

DOI: 10.18372/2310-5461.67.20025
УДК 629.7.066(477)(043.2)

Г. Ф. Конахович, д-р техн. наук, проф.
Державний університет "Київський авіаційний інститут"
orcid.org/0000-0002-6636-542X
email: heorhii.konakhovych@npp.kai.edu.ua;

І. О. Козлюк, д-р техн. наук, проф.
Державний університет "Київський авіаційний інститут"
orcid.org/0009-0004-5004-7680
email: avia_ira@ukr.net;

С. С. Дорошенко, аспірант
Державний університет "Київський авіаційний інститут"
orcid.org/0009-0007-1302-3884
e-mail: semendoroshen@gmail.com

ВПРОВАДЖЕННЯ ІР-ТЕХНОЛОГІЙ В МЕРЕЖІ АВІАЦІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

Вступ

В сучасних умовах стрімкого розвитку авіаційної інфраструктури та інформаційних технологій мережевий зв'язок стає надзвичайно важливим елементом безпеки та ефективності повітряного руху.

Відновлення та модернізація авіаційної інфраструктури України після завершення війни та відкриття повітряного простору є стратегічно важливим завданням для забезпечення безпеки та ефективності польотів. Ключовим аспектом цього процесу є інтеграція сучасних технологій передачі даних в мережу авіаційного електрозв'язку (АЕЗ). Перехід до нової архітектури мережі Aeronautical Telecommunications Network over Internet Protocol Suite (ATN/IPS) є невід'ємною частиною цієї модернізації.

Мережа авіаційного телекомунікаційного зв'язку, яка базується на інтегрованій системі ATN/IPS, є основою для організації обміну оперативною інформацією між авіаційними диспетчерськими службами, авіакомпаніями та іншими учасниками повітряного простору. В цьому контексті забезпечення високої якості та захищеності передачі даних набуває критичного значення. Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) та Європейська організація з авіаційного обладнання (EUROCAE) розробили комплекс вимог і стандартів, спрямованих на підвищення надійності, безпеки та ефективності мережевих систем. Вони охоплюють широкий спектр питань: від архітектурних рішень і протоколів передачі даних до механізмів забезпечення захисту від кіберзагроз та інших видів зовнішніх впливів. Аналіз вимог ICAO та EUROCAE дозволяє не лише оцінити поточний стан мережі ATN/IPS, але й визначити напрямки для її модернізації та вдосконалення. Інтеграція традиційної авіаційної мережі

ATN з сучасними технологіями пакетної передачі даних відкриває нові можливості для оптимізації процесів управління авіаційним трафіком. Сучасні тенденції в авіації вимагають адаптації існуючих рішень до нових умов експлуатації, що обумовлює необхідність глибокого аналізу та порівняльного оцінювання вимог міжнародних організацій.

Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз останніх публікацій показує, що питання переходу на ATN/IPS в Україні недостатньо висвітлено. Існують публікації в цілому про аналіз вимог до переходу на мережі ІР, наприклад в [1] викладені всі основні положення в даному напрямку для всіх країн світу, а в роботі [2] систематизовано окремий напрям щодо захисту інформації та безпеки.

Дослідження [3] акцентує увагу на проблемах кібербезпеки авіаційного електрозв'язку, зокрема через використання застарілих протоколів та відсутність належних алгоритмів шифрування.

Автори в роботі [4] приділяють увагу системам автоматичного розпізнавання мови ASR (Automatic Speech Recognition), підкреслюючи суттєвий потенціал даних систем в напрямку зменшення робочого навантаження на диспетчерів.

Систематичний огляд бездротових мереж для авіаційного зв'язку майбутнього із акцентом на безпілотики, літаки, таксі-дрони тощо наведено в роботі [5]. Автори класифікують повітряні апарати за сценаріями використання й визначають специфічні вимоги до зв'язку для кожного класу. Наприклад, низька затримка для Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) - політ за межами видимості оператора) та висока пропускна здатність для пасажирських дронів. Розглянуто як традиційні технології (Wi-Fi, LTE, 5G), так і перспективні (NTN, mmWave, LEO-супутники), з аналізом переваг та обмежень у небі.

В роботі [6] проаналізовано продуктивність цифрової авіаційної системи зв'язку L-band Digital Aeronautical Communications System (LDACS) з протокольною архітектурою ATN/IPS для критичних повітряно-наземних додатків. Автори експериментально дослідили затримку, пропускну здатність, надійність передачі та ефективність QoS-механізмів в умовах перевантаження. Результати доводять, що система забезпечує стабільну підтримку пріоритетного трафіку навіть у стресових сценаріях, із затримками < 500 мс для high/medium traffic і масштабованістю до 300 кбіт/с у Forward Link. Робота підтверджує готовність LDACS до інтеграції у майбутню IP-мережу авіаційного зв'язку в межах стандартів ICAO.

Дослідження [7] розглядає новий підхід до забезпечення наскрізної надійності (end-to-end reliability) в аеронавігаційних системах цифрового зв'язку в контексті переходу до ATN/IPS. Автори вказують на обмеження існуючих механізмів контролю надійності, які базуються на окремих транспортних шарах (наприклад, TCP або часткові механізми повтору на каналному рівні), і пропонують інтегрований багаторівневий механізм надійності, який враховує специфіку затримки в авіаційних мережах, специфіку протоколів авіаційного зв'язку (LDACS, VDL-2) та безперервність зв'язку між повітряними та наземними сегментами.

Стаття [8] присвячена проблемам модернізації авіаційного зв'язку в контексті інтегрованих мереж space-air-ground (SAGIN). Автори досліджують використання мультиантенних систем для покращення якості передачі даних між літаками та наземними станціями у L-діапазоні, який є ключовим для авіаційного широкосмугового зв'язку (ABC). Основною метою роботи є розробка методів точного оцінювання каналів зв'язку, забезпечення надійної передачі даних у складних умовах високої інтерференції, а також реалізація просторового доступу (SDMA), що дозволяє одночасно обслуговувати кілька літаків. У статті розглядаються виклики, пов'язані з обмеженими ресурсами спектру, сильними перешкодами з боку систем DME та JTIDS, а також значним доплерівським зсувом через високу швидкість літаків. Запропоновані підходи дозволяють суттєво знизити показник бітової помилки (BER) і підвищити пропускну здатність каналу, що є критично важливим для підтримки сервісів Voice over Internet Protocol (VoIP) і Controller Pilot Data Link Communications (CPDLC) у рамках ATN/IPS. Загалом, дослідження робить вагомий внесок у розвиток сучасних авіаційних мереж зв'язку, пропонуючи практичні рішення для інтеграції IP-технологій у середовище авіаційного зв'язку майбутнього.

Презентація [9] висвітлює стратегію модернізації авіаційного зв'язку в США з акцентом на впровадження ATN/IPS. У документі окреслено покроковий план переходу до 2035 року, що передбачає підвищення пропускну здатності, надійності та безпеки зв'язку, інтеграцію сучасних IP-технологій і ефективне використання захищеного спектру. Стратегія спрямована на забезпечення сумісності з існуючими системами, підвищення економічної ефективності та глобальної взаємодії учасників авіаційної галузі. Цей план є частиною ініціативи NextGen для модернізації національної авіаційної системи США.

Документ [10] описує актуальний стан і перспективи розвитку інновацій у сфері управління повітряним рухом в Європі. Висвітлює ключові напрями досліджень і технологічних розробок, серед яких значне місце займають IP-технології зв'язку, зокрема впровадження ATN/IPS. Окрему увагу приділено забезпеченню надійності, безпеки і сумісності мереж авіаційного зв'язку з сучасними вимогами та стандартами ICAO. Звіт також окреслює плани щодо тестування та впровадження нових рішень у контексті ініціативи Single European Sky ATM Research (SESAR), спрямованої на підвищення ефективності, безпеки та екологічності повітряного руху в Європі.

Отже, в цілому, поле для аналізу та досліджень в цьому напрямку залишається відкритим.

Постановка завдання

Метою даної статті є комплексний аналіз та систематизація вимог ICAO та EUROCAE, спрямованих на забезпечення якості передачі інформації в конвергентній мережі ATN/IPS, а також розгляд практичних підходів до їх впровадження в умовах сучасної авіаційної системи в Україні. Розглядаються основні критерії якості передачі даних та особливості інтеграції мережевих технологій у глобальну інфраструктуру авіації. Отримані результати дозволять виявити ключові проблемні зони та окреслити перспективи вдосконалення мережевої архітектури з урахуванням вимог міжнародних стандартів. Таким чином, проведення аналізу вимог ICAO та EUROCAE є надзвичайно актуальним завданням, яке сприятиме підвищенню рівня безпеки та надійності авіаційного зв'язку, а також сприятиме інтеграції сучасних технологій пакетної передачі даних у традиційні авіаційні мережі України після відкриття повітряного простору.

Останні десятиліття мережі із технологією TDM (Time Division Multiplexing) були вибором за замовчуванням для голосового зв'язку управління повітряним рухом (ATM – Air Traffic Management), а для даних використовувалося послідовне з'єднання. Сьогодні ці застарілі мережі поступово припиняють своє існування і триває міграція

до протоколу передачі голосу через Інтернет VoIP і конвергентних мереж IP. Такі організації, як ICAO, EUROCAE, SESAR і програма NextGen Федерального управління цивільної авіації (FAA – Federal Aviation Administration) визначили вказівки щодо того, як реалізувати перехід до мереж на базі IP.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розглянемо детальніше основні засади та технічні вимоги щодо модернізації мереж в напрямку конвергенції ATN/IPS, які були регламентовані ICAO та EUROCAE.

Згідно документу [1] потрібно забезпечити наступне:

- використання IPv6 в якості основного мережевого протоколу для забезпечення глобальної адресації та масштабованості відповідно до [11, 12]; IPv4 допускається в деяких сценаріях, але не є основним;

- для надійного зв'язку на транспортному рівні використовується Transmission Control Protocol (TCP), відповідно до [13];

- для чутливих до затримок послуг (таких як голосовий зв'язок) використовується User Datagram Protocol UDP [14];

- для захисту та безпеки використовуються протоколи IPsec та IKEv2 (Internet Key Exchange v2) детальний аналіз вимог до захисту та безпеки наведено в роботі [2];

- голосовий зв'язок для управління повітряним рухом має бути за технологією VoIP;

- для міждомової маршрутизації використовується протокол Border Gateway Protocol (BGP) [15];

- забезпечення інтеграції з System Wide Information Management (SWIM);

- підтримка Satellite Communication (SATCOM), наземних радіоканалів та VPN (Virtual Private Network).

Для забезпечення функціонування передачі голосу на основі VoIP робочою групою WG-67 EUROCAE було підготовлено та опубліковано керуючі документи [16-20]. Зміст усіх документів базується на «Віденській угоді», яка визначає різні компоненти системи VoIP ATM та їхні взаємні інтерфейси, як показано на рис. 1.

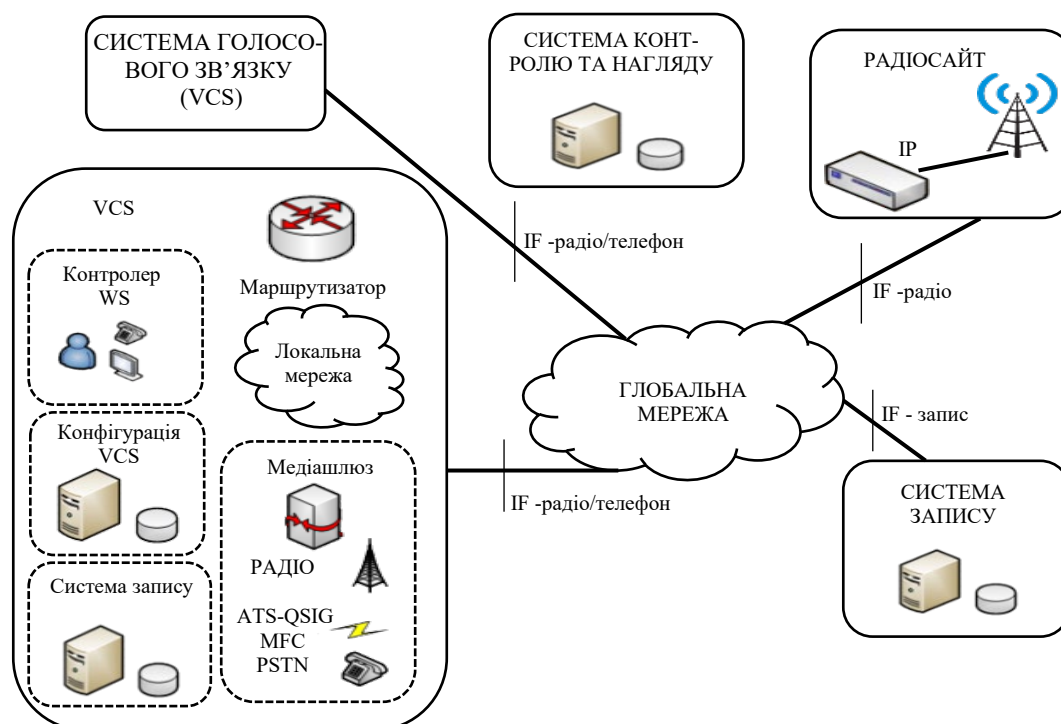


Рис. 1. Компоненти системи VoIP ATM та їхні взаємні інтерфейси відповідно до «Віденської угоди»

На кожному рівні взаємодії (радіо чи телефон) забезпечується фізичний інтерфейс, перелік функцій, взаємодія з існуючими інтерфейсами, перевірка відповідно до діючих протоколів, SIP (Session Initiation Protocol) [21], H.323 [22] тощо, моніторинг / нагляд, питання безпеки і захисту та якості обслуговування (QoS).

Аналізуючи вищезгадані документи можна систематизувати мінімальні вимоги для виробників

та користувачів VoIP-компонентів систем ATM, щоб забезпечити продуктивність, безпеку, захист та взаємодію між ними. З деталізацією як технічних характеристик, так і операційних аспектів використання голосового зв'язку та передачі даних між аеронавігаційними диспетчерськими центрами (Ground-Ground Communication) та диспетчерами і літаками (Air-Ground Communication).

Основні вимоги до продуктивності та якості системи VoIP ATM

Забезпечення низької затримки під час передавання критичних авіаційних повідомлень є необхідною умовою в сучасних системах управління повітряним рухом. Це потребує ретельної пріоритизації мережевого трафіку, де дані класифікуються за категоріями – *critical*, *high*, *medium* та *low* – залежно від їх важливості. Також необхідно забез-

печити збереження цілісності сигналу, щоб передача голосових повідомлень відбувалася без спотворень і втрат. Крім того, сигнали керування мають передаватися з високою точністю, дотримуючись суворого обмеження максимально допустимої затримки – не більше 100 мс «наземними» мережами (рис. 2). Затримка передачі голосових пакетів для наземних компонентів не повинна перевищувати 130 мс (рис. 3).

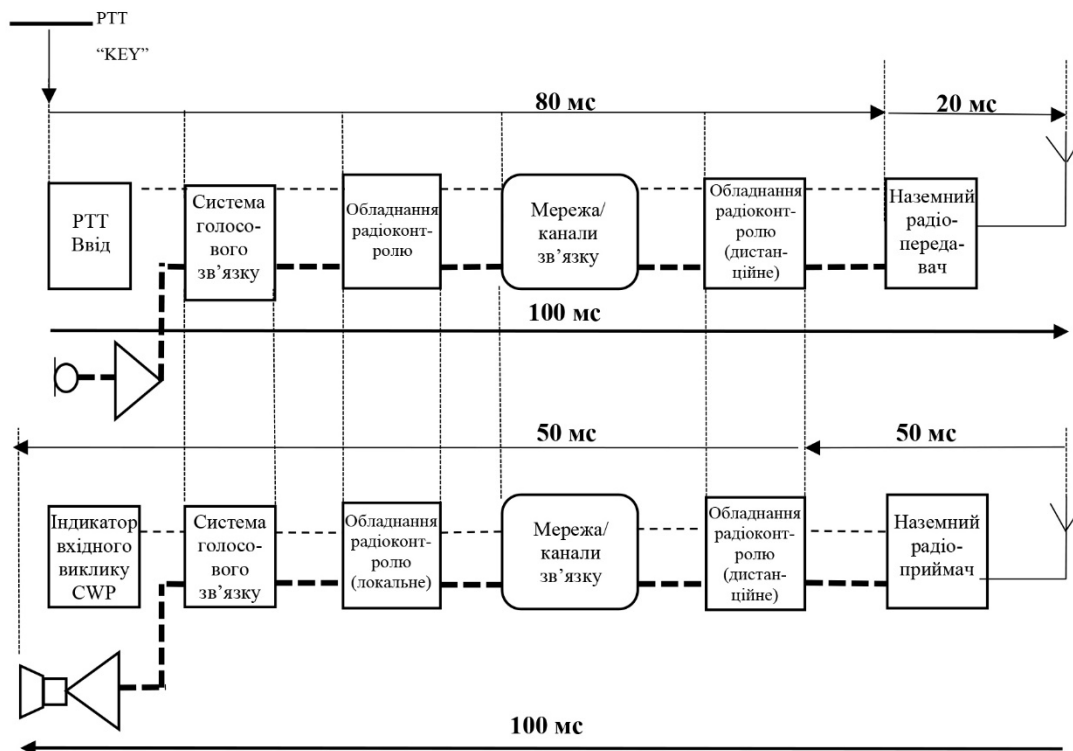


Рис. 2. Вимоги до затримки сигналів управління

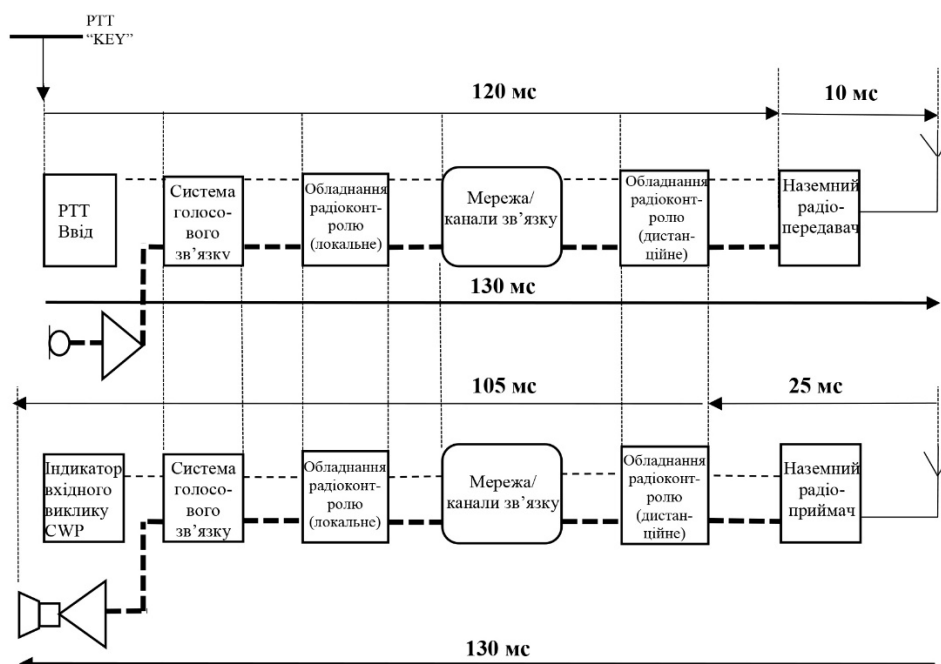


Рис. 3. Вимоги до затримки голосових сигналів наземних компонентів

Крім того, Jitter не повинен бути більшим 30 мс для підтримки високої якості голосу, втрата пакетів менше 1% для забезпечення прийнятної чіткості передачі голосу. І ключовий показник Mean Opinion Score (MOS) має бути не меншим за 4.0 для високої якості голосового зв'язку.

Безпека та захист

Для шифрування голосового трафіку має застосовуватись протокол Secure Real-Time Transport Protocol (SRTP) [23]. Процедури аутентифікації та контролю доступу забезпечують протоколи Transport Layer Security (TLS) та IPSec. Також необхідно передбачити захист від атак типу Denial of Service (DoS) та впровадити механізми виявлення аномалій трафіку для надійної роботи системи при втраті зв'язку або аварійних ситуаціях.

Вимоги до інтероперабельності між IP-компонентами VoIP ATM-системи

Мережа ATN/IPS повинна підтримувати взаємодію із системами управління повітряним рухом країн Європейського Союзу та відповідати стандартам SESAR. Ключовим моментом є підтримка протоколів IPv6 для забезпечення довгострокової масштабованості мережі, деталізовано в [11].

Протоколи та стандарти

Необхідно використовувати протокол SIP для встановлення, управління та завершення дзвінків. Забезпечити підтримку Real-Time Transport Protocol (RTP) [24] для передачі голосового трафіку та сумісність із аудіокодеками ITU-T G.711, G.729 та іншими. Протокол Simple Network Management Protocol (SNMP) [25] застосовується для моніторингу стану компонентів.

Сумісність обладнання

Має бути забезпечена можливість підключення АТС-консоль, шлюзів та серверів сигналізації. Інтеграція з наявними системами голосового зв'язку ATM та підтримка протоколів для маршрутизації та балансування навантаження (OSPF, BGP, MPLS).

Якість обслуговування (QoS – Quality of Service)

Пакети голосового трафіку повинні мати вищий пріоритет порівняно з іншими видами трафіку, щоб уникнути затримок під час перевантаження мережі. Система має бути достатньо стійкою, щоб запобігати втратам голосових даних навіть у випадку відмови окремих компонентів. Також важливо забезпечити підтримку режиму Climaх, який дозволяє обирати найкраще доступне джерело сигналу для отримання сигналу високої якості. Доцільним є застосування механізмів пріоритизації трафіку DiffServ та MPLS-TE, для

підтримання належного рівня продуктивності. Необхідно гарантувати мінімальну пропускну здатність для голосового трафіку – не менше 64 кбіт/с на один виклик. Крім того, важливими є ефективне управління чергами та буферизація, що дозволяють уникнути втрат пакетів і забезпечити стабільність передавання голосових повідомлень.

Надійність та відмовостійкість

Забезпечення надійного функціонування систем управління повітряним рухом передбачає безперервний і стійкий обмін даними між наземними центрами управління повітряним рухом (АТС) та повітряними суднами. Для цього необхідно впроваджувати резервування каналів зв'язку, а також механізми автоматичного перемикання на випадок відмови (failover, redundancy), що дозволяє мінімізувати ризик втрати зв'язку. Система повинна гарантувати стабільну роботу навіть за умов високого навантаження, що вимагає ефективної організації ресурсів та адаптивних рішень. Постійний моніторинг параметрів мережі дозволяє виявляти відхилення в роботі та оперативно усувати проблеми, а впровадження механізмів автоматичного відновлення забезпечує швидке повернення системи до штатного режиму у випадку збоїв.

Методологія тестування та критерії відповідності

Необхідно застосовувати лабораторні випробування для перевірки затримок, втрат пакетів та продуктивності системи. Симуляцію реальних умов експлуатації та навантажень на мережу. Передбачити перевірку на захист від атак та безпеку комунікацій. Має бути сумісність із стандартами ITU-T, ETSI та рекомендаціями EUROCAE. Виконання вимог щодо QoS, безпеки та сумісності компонентів для забезпечення надійності роботи в реальному середовищі ATM.

Розрахунок елементарних параметрів, які можуть впливати на якість голосових даних в мережах VoIP ATM

Якість голосу на основі E-моделі

Необхідно підтримувати якість передачі голосу, яка відповідає критеріям ITU-T [26] для високоякісного зв'язку. Якість голосу радіозв'язку визначається за допомогою методології оцінки якості голосу номінального рейтингу «Середня оцінка думки» MOS. Шкала MOS була сформульована в результаті суб'єктивних досліджень. У суб'єктивному тестуванні суб'єкти попросили класифікувати сприйману якість голосу за категоріями голосового сигналу: відмінно (5), добре (4), задовільно (3), погано (2) і дуже погано (1). Щоб мінімізувати наслідки погіршення якості голосу, значення MOS радіовиклику через наземний сегмент «до» та «від» радіоблаштування ПОВИННО дорівнювати або перевищувати 4.

Найпоширенішим підходом до кількісної оцінки якості мови (а отже й її розбірливості) у мережах VoIP є застосування Е-моделі (рис. 4) [27].

За цією моделлю розраховується так зване «R-значення», яке враховує як вплив затримки, так і вплив втрат пакетів (разом з іншими чинниками).

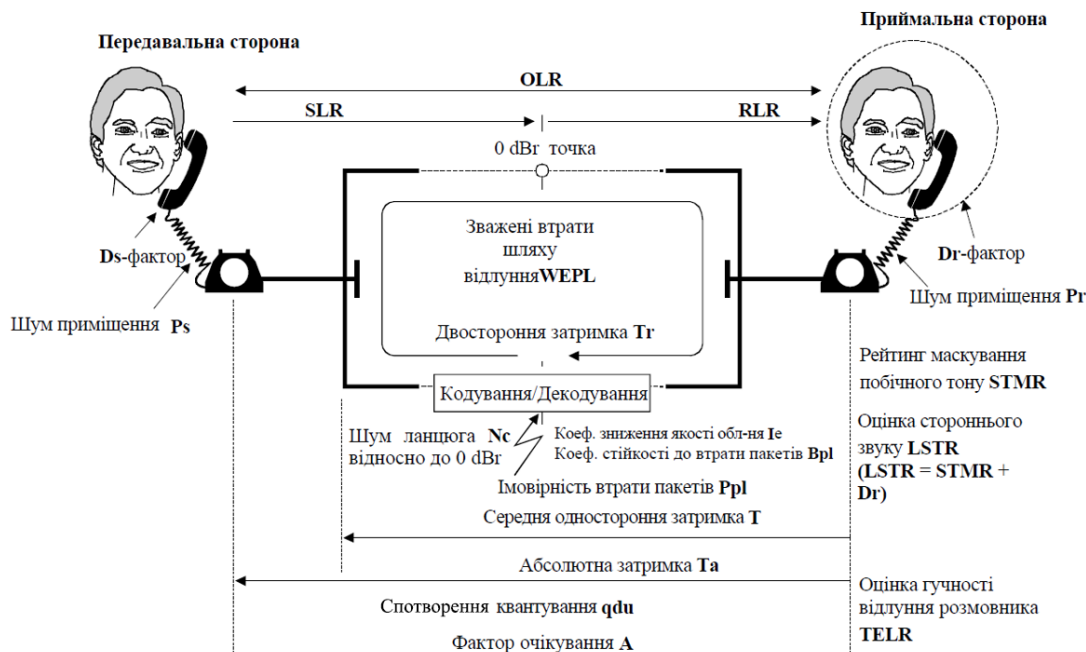


Рис. 4. Еталонне зображення Е-моделі

Одне з базових представлень цієї моделі має вигляд формули:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e-eff} + A,$$

де R_0 – базове значення, що враховує ефекти шуму та загальну сигнал/шум ситуацію;

$$R_0 = 15 - 1,5(SLR + N_0),$$

де SLR – Показник гучності передавання; N_0 – сумарна потужність різних джерел шумів; I_s – фактор одночасного погіршення якості, визначається наступним чином:

$$I_s = I_{olr} + I_{st} + I_q,$$

де I_{olr} – коефіцієнт, який показує зниження якості через занадто низький рівень OLR (Overall Loudness Rating – загальний показник гучності); I_{st} – коефіцієнт, який представляє погіршення якості, спричинене неоптимальним сайдтоном; I_q – коефіцієнт, який показує погіршення якості у зв'язку із квантуванням.

Коефіцієнт затримки I_d розраховується як сума трьох складових:

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd},$$

в якій: I_{dte} – надає оцінку зниження якості через відлуння особи, що розмовляє; I_{dle} – оцінює зниження якості через відлуння особи, яка слухає; I_{dd} – визначає погіршення якості через занадто значну абсолютну затримку T_a .

В контексті критичності розглянутих вище вимог до затримок проходження сигналів в зоні відповідальності наземного обладнання мережі АЕЗ

зупинимось більш детально на факторах впливу на виникнення затримок голосових даних.

Загальна затримка (D_{total}) складається з кількох компонентів:

$$D_{total} = D_{net} + D_{enc} + D_{sec} + D_{buf},$$

де D_{net} – затримка проходження пакетів через мережу (включає маршрутизацію, затримки між вузлами); D_{enc} – затримка на кодування мови (час, необхідний для перетворення аналогового сигналу в цифровий); D_{sec} – затримка, спричинена процесами шифрування та дешифрування; D_{buf} – затримка буферизації (накопичення та обробка пакетів у приймачі). Буферизація використовується для згладжування варіацій затримки (джиттера), але її збільшення може призвести до втрати синхронізації [28]:

$$D_{buf} = k \cdot J,$$

де J – джитер (мінливість затримки); k – коефіцієнт буферизації (залежить від алгоритму компенсації).

Зазвичай, якщо джиттер $J \geq 30$ мс, то D_{buf} починає суттєво впливати на якість мови.

Приклад підбору параметрів та розрахунку затримки з метою перевірки на відповідність вимогам до мережі авіаційного електрозв'язку

В авіаційній мережі електрозв'язку максимальна затримка передачі голосового пакету D_{total} не повинна перевищувати 130 мс на двох критичних ділянках «до радіопередавача» (затримка назем-

ної мережі) та «після радіоприймача» (затримка наземної мережі після прийому пакету з повітряного сегмента). Для забезпечення мінімального

впливу на цей параметр проаналізуємо допустимі аудіокодеки відповідно до рекомендацій [9], стислий аналіз [29–31] яких наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики аудіокодеків

Кодек	Метод кодування	Бітрейт (Кбіт/с)	MOS (якість)	Затримка (мс)
G.711 (A-law)	PCM	64	$\approx 4,1$	$\sim 0,125-1$
G.728 (безPLC)	LD-CELP	16	$\approx 3,8-4,0$	$\sim 3-5$
G.728 (LD-ELP, наскрізне)	LD-CELP	16	$\approx 3,8-4,0$	$\sim 3-5$
G.729	CS-ACELP	8	$\approx 3,92$	$\sim 10-15$

Обираємо G.711 (A-law), оскільки він найбільш ефективний відповідно до MOS і має мінімальну затримку. Затримка мережі D_{net} – це сума часу проходження пакету через маршрутизатори, часу обробки на комутаційних пристроях та часу передачі крізь наземні лінії.

Згідно з останніми дослідженнями [32], з урахуванням повномасштабного вторгнення та коригувань маршрутів типові затримки для регіональної IP-мережі України становлять 15–20 мс, для європейського домену 40–50 мс.

Приймаємо $D_{net} = 70$ мс як сумарне значення для реальної наземної мережі з урахуванням запasu на похибки.

Затримка через шифрування. VPN або IPSec додає приблизно 10–15 мс [33, 34] затримки. Обираємо середнє $D_{sec} = 12$ мс.

Визначення затримки буферизації. Буферизація компенсує джиттер, але додає додаткову затримку. Для VoIP рекомендується не більше $D_{buf} = 20$ мс [34].

Перевірка на відповідність вимогам до мережі АЕЗ:

$$D_{total} = D_{net} + D_{enc} + D_{sec} + D_{buf} = 70 + 1 + 12 + 20 = 103 \text{ мс.}$$

Отримане значення менше 130 мс, тобто обрані параметри задовольняють вимогам EUROCAE.

Наступний параметр в R -моделі I_{e-eff} – коефіцієнт впливу якості обладнання, основним компонентом якого є вплив втрат пакетів через зниження швидкості кодеку.

Це значення залежить від результатів тестування за допомогою суб'єктивної оцінки якості (MOS) та досвіду роботи в мережі. Раніше використовували таблиці, що залежали від втрати пакетів для визначення значень I_{e-eff} . Часто описується як функція, що враховує базовий імпеданс кодеку та ефективний відсоток втрат пакетів за допомогою формули:

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) \frac{P_{pl}}{\frac{B_{pl}}{BurstR} + P_{pl}},$$

де I_e – базове значення імпедансу для конкретного кодеку (без втрат пакетів); P_{pl} – імовірність втрат пакетів; B_{pl} – коефіцієнт стійкості до втрат пакетів; $BurstR$ – коефіцієнт вибуховості втрат пакетів, у випадку Марківського розподілу втрат пакетів, з імовірностями p переходу від стану «виявлено» до стану «втрачено» та з імовірностями q – від стану «втрачено» до стану «виявлено»:

$$BurstR = \frac{1}{p + q}.$$

Отримане значення R можна перетворити у шкалу MOS або безпосередньо інтерпретувати для оцінки розбірливості мови.

A – додатковий коефіцієнт, що може враховувати позитивні ефекти (наприклад, користувацькі очікування від мобільності).

Ця модель дозволяє проводити оцінку якості голосового зв'язку з урахуванням основних мережевих параметрів, таких як затримка та втрати пакетів, що безпосередньо впливають на розбірливість мови.

Зв'язок між кількістю переданої інформації та параметрами E-моделі

Формула швидкості передавання інформації може бути визначена через ентропію [35]:

$$I_{inf} = v \cdot H(\lambda),$$

де v – швидкість вимови фонем (кількість фонем за секунду) відповідно до [36] в середньому 12 фонем/с для англійської мови; $H(\lambda)$ – ентропія мовлення (біт/фонему).

Щоб визначити кількість інформації, яка міститься в одній фонемі, використовують ентропію Шеннона:

$$H(\lambda) = \log_2(m),$$

де m – кількість фонем у мові.

Для англійської мови (≈ 44 фонем):

$$H(\lambda) = \log_2(44) = 5,46 \text{ (біт на фонему).}$$

З урахуванням кореляції між фонемами (через природні залежності у мові), реальна ентропія буде меншою. Для англійської мови, як основної для ICAO, це значення зазвичай оцінюється приблизно 3,5–4,0 біт на фонему.

Аналіз впливу пропускної здатності та шуму

Формула для кількості інформації на виході кодексу з врахуванням відношення сигнал/шум за потужністю має вигляд [35]:

$$I_{out} = 2kF_{max} \Delta t N \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right),$$

яка показує: якщо відношення сигнал/шум $\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}$

низьке (високий рівень шуму), то I_{out} падає і R знижується.

Шум квантування виникає в результаті заміни неперервного аналогового значення дискретним під час аналого-цифрового перетворення. Існує два основні методи квантування: округлення та усічення.

Округлення – це заміна вхідного значення на найближче допустиме дискретне. Такий метод мінімізує похибку, забезпечує рівномірний розподіл шуму та застосовується у більшості сучасних аудіокодеків. Усічення означає заміну вхідного значення на найближче менше або рівне дискретне значення. У цьому випадку виникає систематична похибка, яка спричиняє нелінійні спотворення.

Усічення може давати більший шум квантування, ніж округлення, і використовується здебільшого в простих цифрових пристроях або там, де реалізаційна складність має вирішальне значення. Якщо діапазон голосового сигналу $2x_{max}$ та розряд квантувача – k , то діапазон квантування розраховується за формулою

$$\Delta = \frac{2x_{max}}{2^k}.$$

Відповідно, середньо-квадратичне значення шуму із рівномірним розподілом має вигляд

$$\sigma_n^2 = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{x_{max}^2}{3 \cdot 2^k}.$$

Тоді відношення сигнал/шум можна представити як

$$\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{3 \cdot 2^k}{x_{max}^2 / \sigma_s^2}.$$

Якщо k низьке, то втрати інформації зростають і MOS падає.

Також знаємо, що кількість втраченої інформації I_{lost} (через втрати пакетів, шум та спотворення) знижує R -фактор, спрощено це можна зобразити наступним чином:

$$I_{lost} = I_{inf} \cdot PLR,$$

де PLR – packet loss rate (коефіцієнт втрат пакетів).

Тоді модель параметру втрат якості через кодек зобразимо як:

$$I_{e-eff} = k_1 \cdot PLR + k_2 \cdot \left(1 - \frac{I_{out}}{I_{inf}} \right),$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти впливу, залежні від кодексу.

Звідси, чим менша кількість переданої інформації після кодексу I_{out} , тим більше значення має I_{e-eff} і, відповідно, знижує показник R (або MOS).

Головний висновок: чим більше втрачено корисної інформації в кодексу, тим вище I_{e-eff} і нижче MOS .

Вплив втрати пакетів та джиттеру на параметр MOS

Відповідно до [37] може бути розрахована узагальнена модель, яка відображає залежність MOS від двох основних параметрів якості: джиттеру (MOS_J) і втрати пакетів (MOS_L), використовуючи множинну лінійну регресію:

$$MOS_E = \beta_0 + \sum_{i=1}^n (\alpha_i \times x_i),$$

де β_0 – зсув (константа) моделі; α_i – коефіцієнти ваг для кожного параметру MOS_J та MOS_L ; x_i – відповідні значення MOS_J або MOS_L .

Вплив коефіцієнту готовності обладнання R_{eq}

Коефіцієнт готовності обладнання враховує його надійність:

$$MOS_R = MOS \times R_{eq},$$

де R_{eq} – коефіцієнт готовності обладнання (від 0 до 1, де 1 – повна доступність).

Приклад: якщо $MOS = 4,0$, а надійність обладнання $R_{eq} = 0,98$, то:

$$MOS_R = 4,0 \times 0,98 = 3,92.$$

Чим нижче R_{eq} , тим більше знижується розбірливість мови.

Фінальна формула MOS з урахуванням усіх параметрів має вигляд:

$$MOS = (MOS_{max} - MOS_E) \times R_{eq}.$$

В цілому, якщо порівнювати обсяг голосових повідомлень, які можуть передаватись за одну секунду системами на основі VoIP (в залежності від кодексу, 8000–64000 біт) із обсягом повідомлень, які передаються системами ACARS (300–2400 біт), можна зробити висновок, що голосові дані потребують значно більшої смуги через надлишковість, але VoIP дозволяє здійснювати не лише передачу команд, а й передачу смислу, впевненості та контексту. Це критично для безпеки, особливо в управлінні повітряним рухом.

Прогноз навантаження на мережу АЕЗ України

За основу прогнозу навантаження на мережу АЕЗ в Україні можна використати математичну модель розподілу пасажиропотоків на внутрішніх авіалініях України, яку запропоновано та детально розглянуто в [38]. Оскільки авіаційний

електрозов'язок (голосовий та цифровий обмін даними) обслуговує пасажиропотоки, прогнозування навантаження на нього безпосередньо залежить від пасажирських переміщень.

В поточній моделі прогнозування з урахуванням можливих військово-політичних ситуацій, тимчасового припинення вогню з наявністю тимчасово окупованих територій розглядаються аеропорти в містах: Дніпро (Д), Київ (Київ + Бориспіль) (К), Львів(Л), Одеса (О), Харків(Х) та потенційно Житомир(Ж) і Ужгород(У).

Модель базується на представленні транспортної системи у вигляді дискретної Марківської системи, де аеропорти міст розглядаються як можливі стани системи, а рейси між ними – як переходи між станами. Вважаємо, що перехід з одного стану в інший (рейс між деякими парами аеропортів) відбувається з відповідної залежності від часу локальною ймовірністю переходу $P(t)_{ij}$, у вигляді системи з дискретною кількістю станів $N=7$, переходи між якими можливі в дискретні моменти часу (наприклад, 1, 2, ..., 365). Індеси i та j – аеропорт вильоту та аеропорт прильоту.

Модельні допущення:

1. Якщо виконано рейс між певними аеропортами, це означає перехід системи із стану i у стан j .
2. Ймовірність такого переходу в дискретний момент часу позначається як $P(t)_{ij}$.
3. Умовно вважаємо, що цей показник залежить лише від самого факту виникнення переходу-стрибка.

Індесакція станів системи: Д = 1, К = 2, Л = 3, О = 4, Х = 5, Ж = 6, У = 7.

Оскільки система може перебувати в одному з N станів, з якого може перейти в один з $N-1$ станів, то для кожного моменту часу t необхідно задати $N^2 - N$ ймовірностей переходу $P(t)_{ij}$. Система переходів може бути записана у вигляді матриці $N \times N$:

$$P(t) = \begin{bmatrix} 0 & P(t)_{1,2} & \dots & P(t)_{1,N} \\ P(t)_{2,1} & 0 & \dots & P(t)_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P(t)_{N,1} & P(t)_{N,2} & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Цю матрицю переходів можна подати у вигляді сигнального графа дискретних станів (рис. 5), інтерпретуючи переходи системи із стану i в стан j як передавання сигналу від одного вузла до іншого з коефіцієнтом передачі $P(t)_{ij}$.

Ймовірність переходу пасажирів з одного стану в інший визначається за допомогою функції залежності від певних параметрів:

$$P(t)_{ij} = f(A_i, K_i, L_{ij}, P_{Cij}, P_{Bij}, \lambda(t)),$$

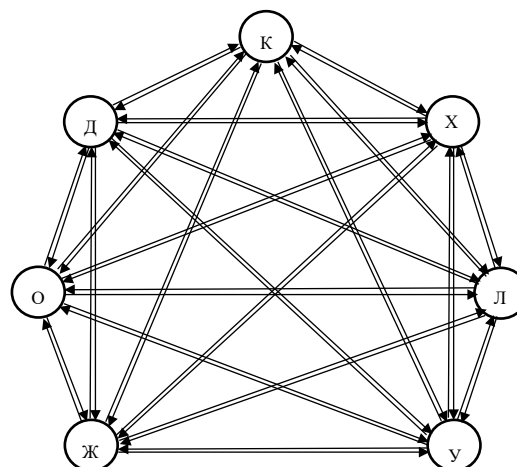


Рис. 5. Граф дискретних станів системи

де кожен параметр відображає вплив різних соціально-економічних та транспортних факторів: A_i – населення міста: враховується відносна частка населення кожного міста у загальній системі; K_i – коефіцієнт заробітної плати: визначається як відношення середньої зарплати в місті до загальної середньої зарплати по всіх містах; L_{ij} – відстань між містами: використовується нормоване значення відстані між містами; C_{ij} – привабливість пункту призначення: оцінюється за рівнем ділової активності, туристичної привабливості, наявності промислових зон тощо; P_{Bij} – ймовірність вибору транспорту: враховує час у дорозі, вартість квитка, доступність альтернативних видів транспорту; $\lambda(t)$ – інтенсивність надходження заявок відображає змінну сезонність та інші часові фактори, які впливають на транспортні потоки.

Основні параметри для оцінки навантаження на авіаційний зв'язок:

Обсяг трафіку даних: прямо пропорційний кількості рейсів між вузлами графа.

Інтенсивність голосового трафіку: залежить від пасажиропотоку та часу в дорозі.

Сезонні зміни: пікові навантаження на мережу зв'язку збігаються з періодами пікових перевезень.

Прогнозування пропускної здатності: використовується та ж сама матриця ймовірностей переходів, але зі спеціальними ваговими коефіцієнтами для зв'язку.

Запропонована модель дозволяє ефективно прогнозувати розподіл пасажиропотоків та навантаження на авіаційну телекомунікаційну мережу. Вона враховує комплексні фактори, що впливають на вибір маршрутів та транспортних засобів, а також дозволяє оцінити пікові навантаження для оптимізації авіаційної інфраструктури та зв'язку як в конкретно взятому аеропорту, так і мережі в цілому.

Висновки

Аналіз керівних документів ICAO та EUROCAE систематизує фундаментальні вимоги до систем VoIP у сфері авіаційного управління. Їх дотримання забезпечує високу якість передачі голосу, надійність системи та безпеку комунікацій. Ці вимоги є обов'язковими для впровадження сучасних рішень у системах АТМ та сприяють підвищенню ефективності аеронавігаційного обслуговування.

Імплементація вимог ICAO та EUROCAE у мережу АТН/ІПС є стратегічно важливим кроком для модернізації авіаційної інфраструктури України після завершення війни. Впровадження сучасних технологій передачі даних дозволить:

Забезпечити високу якість зв'язку між диспетчерськими службами, аеропортами та повітряними суднами.

Підвищити рівень кібербезпеки авіаційної інфраструктури.

Інтегрувати АЕЗ України з європейською системою управління повітряним рухом.

Таким чином, поступовий перехід до АТН/ІПС дозволить Україні відновити авіаційний сектор, відповідати міжнародним стандартам і забезпечити безпечне функціонування повітряного простору після його відкриття.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Manual on the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) using Internet Protocol Suite (IPS) standards and protocols: Doc 9896. International Civil Aviation Organization (ICAO), 2015. 112 p.
- [2] Голубничий О. Аналіз вимог та рекомендацій ICAO щодо забезпечення інформаційної безпеки мережі АТН. *Захист інформації*. 2013. Т. 15, № 4. С. 377–382.
- [3] Security in Digital Aeronautical Communications: A comprehensive gap analysis. *International journal of critical infrastructure protection* / N. Mäurer. et al. 2022. Vol. 38, no. 5. Article 100549. DOI:10.1016/j.ijcip.2022.100549
- [4] Enhancing air traffic control communication systems with integrated automatic speech recognition: models, applications and performance evaluation / Z. Wang et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 14. DOI:10.3390/s24144715 (date of access: 10.07.2025).
- [5] A survey of wireless networks for future aerial communications (FACOM) / A. Baltaci et al. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2021. P.2833- 2884. DOI:10.1109/comst.2021.3103044 (date of access: 11.07.2025).
- [6] LDACS End-to-End ATN/IPS Performance / B. Haindl et al. *2024 Integrated Communications, Navigation and Surveillance conference (ICNS)*, Herndon, VA, USA, 23–25 April 2024. DOI:10.1109/icns60906.2024.10550548 (date of access: 12.07.2025).
- [7] Lala V., Pirovano A., Radzik J. Towards a new approach to ensure end-to-end reliability of aeronautical data communications. *The aeronautical journal*. 2025. Vol 129, Issue 1334. P. 1001–1027. URL: <https://doi.org/10.1017/aer.2024.139> (date of access 12.07.2025).
- [8] Multiple-Antenna aided aeronautical communications in air-ground integrated networks: channel estimation, reliable transmission, and multiple access / J. Zhao et al. *IEEE wireless communications*. 2023. P. 105– 111. URL: <https://doi.org/10.1109/mwc.014.2200414> (date of access 13.07.2025).
- [9] Bradford S., Hauw O., Saccone G. Future Connectivity for Aviation (FCAV). Presentation at ATIEC 2023 Conference. *Federal Aviation Administration (FAA)*, 2023. URL: https://www.faa.gov/air_traffic/flight_info/aeronav/atiec/media/Presentations/2023/Day_3/Future%20Connectivity%20for%20Aviation%20%28FCAV%29.pdf (date of access 14.07.2025).
- [10] Single European Sky ATM Research 3 Joint Undertaking. *SESAR Innovation Pipeline: Air Traffic Management Research and Innovation: 2024 highlights*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025. DOI: 10.2829/0520524 (date of access 13.07.2025).
- [11] Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification: RFC 8200. IETF, 2017. DOI: 10.17487/RFC8200. (date of access 10.04.2025).
- [12] Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Addressing Architecture: RFC 4291. IETF, 2006. 40 pp. DOI: 10.17487/RFC4291. (date of access: 11.04.2025).
- [13] TCP Extensions for High Performance: RFC 1323. IETF, 1992. 37 pp. DOI: 10.17487/RFC1323. (date of access 11.04.2025).
- [14] UDP Usage Guidelines: RFC 8085. IETF, 2017. 55 pp. DOI: 10.17487/RFC8085. (date of access 12.04.2025).
- [15] A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4): RFC 4271. IETF, 2006. 104 pp. DOI: 10.17487/RFC4271. (date of access 15.04.2025).
- [16] ED-136. Voice over IP ATM System Operational and Technical Requirements. EUROCAE. 2009. 112 p.
- [17] ED-137. Interoperability Standards for VoIP ATM Components. Part 1: Radio. EUROCAE. 2009. 76 p.
- [18] ED-137 Interoperability Standards for VoIP ATM Components. Part 2: Telephone. EUROCAE. 2009. 155 p.
- [19] ED-137 Interoperability Standards for VoIP ATM Components. Part 3: Recording. EUROCAE. 2009. 30 p.
- [20] ED-138 Network Requirements and Performances for Voice over IP Air Traffic Management Systems. EUROCAE. 2009. 230 p.
- [21] SIP: Session Initiation Protocol: RFC 3261. IETF, 2002. 109 p. DOI: 10.17487/RFC3261. (date of access 20.04.2025).

- [22] Session Initiation Protocol (SIP)-H.323 Interworking Requirements: RFC 4123. IETF, 2005. 32 p. DOI: 10.17487/RFC4123. (date of access 22.04.2025).
- [23] The Secure Real-time Transport Protocol (SRTP): RFC 3711. IETF, 2004. 56p. DOI: 10.17487/RFC3711. (date of access 23.04.2025).
- [24] RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications: RFC 3550. IETF, 2003. 104 p. DOI: 10.17487/RFC3550. (date of access 25.04.2025).
- [25] An Architecture for Describing Simple Network Management Protocol (SNMP) Management Frameworks: RFC 3411. IETF, 2002. 33 p. DOI: 10.17487/RFC3411 (date of access 25.04.2025).
- [26] ITU-T. Recommendation P.800: Methods for Subjective Determination of Transmission Quality. Geneva: ITU, 1996.
- [27] ITU-T. Recommendation G.107: The E-model, a Computational Model for Use in Transmission Planning. Geneva: ITU, 2005.
- [28] ITU-T. Recommendation G.114: One-way Transmission Time. Geneva: ITU, 2003.
- [29] ITU-T. Recommendation G.711: Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies. Geneva: ITU, 1988.
- [30] ITU-T. Recommendation G.728: Coding of Speech at 16 Kbit/s Using Low-delay Code Excited Linear Prediction. Geneva: ITU, 1992.
- [31] ITU-T. Recommendation G.729: Coding of Speech Signals at 8 kbit/s Using Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear-Prediction (CS-ACELP). Geneva: ITU, 2007.
- [32] Luconi V., Vecchio A. Impact of the first months of war on routing and latency in Ukraine. *Computer Networks*. 2023. Vol. 224. DOI: 10.1016/j.comnet.2023.109596.
- [33] Huang C. Secure Network Solutions for Cloud Services: Master's thesis. Ballarat. 2013. 98 p.
- [34] Eskandar A. A., Syed M. R., Zarei B. SIP over IP VPN: Performance Analysis. *Proceedings of the International Conference on Internet Computing and Big Data (ICOMP'14)*, Las Vegas, USA. 2014.
- [35] Assessment of the availability of communication channels with UAVs./ G. Konakhovych et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3732. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3732/paper04.pdf> (date of access: 08.04.2025)
- [36] Ladefoged, P., Johnson, K. *A Course in Phonetics*. 7th ed. Boston: Cengage Learning, 2014. 464 p.
- [37] Zacha P., Pokorny M., Baleja J. Quality of Experience of Voice Services in Corporate Network. *Procedia Economics and Finance*. 2014. Vol. 12. P. 771–779. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)00404-3.
- [38] Козлюк І.О. Забезпечення економічної безпеки авіаційної галузі: монографія. К : НАУ, 2005. 236 с.

Конахович Г. Ф., Козлюк І. О., Дорошенко С. С.

ВПРОВАДЖЕННЯ IP-ТЕХНОЛОГІЙ В МЕРЕЖІ АВІАЦІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

В даній статті представлено всебічне дослідження технічних та нормативних стандартів міжнародних організацій ICAO та EUROCAE в контексті модернізації обладнання авіаційного електрозв'язку України завдяки впровадженню архітектури конвергентної мережі авіаційного електрозв'язку ATN/IPS. Обґрунтовано доцільність заміни застарілих TDM-мереж на сучасні IP-технології, зокрема, в частині організації голосового зв'язку для управління повітряним рухом на базі технології VoIP. Проаналізовано вимоги до застосування протоколів на ключових рівнях моделі OSI: IPv6, TCP/UDP, IPsec, IKE2, SIP та RTP, а також рекомендації до якості обслуговування QoS. Наведено обґрунтування вибору параметрів обладнання мережі з точки зору мінімізації затримок передачі пакетів крізь IP-мережі з метою забезпечення відповідності нормативним показникам, необхідним для стабільної роботи систем управління повітряним рухом. Визначено допустимі рівні джиттеру, втрат пакетів, а також граничні значення MOS та затримок корисних сигналів та сигналів управління. Виконано розрахунок загальної затримки передачі голосового трафіку з урахуванням шифрування, буферизації та використання аудіокодеків в частині забезпечення необхідної якості голосу на основі E-моделі. Запропоновано математичний підхід для розрахунку прогнозування навантаження на телекомунікаційну мережу авіаційного електрозв'язку України, яка базується на аналізі пасажиропотоків між регіональними аеропортами України з використанням дискретної Марківської системи. Отримані результати сприятимуть підвищенню ефективності впровадження IP-технологій в авіаційні мережі а також реалізації програм їх модернізації після закінчення війни та відкриття повітряного простору України.

Ключові слова: авіаційний електрозв'язок; ATN/IPS; якість передачі голосу; E-модель; прогнозування навантаження мережі.

Konakhovych G., Kozliuk I., Doroshenko S.**IMPLEMENTATION OF IP-TECHNOLOGIES IN THE AERONAUTICAL TELECOMMUNICATION NETWORK OF UKRAINE**

This article presents a comprehensive study of the technical and regulatory standards of the international organizations ICAO and EUROCAE in the context of modernization of aviation telecommunications equipment in Ukraine through the implementation of the ATN/IPS converged aviation telecommunications network architecture. The expediency of replacing outdated TDM networks with modern IP technologies, in particular, in terms of organizing voice communication for air traffic control based on VoIP technology, is substantiated. The requirements for the use of protocols at the key layers of the OSI model are analyzed: IPv6, TCP/UDP, IPsec, IKE2, SIP, RTP and recommendations for the quality of service. The rationale for choosing network equipment parameters in terms of minimizing packet transmission delays over IP networks in order to ensure compliance with the regulatory indicators required for the stable operation of air traffic control systems is provided. The permissible levels of jitter, packet loss, as well as the limit values of MOS and delays of payload and control signals are determined. The total delay of voice traffic transmission is calculated, taking into account encryption, buffering and the use of audio codecs in terms of ensuring the required voice quality based on the E-model. A mathematical approach is proposed to calculate the forecasting of the load on the telecommunication network of aviation telecommunications in Ukraine, based on the analysis of passenger flows between regional airports of Ukraine using a discrete Markov system. The results obtained will help to increase the efficiency of the implementation of IP technologies in aviation networks and the implementation of their modernization programs after the end of the war and the opening of Ukrainian airspace.

Keywords: aeronautical telecommunications; ATN/IPS; voice quality; E-model; network load forecasting.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2025 р.
Прийнято до друку 20.08.2025 р.