ij}$ . Структури, зображені на рис. 4.2 а) та на рис. 4.2 б), є рівносильним за критеріями обчислювальної складності. Можна показати [101, 102], що алгоритми діагностики, організовані за такими структурами, здатні виявити  $m_d = M - 1$  несправностей та виявити й локалізувати  $m_{dl} = (M - 1)/2$  несправностей, якщо система включає  $M$  обчислювальних модулів.

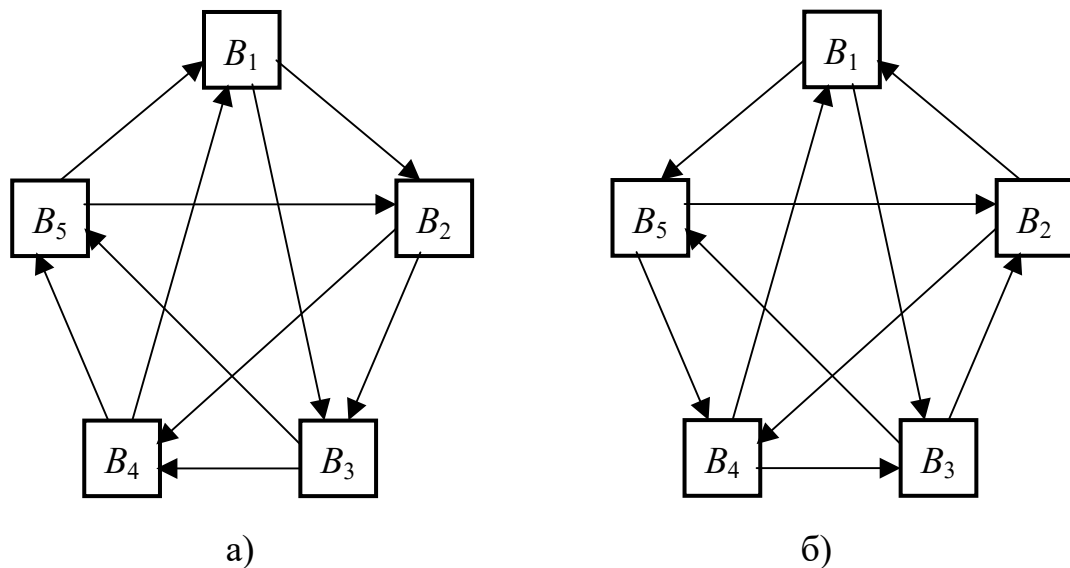


Рис. 4.2. Діагностичний граф  $G(\mathbf{B}, \mathbf{K})$  обчислювальної системи:

- а) циклічна послідовність елементарних перевірок  $C_{i,i+1}$ ;
- б) циклічна послідовність елементарних перевірок  $C_{i,i-1}$

Для конкретної задачі, що розглядається, роль ОМ відіграють сервери, комутаційні та термінальні вузли, що входять до складу локальної бортової мережі або наземної мережі у складі корпоративної мережі аеровузла. Оскільки з інтенсивним впровадженням обчислювальних потужностей у сучасне мережне обладнання мережні та термінальні вузли, по суті, представляють собою багатопроцесорні обчислювальні системи, вони можуть успішно розв'язувати завдання самодіагностування для забезпечення надійності та працездатності інформаційно-обчислювальних систем різного масштабу та призначення.

У загальному випадку елементарна перевірка включає подачу на обчислювальний модуль, що підлягає перевірці, послідовності тестових сигналів. Вихідні сигнали, що виникають в результаті реакції на тестові послідовності, подаються на обчислювальний модуль – джерело тестових сигналів, після чого в ньому аналізується степінь відповідності отриманої послідовності вихідних сигнальних реакцій та очікуваних (еталонних) сигнальних реакцій на тестові сигнали. За результатами аналізу формується нев'язка – функція (в загальному вигляді – функціонал) різниці між реальною  $r_{ij}$  та еталонною  $r_{ij}^0$  реакціями:

$$\varepsilon_{ij} = \Psi\left(r_{ij} - r_{ij}^0\right). \quad (4.1)$$

В якості найпростішої функції нев'язки можна брати модуль різниці  $\left|r_{ij} - r_{ij}^0\right|$  або квадрат різниці  $\left(r_{ij} - r_{ij}^0\right)^2$ , усереднені на інтервалі спостереження.

Обчислювальний модуль вважається несправним, якщо його реакція на еталонні тестові впливи не збігається з заздалегідь прогнозованою, тобто нев'язка перевищує деякі припустимі значення. Очевидно, що повнота діагностування визначається властивостями вибраних тестових послідовностей.

У загальному випадку процедура самодіагностування полягає в наступному. Об'єкт діагностування, що складається з  $N$  вузлів (блоків, елементів), розбивається на  $M$ ,  $M \leq N$  автономних модулів, що можуть перевіряти одне одного. Складається програма елементарних перевірок, відповідно до якої здійснюється взаємодія між автономними модулями системи. Максимальне число взаємних перевірок за умови  $M = N$  дорівнює  $K_{\max} = K_i + K_j = N(N - 1)$ , де  $K_i$  – число перевірок  $j$ -го модуля  $i$ -м модулем;  $K_j$  – число перевірок  $i$ -го модуля  $j$ -м модулем.

Сукупність результатів елементарних перевірок являє собою синдром, тобто набір ознак, характерних для того або іншого явища. Такий же

приблизно сенс має поняття "синдром" і в теоріях кодування та корекції похибок у кодах. Синдром вектора, що, можливо, містить помилки, дає можливість розпізнати найімовірніший характер цих помилок.

Синдромом вектора діагностичних параметрів є вектор

$$\mathbf{S}_{rij} = \mathbf{R}_{ij} \mathbf{C}_{KiKj}^T, \quad (4.2)$$

де  $\mathbf{R}_{ij}$  – вектор отриманих результатів перевірок;  $\mathbf{C}_{KiKj}$  – матриця зв'язків між обчислювальними модулями. T – символ транспонування.

З правила перемножування матриць виходить, що синдром є вектор довжини  $K_i$ , де  $K_i$  – число рядків перевіркової матриці зв'язків. Через визначення синдрому вектор  $\mathbf{R}_{ij}$  тоді й тільки тоді визначає справність системи, коли його синдром рівний нульовому вектору. Насправді, рівність  $\mathbf{R}_{ij} \mathbf{C}_{KiKj}^T = 0$  рівносильна тому, що координати вектора  $\mathbf{R}_{ij}$  задовольняють перевірочним співвідношенням  $r_{ij}$ .

Вибірка даних, отриманих у результаті перевірок, аналізується за алгоритмом самодіагностування, який розглянуто нижче. Визначається технічний стан усіх модулів, що діагностуються. Після визначення несправних модулів виконується відновлення системи шляхом фізичної заміни несправних модулів або, у разі неможливості фізичної заміни, шляхом реконфігурації системи. Наприклад, обираються нові маршрути доставки даних, минаючи несправні комутаційні мережні вузли.

Слід зазначити, що при реалізації представленого способу самодіагностування треба враховувати можливі ускладнення, обумовлені проблемами витримування жорсткої програми перевірок. Тому, процедури самодіагностування треба модифікувати таким чином, щоб забезпечувався фоновий режим відносно робочих характеристик функціонування системи. При цьому в системі можливі затримки у проведенні перевірок, обумовлені необхідністю очікування завершення першочергових робочих процесів.

Відповідно, час діагностування системи в цілому буде залежати від об'єму розв'язуваних робочих задач у системі.

Важливою задачею є також визначення обчислювального модуля системи, на який покладається функція реалізації алгоритму самодіагностування і видачі результатів аналізу технічного стану окремих модулів та системи в цілому.

Особливістю даного способу самодіагностування є необхідність урахування параметру  $m_{rf}$ , яким означимо найбільшу кількість несправних модулів, при якій достовірність результатів аналізу є задовільною. Як відомо [102], систему неможливо достовірно діагностувати, якщо  $m_{rf} \geq (M - 1)/2$ .

Достовірність результатів діагностування даним методом визначається після виконання процедури діагностування і залежить від результатів елементарних перевірок і параметра  $m_{rf}$ . Отже, при такому підході можливе отримання результату з незадовільною достовірністю.

Для забезпечення потрібної достовірності діагностування пропонується нова організація самодіагностування обчислювальних модулів, яка є вільною від вказаних недоліків. Сутність її полягає в наступному:

1. Структура перевірочних зв'язків приймається не детермінованою і такою, що припускає гнучкі зміни; елементарні перевірки в системі проводяться методом випадкового пошуку; для організації перевірок використовуються вільні часові слоти роботи двох обчислювальних модулів, що підлягають взаємній перевірці.

2. Передача діагностичної інформації виконується за умов завершення елементарних перевірок.

3. Кожен обчислювальний модуль отримує діагностичну інформацію, після чого у ньому формується ознака достатності структури перевірочних зв'язків для реалізації алгоритму діагностування; критерієм достатності є мінімум часу діагностування; при задоволенні зазначеного

критерію обчислювач виконує алгоритм діагностування і визначає технічний стан кожного обчислювального модуля системи.

Результати досліджень [69] показали, що в більшості випадків немає необхідності призначення повних або послідовних перевірочних структур (як, наприклад, у роботі [101]). Також можливо виконувати діагностування з потрібною достовірністю при меншому числі перевірок, завдяки чому досягається вигреш у часі діагностування.

Оскільки елементарні перевірки здійснюються у випадкові моменти часу, коли має місце наявність вільних часових слотів циклу роботи обчислювальних модулів, оперативне самодіагностування може проводитися під час штатного функціонування об'єкту контролю. На підставі цього можна вважати, що гнучкі структури мають певні переваги перед структурами з жорсткою конфігурацією особливо в плані можливості реалізації перевірочних зв'язків (елементарних перевірок) від степеню завантаження обчислювальної системи (мережі) при її роботі за прямим призначенням.

Для самодіагностування гнучкої структури перевірочних зв'язків на відміну від жорсткої структури немає необхідності в розробці деякого алгоритму диспетчеризації елементарних перевірок, наприклад, шляхом полігону або циклічних переривань.

При самодіагностуванні з жорсткою структурою перевірочних зв'язків також необхідний додатково визначати обчислювальний модуль, у якому реалізується алгоритм самодіагностування. При гнучкій структурі процес визначення відповідного модуля вже містить в собі визначення даного модуля у процесі умовної передачі. Програма самодіагностування грає роль мобільного агента, який переходить від одного модуля до іншого при необхідності. Це спрощує загальну процедуру організації самодіагностування за умов поточної зміни числа вузлів та взагалі топології локальної бортової мережі з мережними вузлами, які є мобільними за визначенням. У випадку відновлення та/або реконфігурації системи при гнучкій структурі

перевірочних зв'язків не виникає ускладнень (на відміну від фіксованої структури) для наступних етапів самодіагностування системи.

При оперативному самодіагностуванні з гнучкою структурою перевірок зв'язків апріорна достовірність визначення технічного стану об'єкту діагностування задається перед початком виконання процедури самодіагностування. У цьому випадку елементарні перевірки в системі проводяться доти, поки не буде досягнута задана достовірність.

Оперативне самодіагностування дозволяє визначити технічний стан окремого обчислювального модуля системи при довільній кількості відмов у системі без урахування параметра  $m_{rf}$  та обмежень на обчислювальну складність [69]. За допомогою даного методу можливо діагностувати постійні відмови ОМ системи і в окремих випадках плаваючі відмови, тому що процедура самодіагностування виконується через проміжки часу, які менші, ніж тривалості змін у працездатності системи.

При розробці та дослідженні оперативного самодіагностування з гнучкою структурою перевірок зв'язків використовуються наступні діагностичні моделі обчислювальних систем:

- орієнтований діагностичний граф  $G(\mathbf{B}, \mathbf{K})$ , де множина вершин  $\mathbf{B} = \{B_i\}$  графа відповідає обчислювальним модулям системи, а множина дуг  $\mathbf{K} = \{K_{ij}\}$  – елементарним перевіркам ( $i, j = 1, 2, K, M$ );
- система рівнянь виду (4.2), що складається на підставі поточної структури перевірок зв'язків в об'єкті перевірки.

Використання даних діагностичних моделей дозволяє відобразити поточні структури перевірок зв'язків системи за допомогою відповідних інваріантів діагностичного графа системи. В якості інваріантів матриці зазвичай обирають власні значення [103, 104]. Базуючись на цьому, виберемо власні значення  $\lambda_i$ ,  $i = 1, K, M$  матриці  $\mathbf{C}_{K_i K_j}$  у якості її інваріантів.



Вважаючи вагові коефіцієнти зв'язків між вузлами однаковими й рівними одиниці, запишемо матриці з'єднань для діагностичних графів, зображених на рис. 4.2. Відмітимо, що оскільки елементи головної діагоналі матриць є нульовими, серед власних значень є хоча б одне нульове.

Для графа на рис. 4.2 а):

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (4.3 \text{ а})$$

для графа на рис. 4.2 б):

$$C_{ji} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.3 \text{ б})$$

Фізичний зміст власних значень  $\lambda_i$  полягає в наступному:  $\lambda_i$  – це кількість підмножин обчислювальних модулів, що складається з  $i$  модулів, які перевіряють усі інші модулі, що залишилися. Наприклад, для графа, зображеного на рис. 4.2 а), власні значення приймуть наступні величини:  $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_2 = 5$ ,  $\lambda_3 = 5$ ,  $\lambda_4 = 5$ ,  $\lambda_5 = 0$ .

Власними значеннями  $\lambda_i$  можна характеризувати довільну структуру перевірочних зв'язків як кількість частково достатніх підструктур, що утримуються в поточній структурі. Часткова достатність у даному контексті трактується як нестрога достатність статистичної вибірки результатів перевірки підмножини об'єктів, що діагностуються. При цьому вважається, що при перевірці всієї множини об'єктів у складі системи ми отримуємо строго достатню статистику (або хоча б достатню статистику в асимптотичному сенсі).

Під достатністю підструктури як об'єкту діагностування розуміють таку структуру перевірочних зв'язків, при якій  $i < M$  справних модулів перевіряють  $(M - i)$  інших модулів.

Числові характеристики  $\lambda_i$  можна визначити аналітично в такий спосіб. Розглянемо модифіковану матрицю суміжності  $A_M$  діагностичного графа, у якій по головній діагоналі в  $i$ -му рядку знаходяться одиниця, якщо  $i$ -й ОМ

робить хоча б одну перевірку, і нуль – в іншому випадку. Для діагностичного графа, зображеного на рис. 4.2 а), модифікована матриця суміжності має такий вигляд:

$$\mathbf{A}_M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Для матриці  $\mathbf{A}_M$  власні значення  $\lambda_i$  будуть позначати кількість різних варіантів покриття  $i$  рядками всіх стовпців ненульовими елементами. Характеристики  $\lambda_i$  можуть бути легко визначені шляхом перебору всіх елементів матриці  $\mathbf{A}_M$ . Наприклад,

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_i^M \left[ \prod_{j=1}^M (a_{kj} \vee a_{ij}) \right], \quad (4.5)$$

де  $a_{ij}, a_{kj}$  – елементи матриці  $\mathbf{A}_M$ .

Слід зазначити, що для здійснення такого перебору необхідно, щоб кожен ОМ мав повну інформацію про всі перевірочні зв'язки, тобто матрицю суміжності діагностичного графа.

Такий підхід є прийнятним, коли існує зовнішнє (постійне) діагностичне ядро. У системі ж із блукаючим діагностичним ядром можуть виникнути ускладнення при передаванні діагностичної інформації. Вони можуть бути обумовлені як зайнятістю мережі, тобто відсутністю вільних часових слотів, так і раптовою зміною набору бортових мережних вузлів у процесі їх пересування у просторі. Пересилання інформації з одного обчислювального модуля до іншого здійснюється методом умовної передачі результатів елементарних перевірок. Суть його заключається в тому, що перевірочна інформація зберігається на проміжних вузлах передачі до моменту появи вільного часового слоту, після чого здійснюється спроба передачі. При цьому копія перевірочних даних зберігається на проміжному

вузлі до моменту отримання квитанції про прийом даних на наступному вузлі. Тільки після цього вона скидається.

Схема станів обчислювальних модулів у процесі умовної передачі зображена на рис. 4.3.

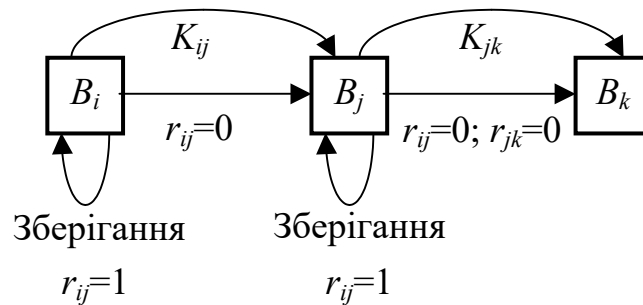


Рис. 4.3. Схема станів обчислювальних модулів при умовній передачі діагностичної інформації

Поточний вузол (обчислювач), що здійснив перевірку, залежно від її результатів  $K_{ij}$  може пересилати або залишати у себе діагностичну інформацію – результати перевірок. Якщо вузол  $B_i$  оцінює вузол  $B_j$  як справний, то  $B_i$  пересилає у вузол  $B_j$  результат елементарної перевірки  $\{r_{ij}\}$  і кодове слово, що несе інформацію про перевірочні зв'язки в системі. Вузол  $B_j$ , зі свого боку, оцінює справність вузла  $B_k$ . У випадку прийняття рішення про справність вузла  $B_k$  вузол  $B_j$  пересилає до нього результати всіх попередніх перевірок і відповідне кодове слово структури перевірочних зв'язків. Приймаючи інформацію про результати перевірок і кодове слово структури перевірочних зв'язків, кожен вузол (обчислювальний модуль) формує ознаку достатності й приймає рішення про проведення діагностування.

При формуванні ознаки достатності структури кожен ОМ визначає числові характеристики  $C_i$  на основі кодів простих інваріантів діагностичного графа. Характеристики  $C_i$  дозволяють однозначно визначити

імовірність видачі результату діагностування системи. Аналітично її можна визначити як одночасну появу двох подій:

- подія  $S_1$  – у поточній структурі перевірочних зв’язків хоча б одна достатня підструктура;
- подія  $S_2$  – кожен ОМ із домінуючої підмножини  $X_1$  у цій достатній підструктурі буде справним.

Імовірності цих подій визначаються у такий спосіб:

$$P(S_1) = \frac{C_{ix}}{C_M^{ix}}; \quad (4.6)$$

$$P(S_2) = p^{i_x} q^{M-i_x}, \quad (4.7)$$

де  $C_i$  – числові характеристики поточної структури перевірочних зв’язків;  $i_x$  – потужність підмножини  $X_1$  у достатній підструктурі діагностичного графа;  $C_M^{ix}$  – кількість комбінації з  $M$  по  $i_x$ ;  $p$  – імовірність безвідмовної роботи ОМ, яку без втрати узагальнення можна вважати однаковою для всіх ОМ;  $q = 1 - p$  – імовірність відмови ОМ.

Після цього, по формулі повної імовірності, можна визначити імовірність видачі результату діагностування для поточної структури і стану обчислювальної системи у будь-який момент:

$$P_{\text{res}} = \left( \sum_{i=2}^{M-1} C_M^{ix} p^{i_x} q^{M-i_x} \right) \frac{C_{ix}}{C_M^{ix}} = \sum_{i=2}^{M-1} C_{ix} p^{i_x} q^{M-i_x}. \quad (4.8)$$

Однією з головних задач оперативного самодіагностування є визначення моменту початку виконання алгоритму самодіагностування. По мірі проведення елементарних перевірок у системі імовірність видачі результату самодіагностування  $P_{\text{res}}$  згідно з (4.8) монотонно зростає. У такий спосіб кожній  $n$ -й структурі перевірочних зв’язків відповідає своє значення  $P_{\text{res}n}$ .

У загальному випадку можна визначити таке значення  $P_{\text{res}} = P_{\text{opt}}$ , при якому варто припинити виконання елементарних перевірок у системі і почати обробляти синдром відповідно з виразом (4.2), тобто провести

самодіагностування. Отже час початку самодіагностування визначається відповідно до наступного виразу:

$$t_{dg} = t \Big|_{P_{res} \geq P_{opt}}. \quad (4.9)$$

Значення  $P_{opt}$  знаходиться з умови мінімуму часу виконання процедури самодіагностування. Її проводитиме той вузол (обчислювальний модуль), у якому є достатній обчислювальний ресурс (швидкодія та пам'ять). Якщо таких вузлів декілька, треба обирати той вузол, у якому раніше за інших буде виконано умову (4.9). Вся діагностична інформація передається на обраний вузол методом умовної передачі результатів елементарних перевірок. Можна довести [69], що при такому способі передачі інформації справні обчислювачі будуть мати кількість інформації більше, ніж несправні, й алгоритм буде проводитися одним із справних ОМ. Завдяки цьому вирішується одна з головних і неоднозначних задач самодіагностування – визначення ОМ, інформація якого є достовірною і на який можна покласти функції самодіагностування.

Заключним етапом оперативного самодіагностування є обробка синдрому (4.2). Пропонується використовувати імовірнісний алгоритм самодіагностування [101, 102], у якому враховуються апріорні імовірності справного стану системи. При циклічних перевірках справності системи поточні результати можна виконувати у якості апріорних імовірностей наступного етапу діагностування. Можна очікувати зростання достовірності результатів перевірки від етапу до етапу, але оцінка швидкості та монотонності цього зростання потребують подальших досліджень.

Після проведення самодіагностування можливий один з двох взаємовиключних результатів:

- ОМ видає результат оцінки технічного стану системи;
- ОМ не видає результату. Видається команда на продовження елементарних перевірок.

Після видачі результату самодіагностування здійснюється відновлення працездатності системи шляхом відключення із системи несправного ОМ (вузла, маршруту) і покладання задач обчислення та/або передавання даних на модулі, що залишилися справними. Після цього вся інформаційно-обчислювальна система продовжує функціонувати за призначенням. Паралельно виконується відновлення працездатності модулів, що відмовили, та продовжується оперативне самодіагностування системи.

Запропонована процедура оперативного самодіагностування може знайти застосування не тільки в обчислювальних системах та мережах рухомих об'єктів, але й у будь-яких розподілених обчислювальних системах, що складаються з великого числа модулів, здатних виконувати перевірки одне одного. Виконання оперативного самодіагностування в цих системах дозволяє:

- забезпечити потрібну живучість ОС та її підсистем діагностування, виявлення несправностей при відмові у самих засобах контролю завдяки використанню "блукаючого" діагностичного ядра;
- підвищити готовність ОМ до виконання основних функцій за рахунок діагностування їх технічного стану під час виконання штатних функцій;
- зменшити інтервали між моментом виникнення несправності та моментом її виявлення завдяки регулярному діагностуванню модулів;
- забезпечити можливість дотримання потрібної достовірності результатів діагностування обчислювальних систем та мереж за рахунок постійного відстеження структури перевірочних зв'язків обробки поточних синдромів.

#### 4.4 Вибір та обґрунтування варіантів побудови аеровузлової мережі

У рамках запропонованої вище багат шарової моделі можна логічно і технічно обґрунтувати структуру корпоративної аеровузлової мережі. Як відомо, в цифрових конвергованих мережах (або мережах нових поколінь – *NGN*) найпоширенішими є технології *ATM* і *IP*-технології. Основними достоїнствами протоколу *IP* є його простота і можливість динамічної фрагментації пакетів. Проте протокол *IP*, будучи, по суті, дейтаграмним протоколом, не дає ніяких гарантій доставки повідомлень. Якщо при цьому на якій-небудь ділянці мережі відбулася втрата пакетів, вузли комутації (або маршрутизатори) починають посилати запити своїм сусідам. Навантаження росте лавиноподібно і може взагалі паралізувати даний фрагмент мережі, що для умов критичного застосування неприпустимо.

З другого боку, *ATM*-технологія хороша тим, що є високошвидкісною (швидкості до 622 Мбіт/с) і забезпечує універсальну обробку різноманітного трафіку в гетерогенній мережі. Крім того, *ATM*-технологія забезпечує гарантоване значення *QoS* – *quality of service* (якість сервісу).

У корпоративній мережі АС УПР також превалує «острівний» принцип, який вельми поширений в телекомунікаційних і комп'ютерних мережах [107]. Тут цей принцип об'єктивно є найпридатнішим внаслідок великого територіального рознесення локальних елементів корпоративної мережі, причому найчастіше – уздовж трас польотів (див. рис. 4.3).

Розглянемо один із типових «острівців» корпоративної мережі АС УПР – локальну обчислювальну мережу аеродромно-районної АС УПР (АРАС УПР). Вона включає універсальні та спеціалізовані обчислювачі, бази і сховища даних, набір АРМ операторів – диспетчерів, керівників, груп зв'язку, метео-, довідкової інформації тощо.

Між окремими АРМ, які виконують самостійні функції, необхідні розв'язки по внутрішньому і міжсегментному трафіку. Також необхідні розв'язки і між обчислювальними мережами сусідніх районів. Як наголошувалося вище, розв'язки – це основа структуризації мереж із

загальним середовищем, що розділяється, які обслуговують системи реального часу і особливо системи критичного застосування. Для розв'язки сегментів складеної аеровузлової мережі необхідно відповідним чином організувати архітектуру стеку протоколів з урахуванням функціонування широкосмугових супутникових сегментів. Мається на увазі зв'язок супутникової системи із зовнішніми абонентами (земля, повітряні судна). Для внутрішнього зв'язку використовується окрема локальна мультисервісна мережа, по якій здійснюється транспорт як аналогових сигналів (термінальний вузол під'єднується через модем), так і цифрових сигналів (через комутатор).

Архітектура стеку супутникових протоколів також описується за багаторівневим принципом та загальною архітектурою стеку протоколів для *IP*-інтранет мереж [109]. Супутниково-орієнтованими рівнями з адаптацією функцій доступу до загального стеку мережних протоколів у рамках еталонної моделі *TCP/IP* є фізичний рівень та рівень представлення даних.

На зовнішніх рівнях еталонної моделі є рівень додатків та супутниково-незалежний рівень *Ipv4/Ipv6* також з адаптацією до загального стеку мережних протоколів. На рис. 4.4 зображено схему супутниково-орієнтованих та супутниково-незалежних рівнів протоколу обміну даними з широкосмуговою супутниковою мультимедійною мережею. Схему модифіковано у порівнянні зі схемою, наведеною в [109]. Модифікація заключається в додаванні стеку протоколів доступу до мультимедійних додатків. Організація доступу базується на застосуванні протоколів програмного комутатора *Softswitch* та підсистеми *IMS – IP multimedia Subsystem*.





Рис. 4.4. Співвідношення між супутниково-незалежними та супутниково-орієнтованими рівнями протоколів для широкопasmової мультимедійної супутникової мережі

Доступ та розподіл потоків різноманітного трафіку у складеній мережі пропонується здійснювати через програмний комутатор *Softswitch* [111]. Його пристрої та функції добре відпрацьовані, а при його використанні забезпечується надійна розв'язка по мережам передачі зі змішаною топологією та структурою [110]. При використанні "чистих" *IP*-мереж доцільно використовувати підсистему *IMS* як еволюційний розвиток обладнання *Softswitch* [112].

Передбачається, що локалізація ділянки магістральної мережі, яка проходить через даний район, здійснюється за допомогою шлюзів. Локалізація окремих ЛОМ, обслуговуючих відповідні АРМ, може здійснюватися за допомогою комутаторів, а для найвідповідальніших ланок – за допомогою програмних комутаторів або маршрутизаторів з різними можливостями і наборами послуг, що надаються. Такий вибір вузлів комутації ґрунтується на результатах порівняльного аналізу їх характеристик: ефективності, вартості, можливості застосування при розширенні або зміні масштабу мережі [81-85, 90, 92, 106 ].

Для вирішення обчислювальних задач, пов'язаних з обробкою конфліктних або екстремальних ситуацій, сплесками інтенсивності повітряного руху тощо, до складу ЛОМ включаються спеціалізовані обчислювачі реального часу (див. попередні розділи). Обробка статистики навантаження на магістральну і локальні обчислювальні мережі може здійснюватися в універсальному обчислювачі. Там же реалізуються алгоритми адаптивної логічної структуризації мереж.

Кількість термінальних вузлів кожного АРМ залежить від об'єму і напруженості вирішуваних задач і визначається індивідуально для кожної конкретної АРАС УВС. Відповідно, і при загальному виборі конкретного мережного комутаційного, термінального і лінійно-кабельного обладнання необхідно враховувати безліч організаційних, технічних і економічних факторів.

Зі свого боку, багаторівнева архітектура мережі літака як автономного мобільного сегменту аеровузлової мережі повинна мати як горизонтальне, так і вертикальне структурування. На рис. 4.5 показана приблизна структурна схема мережних сегментів, що входять до складу бортової мережі.

Літак

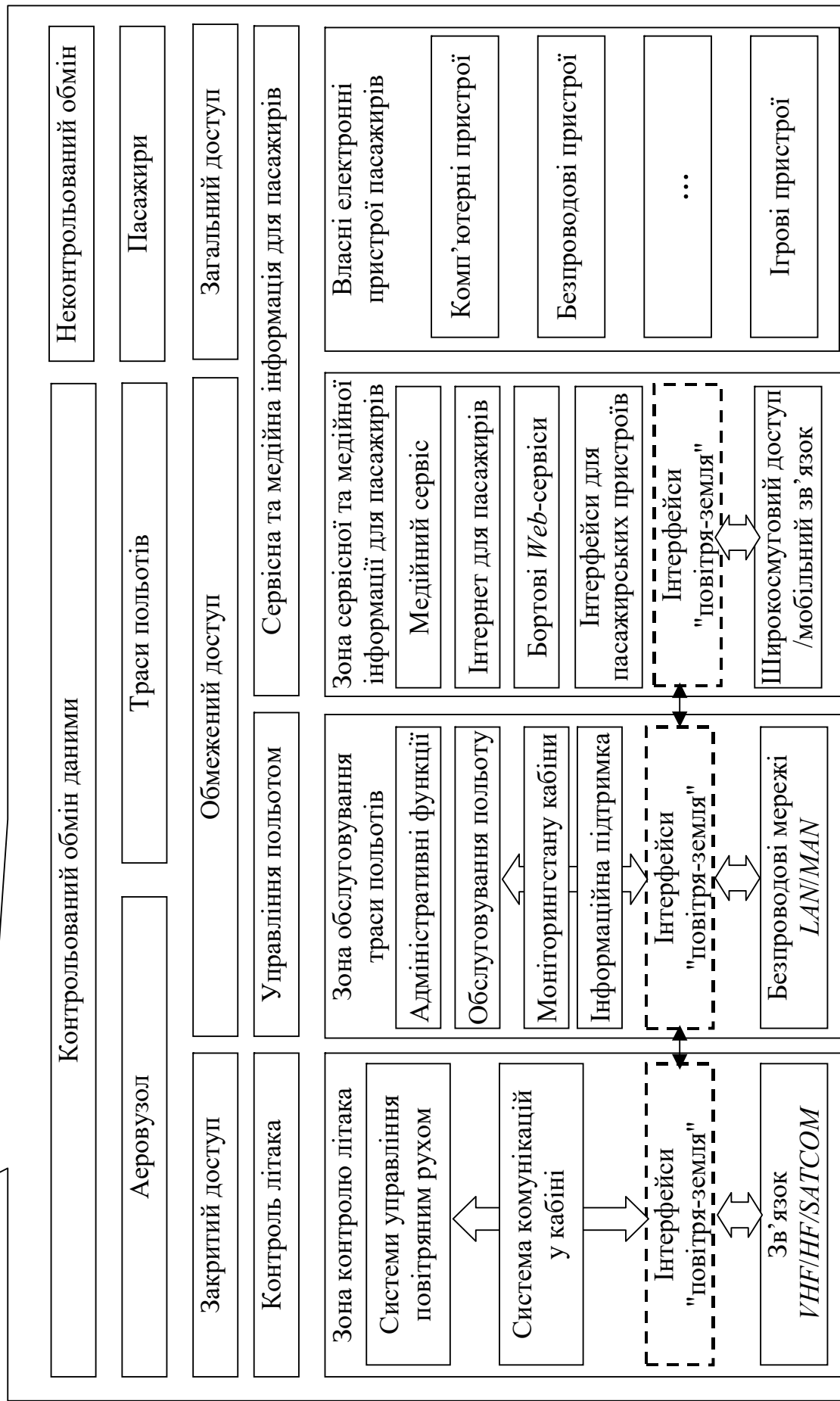


Рис. 4.5. Типова архітектура інформаційно-комунікаційної системи літака

Розроблені принципи побудови даної інформаційно-обчислювальної підсистеми є досить універсальними. Завдяки широким можливостям і простоті зміни режимів роботи комутаційного обладнання забезпечується швидка і ефективна адаптація логічної структури обчислювальних мереж підсистеми.

Отже, запропоновані структури корпоративної мережі і локальних обчислювальних мереж для систем критичного застосування (рис. 4.4–4.5) можуть служити в основі побудови інформаційно-обчислювальної підсистеми АС ОрПР, тобто розгалуженої аеровузлової мережі з автономними супутниковими та авіаційними бортовими мережними сегментами.

## Висновки до розділу 4

1. Головною задачею аеровузлової інформаційно-обчислювальної мережі є надання можливості забезпечення функціонування системи ОрПР у реальному часі за рахунок сумісного використання ресурсів. Для того, щоб мережа успішно справлялася з цією задачею, вона повинна відповідати вимогам по продуктивності, надійності тощо. Ці вимоги конкретизовано стосовно задачі забезпечення роботи АС ОрПР як системи критичного застосування при великих перепадах інтенсивності повітряного руху та, відповідно, мережного трафіку у різних сегментах мережі.

2. За результатами аналізу методів обміну різнорідним та різнопріоритетним мережним трафіком встановлені приблизні співвідношення міжсегментного та внутрішньосегментного трафіку аеровузлової мережі при штатному режимі та в екстремальних ситуаціях. Відповідно до цих умов обґрунтований вибір принципу побудови та типу топології, що застосовується.

3. У рамках моделі *OSI* побудовано багаторівневу структуру мережі, де кожен рівень обслуговується найближчим нижнім рівнем (є клієнтом нижнього рівня), а сам, зі свого боку, обслуговує найближчий верхній рівень (є, відповідно, сервером для верхнього рівня). При такій організації мережі контроль, управління і модернізація є децентралізованими. Всі ці процедури спрощуються, а ефективність їх виконання і надійність системи в цілому підвищуються.

4. Для забезпечення надійності та відмовостійкості аеровузлової мережі, що є вкрай важливим для підтримки потрібного рівня безпеки польотів, розроблено метод діагностування автономних сегментів аеровузлової мережі. Завдяки цьому забезпечується потрібна живучість мережі як складної системи, зменшуються інтервали між моментом виникнення несправності та моментом її виявлення завдяки регулярному діагностуванню модулів.

5. Модифіковано структуру супутниково-орієнтованих та супутниково-незалежних рівнів протоколу обміну даними з широкосмуговою супутниковою мультимедійною мережею. Модифікація заключається в додаванні стеку протоколів доступу до мультимедійних додатків. Організація доступу базується

на застосуванні протоколів програмного комутатора *Softswitch* та підсистеми *IMS* – *IP multimedia Subsystem*.

6. Для підвищення захищеності мережі від несанкціонованого втручання введено супутниково-незалежні функції адаптації каналів обміну даними на основі протоколів *IPv4/IPv6*. Крім того пропоновані рекомендації із застосування незалежних протоколів обміну даними у каналах:

- закритого доступу;
- обмеженого доступу;
- загального доступу.

Таке застосування протоколів обміну даними підвищує безпеку інформаційно-комунікаційної системи літака та запобігає спробам несанкціонованого втручання у підсистему управління.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, відповідно до поставленої мети, виконано теоретичне обґрунтування та одержано нове вирішення актуальної наукової задачі: розробка та вдосконалення методів побудови автономних сегментів авіаційної інформаційно-обчислювальної системи для роботи в умовах значних коливань навантаження та виникнення екстремальних ситуацій в аеровузлових мережах складеного типу з високим ступенем гетерогенності.

Основні наукові та практичні результати дисертаційних досліджень полягають у наступному.

1. Проведений аналіз методів обміну різнорідним та різнопriorитетним мережним трафіком та встановлені приблизні співвідношення міжсегментного та внутрішньо сегментного трафіку аеровузлової мережі при штатному режимі та в екстремальних ситуаціях. Відповідно до цих умов обґрунтований вибір принципу побудови та типу топології мережі, що застосовується.

2. Удосконалено метод покрокової регресії стосовно мережі зі змінною структурою та розроблено алгоритм обчислення множинних коефіцієнтів кореляції, за якими розраховуються множинні коефіцієнти регресії для передбачення та встановлення поточних ключових показників ефективності авіаційної бортової мережі як невід'ємної складової частини аеровузлової інформаційно-обчислювальної системи.

3. Удосконалено метод визначення ключових показників ефективності (КПЕ) та оцінки їх статистичного взаємозв'язку в мережних структурах різних рівнів ієрархії, який, на відміну від існуючих, дозволяє обирати поточні пріоритети КПЕ. Це дає можливість підвищення швидкодії мережі аж до роботи в реальному часі при значних коливаннях інтенсивності трафіку та обсягів обчислень.

4. Вперше розроблено моделі управління структурою мереж та метод динамічної реконфігурації мережі з мобільними абонентами. Завдяки цьому прискорюється процес обміну даними між автономними сегментами мережі за умов дефіциту часу, мережних та обчислювальних ресурсів.

5. Знайшли подальший розвиток методи забезпечення потрібної якості сервісу (*QoS*), зокрема, якості передачі різнорідного трафіку, шляхом поточного узгодження ключових показників якості *QoS* та самодіагностування автономних мережних сегментів, що, за експертними оцінками, дає можливість підвищити надійність та відмовостійкість мережі приблизно до 10%. Це дозволяє, з одного боку, знизити затримки доставки даних в складених гетерогенних мережах критичного застосування, а з іншого боку – забезпечити їх доставку за умов великих затримок на розповсюдження сигналів – носіїв користувальницької інформації.

6. Розроблений та обґрунтований метод діагностування автономних сегментів аеровузлової мережі, що сприяє підвищенню надійності та забезпечує відмовостійкість аеровузлової мережі.

7. Модифіковано структуру супутниково-орієнтованих та супутниково-незалежних рівнів протоколу обміну даними з широкосмуговою супутниковою мультимедійною мережею за рахунок додавання стеку протоколів доступу до мультимедійних додатків, що забезпечує підвищення захищеності мережі від несанкціонованого втручання до закритих каналів обміну польотними даними.

8. Запропоновані структури сегментів аеровузлової мережі і локальних обчислювальних мереж для систем критичного застосування. Надані рекомендації з вибору параметрів мережних вузлів (зокрема, розміру буферної пам'яті) для побудови розгалуженої аеровузлової мережі з автономними супутниковими та авіаційними бортовими мережними сегментами.



**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. Москва: Наука, 1981. 488 с.
2. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.Л. Введение в системный анализ. Москва: Высшая школа, 1989. 364 с.
3. Kreher R. UMTS Performance Measurement: A Practical Guide to KPIs for the UTRAN Environment. John Wiley & Sons, Ltd, 2006. 227 pp.
4. Панов М. М. Оценка деятельности и система управления компанией на основе KPI. Москва: Инфра-М, 2012. 255 с.
5. Водопьянов С.В. Ключевые показатели управления качеством сервиса в информационно-вычислительной сети аэроузла. *Наукові записки УНДІЗ: Науково-виробничий збірник*. Київ, 2012. №3(23). С. 71-75.
6. Амирханов Э.А., Водопьянов С.В., Заруцкий В.А., Зубарева Е.А. Применение системы ключевых показателей эффективности для оценивания параметров компьютерных сетей. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. Київ, 2012. Т.10. №4. С. 82-86.
7. Konin V.V., Sushich O.P., Babeychuk D., Vodopianov S.V. Computer-aided system of navigation systems accessibility. «*Aviation in XXI-st century*»: Proceedings of the second world congress. Kyiv, Ukraine, September 19-21, 2005. Kyiv, 2005. P. 3.57 - 3.61.
8. Якість та ефективність системи організації повітряного руху / І.С. Биковцев та ін. Київ: ДП ОПР, 2010. 316 с.
9. Дрововозов В.И. Методы и средства построения высокопроизводительных вычислительных систем для задач управления воздушным движением и навигации: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.13. Київ, 2005. 149 с.
10. 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.

11. Maral G. Satellite communications systems: Systems, Techniques and Technology: 5th ed. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2009. 742 PP.
12. Cheng Y.A., Kai J. Xu, Anju Pillai, Prashant Pillai, Yim Fun Hu, Muhammad Ali and Adeel Ahmed. Realization of Integrated Satellite-Terrestrial Communication Networks for Aeronautical Services via Joint Radio Resource Management. *5th International Conference on Personal Satellite Services (PSATS 2013)*. Toulouse, France, June 27–28, 2013. 211 PP.
13. Vodopianov S.V. Optimisation of Network Structures of Air Traffic Control Systems. «*Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application*»: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference (ASCN – 2013). Lviv, Ukraine, September 16 –18, 2013. Lviv, 2013. PP. 84 - 85.
14. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 944 с.
15. Tanenbaum, A.S. Computer Networks, 5th Ed. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 PP.
16. Столлингс В. Современные компьютерные сети. 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 783 с.
17. Кризис управления небом. *Авиатранспортное обозрение*. 1999. № 23. С. 18 - 21.
18. Виноградов Н.А. Анализ потенциальных характеристик устройств коммутации и управления сетями новых поколений. *Зв'язок*, 2004. № 4. С. 10 - 17.
19. Автоматизация процессов управления воздушным движением: учеб. пособие для вузов гражд. авиации. / Г.А. Крыжановский и др. Москва: Транспорт, 1981. 399 с.
20. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением: Справочник. / под ред. А.А. Кузнецова Москва: Транспорт, 1982. 280 с.
21. Автоматизированное управление движением авиационного транспорта. / под ред. Г. А. Крыжановского. Москва: Транспорт, 1999. 319 с.

22. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / Р.М. Ахмедов и др.; под ред. С.Г. Пятко и А.И. Красова. СПб.: Политехника, 2004. 446 с.
23. Виноградов Н.А., Дрововозов В.И., Лесная Н.Н., Зембицкая А.С. Анализ нагрузки на сети передачи данных в системах критичного применения. *Зв'язок*. 2006. № 1 (61). С. 9 - 12.
24. Жуков І.А., Виноградов М.А., Дрововозов В.І., Халімон Н.Ф. Основи теорії мереж передачі та розподілу даних: навч.посіб. Київ: НАУ, 2006. 272 с.
25. Nick Vinogradov, Vladimir Drovovozov, Alina Savchenko, Inna Kudzinovskaya. An analysis of singularity of the matrices of priorities and sensibility of decisions as key performance indicators of the analytic hierarchies process. *Journal of Qafqaz University (Mathematics and Computer Sciences)*. 2011. Nr. 32. PP. 40 - 48.
26. Холявкина Т.В. Распределенная компьютеризованная система мониторинга полетной информации: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.05. Київ, 2011. 126 с.
27. Андрусак А.І., Дем'янчук В.С., Юр'єв Ю.М. Мережа авіаційного електрзов'язку. Київ: НАУ, 2001. 448 с.
28. Personal Satellite Services. *Third International ICST Conference, PSATS 2011*. Malaga, Spain, February 17-18, 2011. 426 PP.
29. Personal Satellite Services. *4th International ICST Conference, PSATS 2012*. Bradford, UK, March 22-23, 2012. 210 PP.
30. Водоп'янов С.В. Вплив параметрів комунікаційної мережі аеровузла на ефективність організації повітряного руху. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2015. № 818. С. 110-119.
31. Personal Satellite Services. *5th International ICST Conference, PSATS 2013*. Toulouse, France, June 27-28, 2013. 211 PP.
32. Вдовиченко В.Н. Повышение эффективности информационного обмена «воздушное судно-диспетчер» для решения задач управления воздушным движением: дисс. ...канд. техн. наук: 05.22.13. Москва, 2002. 240 с.

33. Леонов Ф.Е. Разработка методов оценки эффективности жизненного цикла технических средств УВД на этапе эксплуатации: дисс. ...канд. техн. наук: 05.22.13. СПб., 2004. 141 с.
34. Игнатенко О. А. Методы повышения качества функционирования средств автоматизации управления воздушным движением на протяжении жизненного цикла: дисс. ...канд. техн. наук: 05.22.13. Москва, 2005. 206 с.
35. Морозов А.Н. Моделирование авиационных наземных фиксированных сетей передачи данных для организации воздушного движения в условиях дефицита исходных данных: дисс. ... канд. физ-мат. наук: 05.13.18. Москва, 2006. 225 с.
36. Гоцуцов С. Ю. Совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением на основе технологий коммутации пакетов: дисс....канд. техн. наук: 05.22.13. Москва, 2007. 211 с.
37. Акиншин Р.Н. Обеспечение информационной защищенности автоматизированных систем управления воздушным движением в условиях роста интенсивности полетов: дисс. ...докт. техн. наук: 05.22.13. Москва, 2009. 313 с.
38. Вычужанин В.Б. Повышение эффективности систем УВД с автоматическим зависимым наблюдением путем совершенствования методов и средств передачи и отображения навигационной информации: дисс. ...канд. техн. наук: 05.22.13. Москва, 2009. 138 с.
39. Thomas W.M. Fair allocation methods in air traffic management: Ph.D. Thesis. Volsen. College Park, 2002. 193 PP.
40. Водопьянов С.В., Харлай Л.О., Толстікова О.В., Боровик В.М. Управление безопасностью бортовой локальной сети в информационно-вычислительной системе аэроузла. *Захист інформації*. 2015. Т. 17. № 4. С. 292 - 297.
41. Quan Chuanwen. Integrated Modeling of Air Traffic, Aviation Weather, and Communication Systems: Ph. D. Thesis Blacksburg, 2007. 300 PP.

42. Водопьянов С.В., Дрововозов В.И., Толстикова Е.В. Защита авиационных бортовых сетей от атак методами теории конфликта с применением медовых ловушек. *Захист інформації*. 2015. Том 17. №3. С. 255- 263.
43. Haque Jamal. An OFDM Based Aeronautical Communication System: Ph. D. Thesis. Tampa, FL, 2011. 123 PP.
44. Ho Das Tu. Studies on Multiple Access for Aeronautical Wireless Network: Ph.D. Thesis. Waseda, 2011. 140 PP.
45. Водоп'янов С.В., Дрововозов В.І., Журавель Н.В. Моделі й методи оцінювання характеристик та управління автономними сегментами інформаційно-керуючої системи крупного аеровузла. *Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. Київ, 2016. Вип.1 (53). С. 27 - 33.*
46. Neji Najett. Radio-Frequency Compatibility of the Future Aeronautical Communication System in the L-Band: Ph.D. Thesis. Paris, 2011. 146 PP.
47. Ayaz Serkan. Mobility and Radio Resource Management in Future Aeronautical Mobile Networks: Ph.D. Thesis. Erlangen, 2013. 122 PP.
48. Abdulkarim Haider. Comparison of Proposals for the Future Aeronautical Communication System LDACS: Master Thesis. Ilmenau, 2012. 97 PP.
49. Водопьянов С.В. Оптимизация параметров системы организации воздушного движения. *«Интеллектуальні технології лінгвістичного аналізу»*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 23 – 24 жовтня 2012 р. Київ, 2012. С. 38 - 39.
50. Hulda Ástþórsdóttir. Performance Metrics in Air Traffic Management Systems: Master of Sci. Thesis. Reykjavik, 2013. 164 PP.
51. Солонин В. Технологическая авиасвязь: новые тенденции. URL: <http://www.cnews.ru/reviews/free/transport2006/articles/aviacommunication>.
52. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике. Москва: Финансы и статистика, 1982. 198 с.
53. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва: Наука, 1979. 288 с.

54. Водопьянов С.В. Стабилизация процесса выбора оптимальной топологии сети методом анализа иерархий. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2013)*: матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 11 – 13 червня 2013 р. Київ, 2013. С. 24.
55. Водоп'янов С.В. Зв'язок параметрів функціонування інформаційно-керуючих систем аеровузлів та ефективності авіаційних комп'ютерних і телекомунікаційних мереж. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2016)*: матеріали IX Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 21 – 23 квітня 2016 р. Київ, 2016. С. 17-18.
56. Водопьянов С.В., Заруцкий В.А., Дрововозов В.И. Перспективы развития кооперативного подхода в аэронавигационных системах крупных аэроузлов. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2017)*: матеріали X міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 20 – 22 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 19-20.
57. Resende M. Efficiency measurement and regulation in US telecommunications: A robustness analysis. *International Journal of Production Economics*. Issue 1, July 2008. Volume 114. PP. 205-218.
58. Youssef M., Abdallah M., Agrawala A. Multivariate analysis for probabilistic WLAN location determination systems, *Mobile and Ubiquitous Systems. Networking and Services: The Second Annual International Conference*, 17-21 July 2005. PP. 353-362.
59. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. / пер. с англ. Москва: Мир, 1974. 463 с.
60. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. Москва: Энергоиздат, 1982. 320 с.
61. Ахиезер А.И. Лекции по теории аппроксимации. Москва: ОГИЗ ГОСТХИЗДАТ, 1947. 323 с.
62. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. Москва: Наука, 1977. 456 с.
63. Вишне夫斯基 В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WIMAX: Путь к 4G. Москва: Техносфера, 2009. 472 с.

64. Сборник научных программ на Фортране / пер. с англ. Москва: Статистика, 1974. 316 с.
65. Водопьянов С.В., Дровозов В.И. Применение моделей трафика данных для мониторинга компьютерных сетей системы управления воздушным движением. *Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. Київ, 2012. Вип. 1(37). С. 30 - 35.*
66. Водопьянов С.В. Алгоритм выбора оптимальной топологии компьютерной сети для автоматизированной системы управления воздушным движением. *Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. Київ, 2012. Вип. 3(39). С. 35 - 38.*
67. Водопьянов С.В., Кренц П.А. Оценка надежности обмена данными в перспективной аэроузловой информационно-телекоммуникационной сети. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. Київ, 2013. № 4. С. 79 - 85.*
68. Золотухин В.В., Исаев В.К., Давидсон Б.Х. Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением. *ТРУДЫ МФТИ. Москва, 2009. Том 1. № 3. С. 94 - 114.*
69. Барабаш О.В., Чмут О.В., Водоп'янов С.В. Методика самодіагностування обчислювальних систем на основі гнучких структур перевірочних зв'язків. *Проблеми транспорту: зб. наук. пр. Київ, 2004. Вип. 1. С. 62 - 68.*
70. Satellite communications systems. Gérard Maral. Michel Bousquet: 5th ed. John Wiley & Sons Ltd. 2009. 713 pp.
71. Mahmoud M.S., Christophe Guerber, Nicolas Larrieu, Alain Pirovano, José Radzik Aeronautical Air-Ground Data Link Communications. ISTE Ltd, London, 2014. 127 pp.
72. ICAO. Global Operational Data Link Document (GOLD): 2nd ed.. 26 April, 2013.
73. Распространение ультракоротких волн / под ред. Б.А. Шиллерова. Москва: Советское радио, 1954. 710с.
74. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. Москва: Советское радио, 1962. 480с.

75. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. Москва: Техносфера, 2005. 592 с.
76. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. Москва: Наука, 1987. 336 с.
77. Вентцель Е.С. Исследование операций. Москва: Сов. радио, 1972. 552 с.
78. Basharin G.P., Naumov V.A. Losungsmethoden fur lineare algebraische Gleichungssysteme stationarer charakteristiken. *Handbuch der Bedienungstheorie*. Berlin, Akademie-Verlag, 1983. PP. 387-409.
79. Basharin G.P., Bocharov P.P., Kokotuschkin V.A., Naumov V.A. Formeln Systeme mit endlich vielen Warteplätzen. *Handbuch der Bedienungstheorie*. Berlin, Akademie-Verlag, 1984. PP. 223-255.
80. Башарин Г.П., Клапоушак С.Н., Митькина Н.В. Математическая модель адаптивной многоскоростной системы с эластичным трафиком. *Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика»*. Москва: РУДН, 2008. № 3. С.58-66.
81. Башарин Г.П., Гайдамака Ю.В., Самуйлов К.Е., Яркина Н.В. Модели для анализа качества обслуживания в сетях связи следующего поколения: уч. пособие. Москва: ИПК РУДН, 2008. 111 с.
82. Lindley D. V. The theory of queues with a single server. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. April 1952. Volume 48. PP. 277-289.
83. Kiefer J., Wolfowitz J. On the theory of queues with many servers. *Transactions of the American Mathematical Society*. 1955. №78. PP. 1-18.
84. Karpelevich F.I., Kelbert M.Ya., Suhov Yu.M. Higher-order Lindley equations. *Stochastic Processes and their Applications*. 1994. № 53. PP. 65-96.
85. Beznea L., Deaconu M., Lupas O. Branching processes for the fragmentation equation. *Stochastic Processes and their Applications*. 2015. № 125. PP. 1861-1885.



86. Виноградов Н.А., Дровозов В.И., Лесная Н.Н., Зембицкая А.С. Анализ нагрузки на сети передачи данных в системах критичного применения. *Зв'язок*. 2006. №1. С.9 - 12.
87. Виноградов Н.А. Анализ потенциальных характеристик устройств коммутации и управления сетями новых поколений. *Зв'язок*. 2004. №4. С. 10 - 17.
88. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети: 5-е изд. СПб: Питер, 2012. 960 с.
89. Проект по избавлению Linux-ядра от излишней сетевой буферизации URL: <http://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=29734> (дата звернення: 10.12.2017).
90. Airlines Electronic Engineering Committee (AEEC). ARINC Report 811: *Commercial Aircraft Information Security Concepts of Operation and Process Framework*. December 2005.
91. Немет Э., Снайдер Г., Хейн Т., Уэйли Б. Unix и Linux: руководство системного администратора; 4-е изд. / Пер. с англ. Москва: ООО "И.Д. Вильямс", 2012. 1312 с.
92. Крук Б.И., Попантопуло В.Н., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети: учебное пособие: в 3 томах. Том 1. Современные технологии / под ред. проф. В.П. Шувалова: изд. 3-е. Москва: Горячая линия –Телеком, 2003. 647 с.
93. Бестугин А.Р., Богданова А.Ф., Стогов Г.В. Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей. СПб.: Политехника, 2003. 174 с.
94. Бигелоу С. Сети: поиск неисправностей, поддержка и восстановление / Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1200 с.
95. Горбенко А.В. Методи та інструментальні засоби розробки комп'ютерних мереж інформаційно-управляючих систем критичного застосування: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Харків, 2004. 20 с.
96. Таненбаум Э. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. СПб.: Питер, 2003. 877 с.

97. Басс Л., Клементс П., Кацман Р. Архитектура программного обеспечения на практике: 2-е изд. СПб.: Питер, 2006. 575 с.
98. Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера: 6-е изд. СПб.: Питер, 2013. 816 с.
99. Машков О. А. Самодиагностирование бортовых вычислительных систем. Киев: КВВАИУ, 1989. 84 с.
100. Машков О.А., Барабаш О.В. Организация самоконтроля многомодульных систем на основе оптимальных структур проверочных связей. *Электронное моделирование*. 1995. Т. 17. № 3. С. 68 - 75.
101. Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. Москва: Наука, 1977. 416 с.
102. Preparata F.P., Metze G., Chien R.T. On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems. *IEEE Transactions on electronic computers*. Dec. 1967. Vol. EC-16. No.6. PP. 848 - 854.
103. Moon T.K. Error correcting coding: mathematical methods and algorithms. *John Wiley and Sons*. Hoboken, New Jersey, 2005. 804 p.
104. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. Москва: Наука, 1966. 576 с.
105. Уилкинсон Дж. Х. Алгебраическая проблема собственных значений: пер. с англ. Москва: Наука, 1970. 564 с.
106. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. Москва: Техносфера, 2003. 512 с.
107. Гольдштейн Б.С., Орлов О.П., Ошев А.Т., Соколов Н.А. Эволюция услуг в сетях следующего поколения. *Вестник связи*. 2003. №7. С. 34 - 41.
108. Унгуриян С.Г., Маркович Е.Д., Волевач А.И. Анализ и моделирование систем УВД. Москва: Транспорт, 1980. 205 с.
109. Анодина Т.Г., Мокшанов В.И. Моделирование процессов в системе управления воздушным движением. Москва: Радио и связь, 1993. 264 с.
110. ETSI TR 101 984 V1.2.1 (2007-12) Broadband Satellite Multimedia (BSM); Services and architectures. 39 PP. URL:

- [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/101900\\_101999/101984/01.02.01\\_60/tr\\_101984v010201p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101900_101999/101984/01.02.01_60/tr_101984v010201p.pdf) (дата звернення: 18.10.2017).
111. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. SOFTSWITCH. СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2006. 368 с.
  112. Гольдштейн А.Б., Атцик А.А. Реквием по Softswitch. *Мир связи*. 2008. С.39 - 43.
  113. Водопьянов С.В. Корреляционно-регрессионный анализ ключевых параметров эффективности коммуникационной сети аэроузла в задаче организации воздушного движения. *Наукові записки УНДІЗ: Науково-виробничий збірник*. Київ: УНДІЗ, 2015. №4. С. 55 - 66.
  114. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. Москва: Мир, 1980. 456 с.
  115. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. Москва: Финансы и статистика, 1981. 302 с.
  116. Waitakere City Council Strategic Group. Key performance indicator council services survey. URL: <http://www.waitakere.govt.nz/AbtCnl/kpisurveys.asp>. (дата звернення: 15.01.2016).
  117. Review of the different key performance indicators. *Tenth session of the statistics division*. ICAO. Montréal, 23 – 27 Nov. 2009. 16 pp.
  118. List of Key Performance Indicators for Airlines. URL: <http://asms-pro.com/Modules/SafetyAssurance/ListofAirlineKeyPerformanceIndicators.aspx> (дата звернення: 25.07.2015).
  119. How Are you Measuring Up? Tracking the Right KPI's for Aviation – published 18 Feb 2013. URL: <http://www.socialbakers.com/blog/1413-how-are-you-measuring-up-tracking-the-right-kpi-s-for-aviation> (дата звернення: 05.09.2016).
  120. What all are the KPIs that we can consider for the aviation/airline industry? – Written 11 Jul 2014. URL: [\\_https://www.quora.com/What-all-are-the-KPIs-that-we-can-consider-for-the-aviation-airline-industry](https://www.quora.com/What-all-are-the-KPIs-that-we-can-consider-for-the-aviation-airline-industry) (дата звернення: 17.03.2016).

121. Виноградов Н.А., Данилина Г.В., Домарев Д.В., Милокум Я.В. Управление псевдосервисами в защищенных информационных системах на основе теории конфликта. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2014. №6(34). С. 5 - 12.
122. Водопьянов С.В., Мартынова О.П. Автоматизированное управление компьютерной сетью системой с гибридной многокомпонентной структурой. *Авіа-2004*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 26-28 квітня 2004 р. Київ, 2004. С. 13.53 - 13.56.
123. Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. Москва: Наука, 1977. 416 с.
124. Ланкастер П. Теория матриц. Москва: Наука, 1978. 280 с.

**Додаток А. Акти про впровадження результатів досліджень**

Затверджую  
Заступник директора з  
підтримки виробничої діяльності  
Державного підприємства обслуговування  
повітряного руху України "Украерорух"



Мельніков В.А.

«17» квітня 2018 р.

АКТ

**ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
ВОДОП'ЯНОВА СЕРГІЯ В'ЯЧЕСЛАВОВИЧА  
У ДЕРЖАВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ  
ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО РУХУ УКРАЇНИ (ДП ОПР "УКРАЕРОРУХ")**

Комісія у наступному складі: голова комісії – заступник директора з підтримки виробничої діяльності Державного підприємства обслуговування повітряного руху України "Украерорух" Мельніков В.А.; члени комісії – начальник служби інформаційних технологій Кузнецов Я.В., начальник відділу програмного забезпечення служби інформаційних технологій Сергієнко А.В. склали даний акт про те, що результати кандидатської дисертаційної роботи Водоп'янова Сергія В'ячеславовича «Методи побудови автономних комп'ютерних сегментів аеровузлової мережі» впроваджені у Державному підприємстві обслуговування повітряного руху України "Украерорух".

Цим актом підтверджується, що матеріали дисертаційної роботи Водоп'янова С.В., в якій проведені дослідження, пов'язані з розробкою методів побудови високопродуктивних інформаційно-обчислювальних систем реального часу для роботи в умовах критичного застосування, значних коливань навантаження та виникнення екстремальних ситуацій в аеровузлових мережах складеного типу з високим ступенем гетерогенності, є актуальними. Отримані наукові результати базуються на сучасних інтелектуальних технологіях обробки інформації. Пропоновані у дисертаційній роботі Водоп'янова С.В. методи визначення ключових показників ефективності та оцінки їх статистичного взаємозв'язку в мережних структурах різних рівнів ієрархії та методи розподілу мережних ресурсів можуть успішно використовуватися для аналізу та моніторингу трафіку в реальному часі, тому їх застосування у комп'ютерних мережах систем обслуговування повітряного руху є доцільними.

Результати дисертаційної роботи представляють практичний інтерес і можуть успішно застосовуватися в інформаційно-обчислювальних системах розкладу літаків та планування польотів в управляючих системах з високим ступенем гетерогенності, і тому використовуються у технологічних процесах Державного підприємства обслуговування повітряного руху України "Украерорух".

Члени комісії:

Кузнецов Я.В.

Сергієнко А.В.

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи  
Національного авіаційного університету

“ ” 2017 р.



## АКТ

впровадження у навчальний процес Національного авіаційного університету результатів дисертаційної роботи **Водоп'янова Сергія В'ячеславовича** «Методи побудови автономних комп'ютерних сегментів аеровузлової мережі», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Комісія у наступному складі: голова комісії – професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, кандидат технічних наук, доцент Гузій Миколайович, члени комісії: кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, доцент Андреев Володимир Ілліч, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, доцент Проценко Микола Михайлович склали даний акт про те, що результати кандидатської дисертаційної роботи Водоп'янова Сергія В'ячеславовича «Методи побудови автономних комп'ютерних сегментів аеровузлової мережі» впроваджені у навчальний процес та використовуються на кафедрі комп'ютерних систем та мереж з 2017-2018 н. р. при викладанні дисциплін «Проектування та дослідження комп'ютерних мереж», «Мережні інформаційні технології» і «Гарантоздатні комп'ютерні системи та технології», а також у магістерських атестаційних роботах та дипломному проектуванні.

| Назва розділів дисертаційної роботи, що впроваджуються                                     | Форма впровадження   | Результати впровадження  |
|--|--|--|
| 1  | 2  | 3  |
| 1. Аналітичний огляд і постановка задачі дослідження                                       | Лекції, магістерські атестаційні роботи та дипломне проектування   | Дає наочне представлення методів організації та забезпечення якості обслуговування в перспективних інформаційно-комунікаційних та комп'ютерних мережах цивільної авіації                                     |
| 2. Модель ієрархічної багаторівневої структури аеровузлової мережі                         | Лекції, магістерські атестаційні роботи та дипломне проектування   | Модель ієрархічної багаторівневої структури аеровузлової мережі при побудові інтегрованої мережі аеровузла дозволяє забезпечувати гарантовану якість сервісу в комп'ютерних системах критичного застосування |
| 3. Методи оцінювання та забезпечення ефективності автономних сегментів аеровузлової мережі | Лекції, лабораторні роботи, магістерські атестаційні роботи, дипломне проектування, розрахунково-графічні роботи | Запропоновані методи оцінювання дають можливість підвищити надійність та відмовостійкість мережі та знизити затримки доставки даних, особливо у нештатних ситуаціях  |

Голова комісії:  
професор кафедри, кандидат технічних наук,  
доцент



М. М. Гузій

Члени комісії:  
кандидат технічних наук, доцент



В. І. Андреев

кандидат технічних наук, доцент



М. М. Проценко

**Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.**

**Список публікацій здобувача**

1. Водоп'янов С.В. Вплив параметрів комунікаційної мережі аероузла на ефективність організації повітряного руху. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2015. № 818. С. 110-119.
2. Водопьянов С.В., Дрововозов В.И. Применение моделей трафика данных для мониторинга компьютерных сетей системы управления воздушным движением. *Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр.* Київ, 2012. Вип. 1(37). С. 30 - 35.
3. Водопьянов С.В. Ключевые показатели управления качеством сервиса в информационно-вычислительной сети аэроузла. *Наукові записки УНДІЗ: Науково-виробничий збірник*. Київ, 2012. №3(23). С. 71-75.
4. Водопьянов С.В., Харлай Л.О., Толстікова О.В., Боровик В.М. Управление безопасностью бортовой локальной сети в информационно-вычислительной системе аэроузла. *Захист інформації*. 2015. Т. 17. № 4. С. 292 - 297.
5. Водопьянов С.В., Кренц П.А. Оценка надежности обмена данными в перспективной аэроузловой информационно-телекоммуникационной сети. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. Київ, 2013. № 4. С. 79-85.
6. Водопьянов С.В., Дрововозов В.И., Толстикова Е.В. Защита авиационных бортовых сетей от атак методами теории конфликта с применением медовых ловушек. *Захист інформації*. 2015. Т. 17. №3. С. 255 - 263.
7. Амирханов Э.А., Водопьянов С.В., Заруцкий В.А., Зубарева Е.А. Применение системы ключевых показателей эффективности для оценивания параметров компьютерных сетей. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. Київ, 2012. Т.10. №4. С. 82-86.
8. Водопьянов С.В. Алгоритм выбора оптимальной топологии компьютерной сети для автоматизированной системы управления воздушным движением.



*Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. пр. Київ, 2012. Вип. 3(39). С. 35 - 38.

9. Водопьянов С.В. Корреляционно-регрессионный анализ ключевых параметров эффективности коммуникационной сети аэроузла в задаче организации воздушного движения. *Наукові записки УНДІЗ*: Науково-виробничий збірник. Київ: УНДІЗ, 2015. №4. С. 55 - 66.

10. Водоп'янов С.В., Дрововозов В.І., Журавель Н.В. Моделі й методи оцінювання характеристик та управління автономними сегментами інформаційно-керуючої системи крупного аероузла. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. пр. Київ, 2016. Вип.1 (53). С. 27 - 33.

11. Водопьянов С.В., Мартынова О.П. Автоматизированное управление компьютерной сетью системой с гибридной многокомпонентной структурой. *Авиа-2004*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 26-28 квітня 2004 р. Київ, 2004. С. 13.53 - 13.56.

12. Konin V.V., Sushich O.P., Babeychuk D., Vodopianov S.V. Computer-aided system of navigation systems accessibility. «*Aviation in XXI-st century*»: Proceedings of the second world congress. Kyiv, Ukraine, September 19-21, 2005. Kyiv, 2005. PP. 3.57 - 3.61.

13. Vodopianov S.V. Optimisation of Network Structures of Air Traffic Control Systems. «*Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application*»: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference (ASCN – 2013). Lviv, Ukraine, September 16 –18, 2013. Lviv, 2013. PP. 84 - 85.

14. Водопьянов С.В. Оптимизация параметров системы организации воздушного движения. «*Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу*»: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 23 – 24 жовтня 2012 р. Київ, 2012. С. 38 - 39.

15. Водопьянов С.В. Стабилизация процесса выбора оптимальной топологии сети методом анализа иерархий. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2013)*: матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 11 – 13 червня 2013 р. Київ, 2013. С. 24.

16. Водоп'янов С.В. Зв'язок параметрів функціонування інформаційно-керуючих систем аеровузлів та ефективності авіаційних комп'ютерних і телекомунікаційних мереж. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2016)*: матеріали ІХ Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 21 – 23 квітня 2016 р. Київ, 2016. С. 17-18.

17. Водоп'янов С.В., Заруцкий В.А., Дровозов В.И. Перспективы развития кооперативного подхода в аэронавигационных системах крупных аэроузлов. *Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT – 2017)*: матеріали Х міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 20 – 22 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 19-20.

### **Відомості про апробацію результатів дисертації**

1. VI Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2004», 26-28 квітня 2004 р., м. Київ.

2. Другий всесвітній конгрес «Авіація в ХХІ столітті», 19-21 вересня 2005 р., м. Київ.

3. Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу», 23-24 жовтня 2012 р., м. Київ.

4. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології, CSNT-2013», 11-13 червня 2013 р. м. Київ.

5. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: проектування та застосування, ASCN-2013», 16-18 вересня 2013 р., м. Львів.

6. ІХ Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології, CSNT-2016», 21-23 квітня 2016 р., м. Київ.

7. Х Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології, CSNT-2017», 20-22 квітня 2017 р., м. Київ.